

# Забабакхинские научные чтения

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
02–06 ИЮНЯ 2014 ГОД

## ТЕЗИСЫ

---

## Zababakhin Scientific Talks

INTERNATIONAL CONFERENCE  
JUNE 02–06, 2014

## 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 XII Международной конференции 2–6 июня 2014. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2014. – 400 с, ил.

ISBN 978-5-902278-68-9

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

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

***Председатель 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**

Ногин Владимир Николаевич,  
Музыря Александр Кириллович,  
Анучин Михаил Геннадьевич

**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



*К 60-летию РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина*

## **ИНТЕЛЛЕКТ И ОПЫТ НА БЛАГО РОССИИ!**

Двенадцатая Международная конференция «Забабахинские научные чтения – 2014» открывает цикл мероприятий, посвященных 60-летию Российского Федерального Ядерного Центра – Всероссийского научно-исследовательского института технической физики имени академика Е. И. Забабахина (далее РФЯЦ – ВНИИТФ, институт), празднование которого состоится 10–12 июня 2015 года.

РФЯЦ – ВНИИТФ является одним из двух российских федеральных ядерных оружейных центров. Он представляет собой комплекс исследовательских и конструкторских подразделений, опытных производств и подразделений инфраструктуры. Институт создан для разработки и испытания ядерных зарядов и ядерных боеприпасов стратегического и тактического назначения, ядерных взрывных устройств в интересах мирного использования ядерной и термоядерной энергии, для комплексного решения научно-технических задач, обеспечивающих выполнение таких работ, для проведения фундаментальных и прикладных исследований высокоинтенсивных процессов гидро- и газодинамики, ядерной и лазерной физики, физики высоких плотностей энергии. Институт несёт ответственность за авторский и гарантийный надзор за ядерными зарядами и ядерными боеприпасами собственной разработки на всех этапах их жизненного цикла – от создания конструкции до демонтажа и утилизации основных составляющих узлов. Он обеспечивает сопровождение эксплуатируемого в войсках действующего ядерного арсенала, большую часть которого составляют разработки РФЯЦ – ВНИИТФ.

## **ПРЕДПРИЯТИЕ ОБЩЕГОСУДАРСТВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ**

«Днем рождения» ядерного центра считается 5 апреля 1955 года, день издания приказа об организации НИИ-1011. При создании научным руководителем и главным конструктором института был назначен трижды Герой Социалистического Труда, член-корреспондент Академии наук СССР Кирилл Иванович Щёлкин, а директором – лауреат Государственной премии СССР Дмитрий Ефимович Васильев. Ядро нового коллектива составили 350 сотрудников КБ-11. Это были опытные специалисты, успешно освоившие новые направления работ. Многие из них участвовали в работах по созданию первой отечественной атомной бомбы. Дополнительно привлекались научные, инженерные и рабочие кадры из других научных, конструкторских коллективов и предприятий. К 1960 году численность института превысила 6,5 тыс. сотрудников, а к концу десятилетия достигла 15 тыс. человек.

Для НИИ-1011 были построены производственные здания общей площадью 85 тыс. кв. м, включая два специализированных завода. Параллельно шло строительство города.

За период 1955–1960 годов институт создал и передал на вооружение четыре термоядерных заряда в составе двух авиабомб, крылатой ракеты и баллистической ракеты морского базирования. Сотрудники отличились и в решении фундаментальных научных проблем. Уже в 1957 году институт провел на Новой Земле первый успешный ядерный эксперимент по исследованию свойств веществ в экстремальных условиях. Были развернуты работы по созданию ядерно-взрывных устройств мирного назначения. Параллельно с разработкой вооружений ядерный центр наращивал свой научный и производственный потенциал.

За период самой активной деятельности с 1971 по 1991 год институтом были разработаны и переданы на вооружение новые авиабомбы для сверхзвуковых стратегических бомбардировщиков и самолетов фронтовой авиации; ядерные боевые части для стратегических и тактических крылатых ракет; сдан на вооружение малокалиберный артиллерийский снаряд; обеспечена комплектация ядерными боеголовками нескольких типов ракетных стратегических комплексов атомных подводных ракетносцев. Во второй половине 1980-х годов начались процессы свертывания оборонных программ, перехода к конверсионным разработкам.

С 1987 года сотрудники института вошли в состав советской делегации для разработки мер контроля за выполнением договоров об ограничении ядерных испытаний и мирных ядерных взрывах.

Кульминацией этих работ было проведение в 1988 году совместного эксперимента на Невадском и Семипалатинском полигонах. Измерения мощности подземных ядерных взрывов в этом эксперименте производились гидродинамическим методом, разработанным в 1965–1968 годах с определяющим участием ВНИИТФ. Итогом этой работы явилась ратификация в 1990 году обеих договоров и протоколов к ним, которые разрабатывались на основе результатов совместного эксперимента. Институт обеспечил последующую контрольную деятельность на Невадском полигоне.

В связи с экономическими и социальными преобразованиями, происходившими в стране, наиболее трудными в истории института стали 1992–1999 годы. В условиях кризиса экономики приходилось сворачивать ряд перспективных научно-исследовательских направлений, с неясными видами на успех искать возможные конверсионные работы.

31 марта 2000 года в Снежинске состоялось выездное заседание коллегии Минатома РФ с участием Президента РФ В. В. Путина. Главным результатом ее работы стала активизация разработок и расширение круга задач, поставленных перед институтом. Произошел переход от традиционного адресного закрепления тематики к конкурсам предложений для новых систем вооружений. Расширились возможности международного научно-технического сотрудничества: помимо работ по проектам МНТЦ, стали выполняться работы по прямым договорам с зарубежными партнерами.

## **ГЕНЕРАЦИЯ НАУЧНЫХ ИДЕЙ**

Новый период деятельности ядерного центра начал формироваться в 2008 году после того, как был изменен хозяйственно-правовой статус атомной отрасли. Институт продолжает выполнять государственный оборонный заказ и постепенно увеличивает работы по конверсионным направлениям, наращивая выпуск прочей продукции.

РФЯЦ – ВНИИТФ существенно продвинулся в техническом перевооружении производственной, испытательной и вычислительной базы. Успешно осваиваются средства, выделяемые на капитальное строительство. Ведутся работы в области фундаментальных и прикладных исследований, в том числе и в международной научной кооперации. Успешными являются работы по физике высоких плотностей энергии, материаловедению, диодной накачке лазеров. Были разработаны компоненты для детекторов CMS и ATLAS для суперколлайдера в CERN. Разрабатывается медицинская аппаратура, активное волокно для оптоволоконных лазеров. Ведутся разработки компонентов для систем хранения и транспортировки отработавшего топлива АЭС, а также исследования по безопасности атомной энергетики, развитию новых технологических процессов для замыкания ядерного топливного цикла быстрых реакторов и др. Развивается технология математического моделирования сложных явлений и технологических процессов и расширяется вычислительная база института.

Институт не только продолжает ранее начатые и востребованные заказчиком научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, но и развивает новые направления по оборонному и гражданскому секторам своей научно-производственной деятельности. В институте активно работает аспирантура и три диссертационных совета. Удалось поднять заработную плату сотрудников, обеспечить достойный социальный пакет не только работающим, но и ветеранам, оказать работникам существенную помощь в строительстве и приобретении жилья.

Все достигнутое ядерным центром обязано целенаправленной концентрации усилий, знаний, опыта и самоотверженному труду его основателей и последующих поколений сотрудников, чьи заслуги по достоинству оценены на общегосударственном уровне.

Интеллект ученых, ответственность руководителей, изобретательность и трудолюбие специалистов и рабочих сделали институт достойной и обязательной составной частью современного ядерного оружейного комплекса и одной из ведущих научно-исследовательских организаций России.

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ**

---

**PLENARY SESSION**



## РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ, ВЫЗВАННОЙ ЧЕЛЯБИНСКИМ БОЛИДОМ

М. И. Авраменко, И. В. Глазырин,  
Г. В. Ионов, А. В. Карпеев

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

E-mail: m.i.avramenko@vniitf.ru

Выполнено численное моделирование распространения воздушной взрывной волны, вызванной пролетом крупного болида вблизи г. Челябинск (Россия) 15 февраля 2013 г. Имевший место взрыв Челябинского метеороида произошел вследствие его катастрофической фрагментации во время движения в атмосфере. Расчеты пространственно-временного распределения энерговыделения взрыва проведены с использованием предложенной новой модели фрагментации, основанной на теории размерности и аналогии с цепной реакцией деления в делящихся материалах. Наблюдавшееся двухпиковое распределение энерговыделения по высоте расчетно воспроизводится из предположения, что метеороид состоял, в основном, из двух фракций с различной эффективной прочностью. Основная фракция составляла около 97,5% массы метеороида, оцениваемой в  $1,2 \cdot 10^7$  кг, и имела прочность от 0,3 до 4,9 МПа, возрастающую по мере дробления метеороида. Вторая фракция (около 2,5% массы) имела прочность 10,5 МПа. К концу фрагментации средняя расчетная масса фрагментов составляла около 2,3 кг для обеих фракций.

Для получения оценки энергии взрыва использовались времена-прихода воздушной волны в различные населенные пункты, полученные из наблюдений и отсчитываемые от момента максимальной яркости болида. Экспериментальные значения времен прихода были получены из соответствующих видеозаписей, размещенных в Интернет. Расчетные времена прихода воздушной волны хорошо согласуются с экспериментальными данными для всех рассмотренных населенных пунктов. Величина энерговыделения, пошедшего на образование взрывной воздушной волны, оценено в  $460 \pm 60$  кг в тротиловом эквиваленте. Была также получена независимая оценка этой величины в  $450_{-160}^{+200}$  кг TNT на основе регистрации избыточной скорости за фронтом волны в Челябинске. Значения избыточной скорости за фронтом были получены из видеозаписей движения автомобильных выхлопов непосредственно перед и после прихода воздушной волны.

Предполагая, что, как было зарегистрировано датчиками, размещенными на искусственных спутниках, энергия около 90 кг TNT была излучена в форме видимого света и инфракрасного излучения, можно оценить полное энерговыделение воздушного взрыва величиной около 550 кг TNT.

Данная оценка близка к значениям, полученным из инфразвуковых измерений и наблюдений светимости болида. Достигшая центра Челябинска взрывная волна имела амплитуду избыточного давления около 2 кПа и длительность положительной фазы давления около

10 секунд. Эта волна вызвала многочисленные разрушения остекления зданий и ранения людей разлетающимися осколками стекла.

## SIMULATION OF THE AIRWAVE CAUSED BY CHELYABINSK SUPERBOLIDE

M. I. Avramenko, I. V. Glazyrin,  
G. V. Ionov, A. V. Karpeev

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

E-mail: m.i.avramenko@vniitf.ru

Numerical simulations were carried out to model the propagation of an airwave from the fireball that passed over Chelyabinsk (Russia) on February 15, 2013. The airburst of the Chelyabinsk meteoroid occurred due to its catastrophic fragmentation in the atmosphere. Simulations of the space-time distribution of energy deposition during the airburst were done using a proposed novel fragmentation model based on dimensionality considerations and analogy to the fission chain reaction in fissile materials. The observed two-peak height distribution of energy release was successfully reproduced assuming that the meteoroid consisted of two volumes having different effective strength. The main volume of about 97.5% of the meteoroid mass, which was estimated to be as large as about  $1.2 \cdot 10^7$  kg, had a strength that varied from 0.3 to 4.9 MPa during its fragmentation. The second volume of about 2.5% of the meteoroid mass had the strength of 10.5 MPa. The calculated average fragment masses of the meteoroid volumes by the end of their fragmentation are about 2.3 kg.

To get an estimate of the airburst energy, we used the observed values of the airwave arrival times to different populated localities counted from the moment of the bolide maximal brightness. Experimental airwave arrival times were retrieved from video records available on the Internet. The calculated arrival times well agree with the experimental values for all the localities. Energy deposition in the atmosphere obtained from observations of the airwave arrival times was found to be  $460 \pm 60$  kt in trotyl equivalent. We also obtained an independent estimate for the deposited energy,  $450_{-160}^{+200}$  kt TNT from detecting the increment velocity behind the airwave front in Chelyabinsk. The increment velocity values were retrieved from video records which showed car exhausts just before and after the airwave arrival. Assuming that the energy of about 90 kt TNT was irradiated in the form of visible light and infrared radiation, as registered by the satellite monitoring network, one can value the total energy release to be about 550 kt TNT which is close to the existing estimates from infrasound registration and from US government sensors data. The overpressure amplitude and its positive phase duration in the airwave that reached Chelyabinsk center were calculated to be about 2 kPa and 10 s accordingly. This airwave caused large-scale window breakage in the apartment buildings and people injury by scattered glass fragments.

**ПОСЛЕДНИЕ УСПЕХИ В ТЕОРЕТИЧЕСКОМ И ЧИСЛЕННОМ ИЗУЧЕНИИ Z-ПИНЧА В ИНСТИТУТЕ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКЕ**

Х. Ли, Ц. Лю, Н. Дин, С. Вэй, Ц. Хуан,  
Я. Чжан, Д. Сяо, Ч. Сюэ

Институт Прикладной Физики и Компьютерной Математики,  
Пекин, Китай

E-mail: li\_hua@iapcm.ac.cn

Быстрый Z-пинч производит самый мощный источник рентгеновского излучения в лабораторных условиях, а также может использоваться для управления инерциально удерживаемым термоядерным синтезом (ICF). Последние успехи в изучении Z-пинча в Институте Прикладной Физики и Компьютерной Математики (IAPCM) представлены в этой работе. Z-пинч проволочного лайнера имеет три фазы: формирование проволочной плазмы и проволочной абляции, импlosion и развитие MRT неустойчивости, стагнация и излучение. Модель массовой инжекции с коэффициентом азимутальной модуляции используется для описания проволочного инициирования, а динамика аблированной плазмы Z-пинчей проволочного лайнера в геометрии  $(r, \theta)$  изучается численно. Получаются двумерные пространственно-временные распределения магнитного поля и тока предвестника, а также изучается условие образования оболочки плазмы на ранних временах. На фазе импlosion была разработана двумерная  $(r, z)$  трехтемпературная MHD программа излучения под названием MARED для исследования развития MRT неустойчивости. Показано, что развитие неустойчивости хорошо согласуется с линейной теорией на линейном, слабо линейном и нелинейном этапах. Мы также анализируем режимы импlosion вложенного проволочного лайнера и выявляем, что внутренний проволочный лайнер вряд ли подвергается влиянию до воздействия внешнего проволочного лайнера. Когда плазма, ускоренная до высокой скорости на этапе импlosion, тормозится на оси, генерируется избыточное излучение. Исследуются спектр энергии излучения и соответствующий механизм генерирования. Расчитанный импульс рентгеновского излучения показывает хорошее согласие с экспериментальными результатами. Мы также предполагаем, что использование легированных проволочных лайнеров может увеличить мульти-кэВ выход с K оболочки путем уменьшения непрозрачности линий K оболочки. Кроме того, мы используем подробную модель контура для изучения передачи энергии между генератором и Z-пинчем. Стенд предварительного испытания (PTS) – наиболее мощный импульсный генератор для изучения Z пинча в Китае. С помощью модели полного контура и модели MHD изучается моделирование распространения импульса электромагнитной волны от генератора к нагрузке, наблюдались сжатие, усиление и передача импульса. Результаты моделирования могут показать информацию об импульсе в нескольких областях генератора. Заряженная при напряжении 60 кВ, установка PTS доставляет электрический импульс с мощностью 4 ТВт и временем нарастания 880 нс к 24-модульному накопителю, затем на стойке водо-вакуумного изолято-

ра импульс сжимается, увеличивая мощность с 20 ТВт и 80 нс, мощность рентгеновского излучения около 50 ТВт с шириной импульса 4 нс производится Z-пинчем из вольфрамовой проволоки с линейной массой 600 мкг/см и током 8 МА.

Недавно мы сконцентрировались на проблемах инерциально удерживаемого термоядерного синтеза, управляемого Z-пинчем, таких как квазисферическая проволочная импlosion, динамический холтраум и кап-судная импlosion.

**RECENT ADVANCES IN THEORETICAL AND NUMERICAL STUDIES OF WIRE ARRAY Z-PINCH IN THE IAPCM**

H. Li, J. Liu, N. Ding, S. Wei, J. Huang,  
Y. Zhang, D. Xiao, C.g. Xue

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics,  
Beijing, China

E-mail: li\_hua@iapcm.ac.cn

Fast Z-pinch has produced the most powerful X-ray radiation source in laboratory and also shows the possibility to drive inertial confinement fusion (ICF). The recent advances in the Z-pinch researches at the Institute of Applied Physics and Computational Mathematics (IAPCM) are presented. The wire array Z-pinch process has three phases: wire plasma formation and wire-array ablation, implosion and the MRT instability development, stagnation and radiation. A mass injection model with azimuthal modulation coefficient is used to describe the wire initiation, and the dynamics of ablated plasmas of wire-array Z-pinches in  $(r, \theta)$  geometry is numerically studied. Two-dimensional spatio-temporal distributions of magnetic field and precursor current are obtained, and the formation condition of plasma shell in early time is examined. In the implosion phase, a two-dimensional  $(r, z)$  three temperature radiation MHD code MARED has been developed to investigate the development of the MRT instability. It is shown that the instability development corresponds well with the linear theory in the linear, weakly linear and nonlinear stages. We also analyze the implosion modes of nested wire-array and find that the inner wire-array is hardly affected before the impaction of the outer wire-array. While the plasma accelerated to high speed in the implosion stage stagnates on the axis, abundant x-ray radiation is produced. The energy spectrum of the radiation and the corresponding production mechanism are investigated. And the computational x-ray pulse shows a reasonable agreement with the experimental results. We also suggest that using alloyed wire-arrays can increase multi-keV K-shell yield by decreasing the opacity of K-shell lines. In addition, we use a detailed circuit model to study the energy coupling between the generator and the Z-pinch process. The Primary Test Stand (PTS) facility is the most powerful pulsed-power generator for Z pinch study in China. With the full circuit model and MHD model, the simulation of the propagation of electromagnetic wave pulse from the generator to the load is studied, the compression, amplification and the transmission of the pulse has been observed. The simulation results could show about the information of the pulse at some locations of the generator. As charged at a voltage of 60 kV, the PTS



facility delivers electrical pulse with power of 4TW and 880 ns rise time to the intermediate storage of 24 modules, then the pulse compressed and added to about 20 TW and 80 ns at the water/vacuum insulator stack, and the X-ray power about 50 TW with 4 ns pulse width is produced by a Z pinch load of tungsten wire array with 600  $\mu\text{g}/\text{cm}$  line mass and 8 MA load current.

Recently, we are concentrating on the problems of Z-pinch driven ICF, such as quasi-spherical wire-array implosions, dynamic hohlraum and capsule implosions.

### ВОЗМОЖНОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БЛИЖНЕГО ЭШЕЛОНА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ЗЕМЛИ

В. Г. Дегтярь, Г. Б. Позин, С. С. Саитгараев

Открытое акционерное общество «Государственный ракетный центр им. акад. В.П. Макеева», Миасс, Россия

Падение Челябинского метеорита 15 февраля 2013 года существенно изменило сложившиеся представления об опасных космических объектах в сторону «малых» космических тел, представляющих серьёзную опасность для жителей нашей планеты.

Такие относительно мелкие объекты чаще сталкиваются с Землёй, и большинство из них долго еще не удастся обнаруживать заблаговременно, их придется рассматривать как появляющиеся внезапно, особенно при их появлении со стороны Солнца [2].

Для борьбы с опасными космическими объектами представляется целесообразным создание трехэшелонной системы защиты Земли:

- дальнего эшелона для защиты от крупных долгопериодических комет и астероидов;
- среднего эшелона для защиты от короткопериодических комет и астероидов;
- ближнего эшелона для защиты от внезапно обнаруженных астероидов малых размеров (менее 100 метров).

Для перехвата ОКО дальнего и среднего эшелонов могут быть использованы ракеты-носители космического назначения большого и среднего классов типа «Союз», «Протон», «Ангара» и другие с использованием космических аппаратов: «Каисса» – для исследования астероидов путем доставки на них научной аппаратуры и «Капкан» – для непосредственного воздействия на ОКО с помощью кинетического проникателя или ядерного заряда [1].

Для ближнего эшелона, в условиях острого дефицита времени целесообразно использовать комплексы малого класса с ракетами, созданными на базе межконтинентальных баллистических ракет на высококипящих компонентах топлива, находящихся в режиме постоянного дежурства в течение длительного времени, вследствие минимального времени для их подготовки к пуску и высокой их тяговооруженности.

Для гарантированного обнаружения опасных объектов малых размеров и слежения за ними с любого направления представляется целесообразным создание

дополнительной системы раннего оперативного наблюдения, состоящей из двух космических оптических телескопов в точках либрации (точках Лагранжа)  $L_4$  и  $L_5$  орбиты Земли [3]. Такая система способна обнаруживать ОКО малых размеров на расстоянии 2–3 млн. км от Земли и передавать информацию о них глобальной системе слежения, размещаемой на поверхности Земли или в точках Лагранжа  $L_1$  и  $L_2$  орбиты Земли, для их идентификации и определения траекторных, массогабаритных и прочих параметров с высокой точностью для наведения перехватчиков.

Комплекс ближнего перехвата может быть использован также для воздействия на объекты более крупных размеров, а также для исследования многочисленных и разнообразных объектов, весьма часто пролетающих вблизи Земли на расстоянии до 1.2 млн. км.

#### Литература

1. Волков В. А., Дегтярь В. Г., Могиленко В. И., Сытый Г. Г. Универсальный космический аппарат для защиты Земли от астероидно-кометной опасности. Доклад представлен на 52-м Международном Астронавтическом конгрессе, г. Тулуза, Франция, октябрь 2001. Регистрационный номер IAF-01-C.2.06.
2. Шустов Б. М., Рыхлова Л. В. Астероидно-кометная опасность: новые подходы. Вестник российской академии наук. – 2009. – Т. 79, № 7. – С. 579–586.
3. Чубей М. С., «Орбитальная стереоскопическая обсерватория», Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, IV Международный специализированный Симпозиум «Космос и глобальная безопасность человечества», г. Евпатория, 2012.

### POSSIBILITIES OF THE ROCKET-SPACE COMPLEXES FOR BUILDING THE NEAR ECHELON OF THE EARTH PROTECTION SYSTEM

V. G. Degtyar, G. B. Pozin, S. S. Saitgaev

JSC “Makeev State rocket center”, Miass, Russia

Chelyabinsk meteorite falling on February 15, 2013 sufficiently changed the notion about the dangerous space objects in the direction of “small” celestial bodies that present serious danger for tellurians.

Such relatively small objects collide with the Earth, and the majority of them are not detected well in advance. They will be considered as objects appearing suddenly, especially when they come from the Sun side [2].

To control dangerous space objects, it is expedient to build three-echelon system of the Earth protection:

- far echelon (standoff approach) for protection against big long-period comets and asteroids;
- medium echelon for protection against short-period comets and asteroids;
- near echelon for protection against suddenly detected small-size asteroids (less than 100 meters).

In order to intercept near Earth object (NEO) of far and medium echelon, it is possible to use carrier rocket of a big and medium classes like “Soyuz”, “Proton”, “Angara” with space vehicles “Kaissa” to investigate asteroids by delivering scientific equipment on them and “Kapkan” – for direct impact on NEO with the help of kinetic penetration or nuclear charge [1].

For near echelon, in the conditions of a sharp lack of time, it is expedient to use complexes of a small class with the rockets, which were built on the basis of intercontinental ballistic rockets on high-boiling fuel components, and which are in the regime of constant manning with a long period of time due to minimum time for their preparation for launching and high power loading.

For secure detection of small NEOs and their tracking from any direction, it is expedient to build additional system of early rapid surveillance, which consists of two optical telescopes in the points of libration (Lagrange points)  $L_4$  and  $L_5$  of the Earth orbit [3]. Such system can detect small NEOs at a distance of 2–3 million km from the Earth and to transmit information about them to a global tracking system, which is located on the Earth surface or in Lagrange points  $L_1$  and  $L_2$ , for their identification and determination

of trajectory, mass-dimension and other parameters with high accuracy for interceptor guidance.

Complex of near interception can be used also for impacting the objects of bigger sizes and for investigation of multiple and various objects that rather often fly near the Earth at a distance up to 1.2 million km.

#### Reference

1. Volkov V. A., Degtyar V. G., Mogilenko V. I., Sytyi G.G. Universal space vehicle for the Earth protection against asteroids and comets. Presentation at 52-th International Astronautic Congress, Toulouse, France, October 2001.
2. Shustov B. M., Rykhlova L. V. Asteroid and comet danger: new approaches. RAS bulletin. – 2009. – V. 79, # 7. – P. 579–586.
3. Chubei M. S. “Orbital stereoscopic observatory”, Chief (Pulkovskaya) RAS astronomical observatory, IV International specialized Symposium “Space and global safety of mankind”, Yevpatoriya, 2012.

**Секция 1**

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

---

**Section 1**

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



## УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И НЕСФЕРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КОЛЛАПСЕ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

Р. И. Нигматулин<sup>1</sup>, А. А. Аганин<sup>2</sup>,  
М. А. Ильгамов<sup>3</sup>, Д. Ю. Топорков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН,  
Казань, Россия

<sup>3</sup> Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УНЦ РАН,  
Уфа, Россия

Рассматривается возможность достижения в пузырьках при их коллапсе сверхвысоких давлений, плотностей и температур. Можно выделить два режима сильного сжатия среды в пузырьке: безударный и ударно-волновой. Во втором режиме в финальной высокоскоростной стадии сжатия в полости пузырька возникает радиально сходящаяся ударная волна. В результате ее схождения и фокусировки значительно более сильному сжатию подвергается среда в центральной области пузырька. При этом достигаемые в пузырьке экстремальные давления, плотности и температуры оказываются намного выше, чем в безударном режиме. Выполнен анализ влияния физических характеристик среды в пузырьках на возникновение в них ударных волн. Проведено сравнение термодинамических параметров среды в кавитационных пузырьках в ацетоне и воде и роста малых возмущений их сферической формы при их сильном сжатии (давление жидкости 15 бар, температура 20°C, начальный радиус пузырька 500 мкм, пар в пузырьке – в состоянии насыщения).

1. Обнаружено, что при сжатии кавитационного пузырька в воде ударные волны в нем не возникают.

2. Показано, что для образования ударных волн в пузырьке более подходящими являются газовые среды с большой молекулярной массой  $M$  и малым показателем адиабаты  $\gamma$ . Поэтому для реализации ударно-волнового режима сжатия среды в пузырьке ацетон ( $M = 64$  г/моль,  $\gamma = 1,125$ ) значительно благоприятнее воды ( $M = 18$  г/моль,  $\gamma = 1,325$ ).

3. Установлено, что амплитуда возмущений сферичности кавитационного пузырька в ацетоне при его коллапсе может возрасти максимум в 130 раз, тогда как пузырька в воде многократно больше – до 1800 раз.

Таким образом, для реализации суперсжатия со-держимого кавитационного пузырька ацетон намного предпочтительнее воды.

## SHOCK WAVES AND NON-SPHERICAL EFFECTS AT COLLAPSE OF VAPOUR BUBBLES

R. I. Nigmatulin<sup>1</sup>, A. A. Aganin<sup>2</sup>,  
M. A. Ilgamov<sup>3</sup>, D. Yu. Toporkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> P. P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Mechanics and Engineering, KazSC, RAS,  
Kazan, Russia

<sup>3</sup> Institute of Mechanics, USC, RAS, Ufa, Russia

Possibility of attaining superhigh pressures, densities and temperatures in bubbles at their collapse is considered. Two regimes of strong compression of the medium inside a bubble are recognized: the shockless and shock-wave ones. In the second regime, a radially convergent shock wave arises in the bubble cavity in the final high-speed stage of its compression. Due to its convergence and focusing, the medium in the central part of the bubble undergoes much stronger compression. At that, the extreme pressures, densities and temperatures attained in the bubble turn out to be much higher than those achieved in the shockless regime. Analysis of influence of physical characteristics of the medium in bubbles on arising of shock waves inside the bubbles has been performed. Comparison of thermodynamic parameters of the medium in cavitation bubbles in liquid acetone and water as well as of growth of small perturbations of their spherical shape during their strong compression (the pressure of the liquid being 15 bar, its temperature 20°C, initial radius of the bubble 500  $\mu\text{m}$ , the vapor in the bubble is in saturation state) has been made.

1. It has been found that during compression of a cavitation bubble in water the shock waves inside the bubble do not arise.

2. It has been shown that more suitable for the shock wave formation inside a bubble are those gas media which have large molecular mass  $M$  and small specific heat ratio  $\gamma$ . Therefore for realizing shock-wave compression of medium in a cavitation bubble, acetone ( $M = 64$  g/mol,  $\gamma = 1.125$ ) is significantly more favorable than water ( $M = 18$  g/mol,  $\gamma = 1.325$ ).

3. It has been revealed that the amplitude of disturbances of sphericity of cavitation bubble during its collapse in acetone can increase at most by 130 times while its growth for the bubble in water can be much larger – by 1800 times.

Thus, for realizing supercompression of cavitation bubble content, acetone is much more preferable than water.

## О ВЗРЫВНЫХ И ЭВОЛЮЦИОННЫХ ГИПОТЕЗАХ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЛУНЫ

В. Ф. Анисичкин, А. П. Ершов

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

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Гипотезы, согласно которым Земля и Луна образовались из одного газопылевого диска, прилетающая извне Луна была захвачена Землей или Луна отделилась

от быстро вращающейся Земли, не объясняют особенности состава Земли и Луны. Поэтому более популярна гипотеза мегаимпакта, по которой система Земля–Луна образовалась в результате столкновения двух планет.

Результаты моделирования показали, что скользящий удар по Земле другой планеты объясняет размеры и кинематические параметры системы Земля–Луна. При этом Луна образуется в основном из материала ударника. Однако лунные породы по изотопному составу идентичны земным, для чего необходимо полное перемешивание вещества соударяющихся тел. В качестве «решения» проблемы предполагают, например, что ударник имел такой же изотопный состав, что и Земля. Для проверки этой идеи предлагается доставить образцы породы, например с планеты Венера. Если изотопный состав Венеры окажется аналогичным, то можно будет допустить образование ударника в области между Землей и Венерой. Но это маловероятно, так как марсианские породы и выпадающие на Землю метеориты имеют совершенно другой изотопный состав.

Отмеченные трудности моделей мегаимпактов требуют развития альтернативных гипотез. Наша гипотеза предполагает концентрацию актиноидов глубоко в недрах Земли. Миллиарды лет назад в составе Земли короткоживущих легко делящихся изотопов было существенно больше, что могло привести к ядерному взрыву и выбросу части каменной оболочки быстро вращающейся планеты на орбиту (Анисичкин, 1997). Концентрация актиноидов в недрах Земли и цепные ядерные реакции в природе обнаружены и обсуждаются достаточно давно (например, Kuroda, 1956; Driscoll, 1988; Hollenbach and Herndon, 2001; Ершов и Анисичкин, 2003), но без связи с взрывным выбросом Луны.

Оценки показывают, что фундаментальных запретов взрывного выброса Луны в настоящий момент не просматривается. Однако проверить концепцию выброса с последующим формированием на орбите крупного спутника можно только детальным численным моделированием.

## EXPLOSION AND EVOLUTIONAL HYPOTHESES OF THE MOON ORIGIN

V. F. Anisichkin, A. P. Ershov

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Hypotheses which consider the formation of both Moon and Earth from the common gas-dust disc, or the Moon was captured during the flyby, or the Moon was separated from the fast-rotating Earth, cannot explain the peculiarities of the Moon and Earth composition. Lately the mega-impact concept became popular in which the Moon-Earth system is a result of collision of two planets.

Simulations demonstrate that the oblique impact could produce the sizes and kinematics of the Moon-Earth system. Note that the Moon consists mainly from the impactor material. However the isotope composition of the lunar rocks is identical to that of Earth, which requires total mixing of the colliding bodies. As a «solution» of this problem the impac-

tor of the Earth-like composition is assumed. To prove this idea, expedition for rock samples from Venus was proposed. If the isotope composition of Venus will be the same, one can accept that the impactor originated from somewhere between the Earth and Venus. This hardly seems probable since the Martian rocks and meteorites have quite different isotope composition.

Difficulties of the impact models call to search of alternatives. Our hypothesis assumes accumulation of the actinides in the deep Earth's interior. Billions years ago the percent of fissionable isotopes was much higher which could lead to the nuclear explosion and ejection of some part of the rock envelope of the fast-rotating planet to the orbit (Anisichkin, 1997). Concentration of the actinides in the depths and natural chain fission reactions were found and discussed for a long time (e.g. Kuroda, 1956; Driscoll, 1988; Hollenbach & Herndon, 2001; Ershov & Anisichkin, 2003), but not in connection with explosive formation of the Moon.

Our estimates show that no fundamental reasons excluding the explosion formation of the Moon are in sight. At the same time, only detailed numerical simulations can test the concept.

1-3

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, СОЗДАВАЕМЫЕ ПАДЕНИЯМИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМЕТ НА ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

А. А. Баренбаум

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

E-mail: azary@mail.ru

С привлечением разработанной автором теоретической модели анализируются геологические образования, которые могут возникать при падениях галактических комет на планеты земной группы: Меркурий, Марс, Землю, Венеру, а также Луну. Модель предсказывает, что в зависимости от сочетания ряда физических факторов галактические кометы могут создавать на поверхности этих планет следующие геологические структуры: кратеры, диатремы, лавовые покровы, вулканические конуса, куполовидные поднятия поверхности, а также короны и монсы (на Венере). Главными факторами, определяющими возникновение той или иной структуры, являются: 1) наличие или отсутствие у планеты газовой оболочки; 2) плотность газовой оболочки; 3) толщина планетной литосферы; 4) состав литосферных пород и степень их нагрева; 5) частота падений и энергия галактических комет. На конкретных примерах обсуждаются особенности образования этих структур на Луне, Марсе, Земле и Венере.

## GEOLOGICAL STRUCTURES CREATED BY DOWNS GALACTIC COMETS ON THE TERRESTRIAL PLANETS

A. A. Barenbaum

Oil and Gas Research Institute RAS (OGRI RAS),  
Moscow, Russia

E-mail: azary@mail.ru

With the use of the theoretical model developed by the author are analyzed the geological structures that can arise in result fall galactic comets on the surface terrestrial planets: Mercury, Mars, Earth, Venus and the Moon. The model predicts that depending on the combination of a number of physical factors the galactic comets are capable create on these planets following geological structures: craters, diatremes, lava sheets, volcanic cones, uplifts of surface dome-shaped form, as well as coronae and montes (on Venus). The main factors of formation such structures are: 1) the presence or absence of gaseous envelope at the planet, 2) density of the gaseous envelope, 3) the thickness of planet's lithosphere, 4) the composition of lithosphere rocks and the degree of their heating, 5) frequency of falls and energy of galactic comets. The features of these structures on the Moon, Mars, Earth and Venus we discuss on specific examples.

1-4

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ, ВЫЗВАННОЙ ДЕЙСТВИЕМ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ – ТЭЙЛОРА, ПРИ НАРАСТАЮЩЕМ УСКОРЕНИИ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ

И. Л. Бугаенко, А. В. Павленко,

А. А. Тяктев, С. С. Мокрушин

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

E-mail: ivan.lucky-13@yandex.ru

Представлены результаты измерения ширины зоны турбулентного перемешивания двух несмешивающихся жидкостей, вызванной действием неустойчивости Рэля–Тэйлора. В экспериментах использовалась пара жидкостей вода/бензин с отношением плотностей  $n=1,5$ . На неустойчивой стадии система исследуемых сред двигалась с нарастающим ускорением контактной границы близким по профилю к экспоненциальному. Максимальное ускорение достигало  $1000g$  ( $g$  – ускорение поля тяжести Земли), а максимальный путь ускорения – 385 мм. Исследования проведены с использованием лазерно-интерферометрического метода PDV, регистрирующего скорость движения исследуемой системы и теневого метода цифровой фоторегистрации зоны турбулентного перемешивания.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE TURBULENT MIXING ZONE DEVELOPMENT DUE TO RAYLEIGH–TAYLOR INSTABILITY AT PROGRESSIVE ACCELERATION OF THE CONTACT BOUNDARY

I. L. Bugaenko, A. V. Pavlenko,

A. A. Tyaktev, S. S. Mokrushin

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

E-mail: ivan.lucky-13@yandex.ru

The paper presents results of turbulent mixing zone width measurements made with two immiscible fluids when turbulent mixing is induced by the Rayleigh-Taylor instability. Two fluids, i.e. water and gasoline with the density ratio  $n = 1.5$ , were used in experiments. In the unstable phase, the system of the test media moved with progressive acceleration of the contact boundary and the acceleration profile was “near-exponential”. The maximum acceleration made  $1000g$  ( $g$  is the Earth gravitational field) and the maximum acceleration path was 385 mm. In experiments, the PDV laser interferometry was used to register the test media velocity and the shadow registration method to perform digital photorecording of the turbulent mixing zone.

1-5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРЕГРАДОЙ

А. В. Герасимов

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

E-mail: niipmm@mail.tomsknet.ru

Создание надежной системы поражения преград диктует необходимость исследования различных способов взаимодействия высокоскоростных ударников с защищаемыми объектами. В работе рассматривается взаимодействие группы ударников различной формы с системой пластин.

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 разрушения твердых тел используется модель сжимаемого идеально упругопластического тела [1]. В качестве критерия разрушения – достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения. Влияние начальных неоднородностей структуры материала учитывается вероятностным распределением критерия разрушения по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных

чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения [2]. Для численных расчетов предлагается методика, базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса для расчета внутренних точек тела и метода 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.

Были проведены расчеты воздействия на преграду группой ударников с плоскими носовыми частями. Ударники из вольфрамового сплава металлись со скоростью 1000 м/с по системе, состоящей из двух стальных пластин. Диаметр пластин 35 см, толщина первой пластины 7 см, второй – 3 см. Размеры ударника: диаметр 3 см, длина 15 см. Количество ударников – 7. Один ударник размещался в центре, остальные шесть равномерно по окружности. Расстояние между центром первого ударника и центрами остальных  $R$  в ходе расчетов варьировалось. Результаты численных экспериментов позволили определить наилучшую конфигурацию системы ударников для пробития первой преграды и разрушения второй.

В работе приведено сравнение эффективности воздействия группы ударников и дана оценка их влияния на степень поражения преград. Увеличение радиуса  $R$  от 5 до 9 см приводит к увеличению выбиваемого объема первой преграды, но к падению его скорости. Если при  $R = 5$  см происходит пробитие и второй преграды, то для  $R = 8$  см и  $R = 9$  см этого не наблюдается. При  $R = 10$  см происходит только частичное проникание ударников в первую преграду и не наблюдается в полной мере эффекта коллективного воздействия группы элементов на данную преграду. Первая преграда выпучивается в направлении второй, но не пробита и полностью не разрушена, однако в ней наблюдается формирование трещины в окружном направлении.

### Литература

1. Баум Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. И. Шехтер. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
2. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А. В. Герасимова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 572 с.

### MODELING INTERACTION OF GROUPS OF ELEMENTS WITH TARGET

A. V. Gerasimov

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics  
Tomsk State University, Tomsk, Russia  
E-mail: niipmm@mail.tomsknet.ru

Creation a reliable system defeat necessitates the study of different ways of interaction of high-speed projectiles with securable objects. We consider the interaction of group of projectiles of various shapes with the system plates.

The problem is solved in a three-dimensional formulation based on the natural heterogeneity of the material struc-

ture, affecting the distribution of the strength characteristics of the volume of the body and is one of the factors influencing the fracture behavior of the latter. Consideration of this factor in the equations of solid mechanics is implemented using probabilistic distribution laws in terms of the strength characteristics of the object.

To describe the processes of deformation and fracture of solids used model of a compressible ideal elastoplastic body [1]. As failure criterion – achieving equivalent plastic strain its limit. Influence of the initial structure of the material inhomogeneities considered the probability distribution of fracture criterion in cells of the computational domain using a modified random number generator issuing random variable subject to the law of the chosen distribution [2]. For numerical calculations proposed methodology based on the combined use of the method for calculation of internal Wilkins body points and Johnson method for calculating contact interactions. For modeling the fragmentation process in the strength characteristics of the body is brought initial random distribution of the deviations from the nominal values of the properties, namely, varies the limiting value of the equivalent plastic strain the.

Calculations were carried out on the impact of the barrier band projectiles with flat noses. Strikers of tungsten alloy thrower with a speed of 1000 m/s for a system consisting of two steel plates, the thickness of the first plate of 7 cm, and the second – 3 cm. Dimensions impactor: diameter 3 cm, length 15 cm. Quantity of projectiles – 7. One is located in the center, the other six circumferentially uniformly. The distance between the center of the first projectile and other centers of  $R$  in the calculations varied. The results of numerical experiments have allowed determining the best system configuration for projectiles breakout first barrier and the destruction of second barrier.

The paper compares the effectiveness and impact of projectiles group and the evaluation of their impact on the degree of defeat obstacles. Increase of the radius  $R$  of 5 cm to 9 cm leads to an increase in the ejected amount of the first barrier, but its speed to drop. When  $R = 5$  cm and the penetration second obstacles occurs, then  $R = 8$  cm,  $R = 9$  cm not observed. When  $R = 10$  cm only partial penetration of projectiles occurs in the first barrier and not fully observed effect collective impact group of element on obstacle. The first barrier deformed toward the second barrier, not punctured, not completely destroyed, but it is observed the formation of cracks in the circumferential direction.

### References

1. F. A. Baum Explosion physics / F. A. Baum, L. P. Orlenko, K. P. Stanyukovich, V. P. Chelyshev, B. I. Shehter. – M.: Nauka, 1975. – 704 p.
2. Theoretical and experimental studies of the high-velocity interaction of bodies / Ed. A. V. Gerasimov. – Tomsk Univ. University Press, 2007. – 572 p.



1-6

## МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В СВЕРХНОВЫХ ТИПА IA

С. И. Глазырин

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

E-mail: glazyrin@itep.ru

Природа сверхновых типа Ia – мощных вспышек во Вселенной непонята до сих пор. Эти объекты обладают рядом замечательных свойств, которые позволяют использовать их как индикаторы космологических расстояний и, соответственно, для изучения Вселенной в космологических масштабах. Согласно одному из наиболее популярных сценариев взрыва, «одновырожденному», он происходит за счет термоядерного прогорания вырожденной звезды – белого карлика с массой около чандрасекаровского предела. Для описания наблюдаемых данных в этом сценарии необходима последовательная реализация двух режимов горения: дефлаграции и детонации. Основная проблема связана с поиском механизма перехода одного режима в другой. В последнее время преобладает идея, что за этот переход ответственна возникающая в звезде турбулентность. В докладе будет представлена модель, основанная на модели k-epsilon, и позволяющая рассчитывать как возникновение турбулентности за счет неустойчивостей, так и ее эволюцию. Будут представлены расчеты горения белого карлика с использованием этой модели и вычислена возникающая в нем турбулентность.

## TURBULENCE MODEL FOR FLAME PROPAGATION IN SUPERNOVAE IA

S. I. Glazyrin

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

E-mail: glazyrin@itep.ru

The origin of supernovae Ia – powerful astrophysical flashes is still unknown. These objects have some remarkable properties that allow to use them as indicators of cosmological distances, and respectively to study the Universe on cosmological scales. According to one of the popular scenarios, “semi-degenerate”, the explosion occurs as a result of burning of a degenerate star, white dwarf with mass close to Chandrasekhar limit. To meet observations the burning should consist of two sequential regimes: deflagration and detonation. The physical problem in SNIa is in unknown mechanism of deflagration to detonation transition. Recently the idea of transition due to turbulence is actively explored. The model for turbulent flame propagation in SNIa will be presented in the talk. This model is based on k-epsilon model and takes into account turbulence generation by instabilities, its evolution and influence on the flame. The simulations of the white dwarf burning will be presented, the turbulence that appears will be calculated.

1-7

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПРОЧНОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КУБИЧЕСКОГО УДАРНИКА НА ПРОЦЕСС ЕГО ПРОНИКАНИЯ В НИЗКОПРОЧНУЮ ПРЕГРАДУ

В. К. Голубев

Мюнхенский университет Людвиг-Максимилиана,  
Мюнхен, Германия

E-mail: vlgoch@cup.uni-muenchen.de

Значительное число экспериментальных и расчетных исследований посвящено вопросам проникания высокоскоростных ударников в различные преграды. Основными определяющими факторами этого процесса являются скорость удара, плотность и механические свойства материалов ударника и нагружаемой преграды, форма ударника и угол его встречи с плоской поверхностью преграды. Наряду с этими основными факторами имеется еще целый ряд факторов, которые также могут оказывать весьма существенное влияние на динамику и конечный результат процесса проникания. К таким факторам относится, например, ориентация ударника конкретной геометрии в момент его соударения с преградой. Определенный интерес представляет задача о проникании прочного стального ударника кубической формы в преграду из низкопрочного полимерного или композитного материала в диапазоне скоростей от 300 до 2000 м/с. В этом диапазоне происходит переход от аэродинамической схемы проникания, когда ударник практически остается недеформируемым, к переходной схеме, когда деформация ударника начинает влиять на процесс проникания. Исходная ориентация ударника и возможность ее некоторого изменения в процессе достаточно глубокого проникания усложняют задачу и требуют ее более детального расчетного анализа.

Результаты трехмерных расчетов по внедрению кубического ударника из прочной стали S-7 с ребром 13,5 мм в преграду из тефлона получены по программе ANSYS Autodyn. Преграда считалась полубесконечной в направлении удара, ее продольные и поперечные размеры выбирались на основании предварительных двумерных расчетов по прониканию в нее цилиндрических ударников в условиях осевой симметрии и стержневых ударников с квадратным сечением в условиях плоской симметрии. На боковую и тыльную поверхности преграды накладывались прозрачные граничные условия. В этих же расчетах проводилась оптимизация параметров используемой лагранжевой сетки. В качестве трех основных, симметричных относительно нормали к поверхности преграды ориентаций кубического ударника являлись таковые, когда удар наносился гранью, ребром и углом куба. Для полноты анализа рассматривался также ряд промежуточных несимметричных исходных ориентаций. Уравнения состояния в форме Ми-Грюнайзена и прочностные свойства материалов ударника и преграды брались из библиотеки программы. Для более полного анализа явления проводились также расчеты, в которых ударник рассматривался как жесткое недеформируемое тело. В результате получен и проанализирован

большой объем информации по влиянию скорости удара, ориентации ударника и его прочности на процесс проникания в низкопрочную преграду.

**INFLUENCE OF SPATIAL ORIENTATION  
OF SOLID HIGH-SPEED CUBIC STRIKER  
ON ITS PENETRATION INTO LOW-STRENGTH  
BARRIER**

V. K. Golubev

Ludwig-Maximilians-Universität München, Munich, Germany

Significant number of experimental and numerical studies concerns high-speed strikers penetration into various barriers. The key aspects of this process are striker velocity, density, and mechanical properties of striker and loading barrier, striker shape, and impact angle between the striker and the barrier. Along with these main aspects there is the whole series of aspects which can significantly affect the dynamics and results of penetration. Among such factors is spatial orientation of the striker of specified configuration at the moment of collision with the barrier. Of certain interest is the problem of penetration of solid steel striker of cubic shape into the barrier of low-strength polymeric or composite material in the range of velocities from 300 to 2000 m/s. In this range transition occurs from aerodynamic scheme of penetration, when the striker remains almost warp-free, to transitional scheme, when the striker deformation begins to influence the penetration process. Initial spatial orientation of the striker and possibility of its variation to certain extent during deep penetration make the problem more complicated and demand more detailed numerical analysis.

ANSYS Autodyn code was used to obtain 3-D computation results of penetration of cubic striker made of solid steel S-7 with 13.5 mm edge into the teflon barrier. The barrier was considered to be semi-infinite along the penetration direction, its longitudinal and lateral dimensions were chosen on the basis of preliminary 2-D calculations of cylindrical strikers penetration in axial symmetric conditions and rod strikers with square cross-section in planar symmetric conditions. Transparent boundary conditions were used for side and rear surfaces of the barrier. Parameters optimization of the used Lagrangian grid was performed in the same calculations. The three main spatial orientations, symmetric about the normal to the barrier surface, were when the cubic striker hit the barrier surface with the facet, edge, and corner. For the analysis to be full, we consider several initial asymmetric orientations. Equations of state in the form of Mie-Grüneisen and mechanical characteristics of the materials for the striker and barrier were taken from the code library. To analyze the phenomenon more fully the calculations were made, where the striker was treated as solid warp-free body. As a result, large piece of information is obtained and analyzed, concerning the influence of strike speed, striker spatial orientation, and its durability on penetration into a low-strength barrier.

1-8

**НЕУСТОЙЧИВОСТЬ  
ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА.  
НЕКОТОРЫЕ ИНТЕРЕСНЫЕ ДЕТАЛИ**

М. Б. Голубев

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

Неустойчивость тангенциального разрыва – давно разрешенная классическая проблема гидродинамики. Однако область применимости линейного приближения теории возмущений для этой задачи обычно не обсуждается. Корректный анализ показывает, что амплитуда возмущений, при которых можно не учитывать высшие порядки теории возмущений, равна нулю.

**INSTABILITY OF TANGENTIAL DISCONTINUITY.  
SOME INTERESTING DETAILS**

M. B. Golubev

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

Instability of tangential discontinuity is long ago solved classical problem of hydrodynamics. However the domain of applicability for linear approximation of disturbances theory is usually not discussed for this problem. Correct analysis shows that amplitude of disturbances when one can neglect highest orders of disturbances theory is equal to zero.

1-9

**ЭВОЛЮЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ  
В СЛОИСТЫХ СИСТЕМАХ**

К. Е. Городничев, С. Е. Куратов, С. А. Сережкин

Всероссийский научно-исследовательский институт  
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия  
E-mail: cyrgo85@gmail.com

Проведено рассмотрение эволюции двухмерных возмущений при прохождении УВ по среде, содержащей энтропийные неоднородности плотности, с использованием второго порядка разложения по малому возмущению включительно. Как показано в статье [1], в этом случае в зафронтальной области будут распространяться звуковые и энтропийно-вихревые волны. В работе [2], используя разложение до первого порядка теории возмущений, показано существование трех типов решений в зависимости от соотношения проекций волнового вектора начальных возмущений. Отметим, что при рассмотрении второго порядка решение представимо в виде совокупности решений, соответствующих взаимодействию звуковых волн между собой; звуковых волн с энтропийно-вихревыми и энтропийно-вихревых между собой. При учете нелинейных эффектов появля-

ется поправка к волновому вектору и частоте звуковой волны, найденной в линейном случае.

В данной работе приведены результаты рассмотрения возмущения границы контактного разрыва, найдена скорость роста амплитуды ее колебаний. Проведено сравнение со случаем неустойчивости Рихтмайера–Мешкова.

Для подтверждения результатов теоретического анализа проводились вычисления при помощи программного комплекса TIS, разрабатываемого во ВНИИА им. Н. Л. Духова. Наблюдается качественное и количественно совпадение.

### Литература

1. Дьяков С. П. Об устойчивости ударных волн // ЖЭТФ. – 1954. – Т. 27, №3(9). – С. 288–295.
2. Городничев К. Е., Куратов С. Е. Развитие возмущений в системе сталкивающихся пластин // ВАНТ, сер. Мат. моделирование физ. процессов. – 2013. – № 2. – С. 37–47.

### EVOLUTION OF DISTURBANCES IN LAYERED SYSTEMS

K. E. Gorodnichev, S. E. Kuratov, S. A. Serezhkin

Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: cyrgo85@gmail.com

We have considered evolution of 2D disturbances occurring at shock-wave passage through the medium having entropy-related irregularities of density using the second order expansion, including in small disturbance. As shown in paper [1] in this case sound and entropy-vortex waves will propagate in the region behind the front. Paper [2], using expansion of disturbances theory to the first order demonstrates existence of three types of solutions depending on relationship of projections of initial disturbances wave vector. Note that while discussing the second order the solution can be presented as a set of solutions corresponding to interaction sound waves, sound waves with entropy-vortex and entropy-vortex in any combination. Correction to wave vector and frequency of sound wave found in linear case do appear when non-linear are taken into account.

This study discusses results of consideration of contact discontinuity disturbance, rate of its oscillations amplitude growth is found. This case is compared with Richtmeyer-Meshkov instability.

The problem was computed with the help of TIS code developed at Dukhov Research Institute of Automatics to validate the results of theoretical analysis. Qualitative and quantitative agreement is observed.

### References

1. Dyakov S. P. About stability of shock waves // JETF. – 1954. – Vol. 27, No 3(9). – P. 288–295. (in Russian)
2. Gorodnichev K. E., Kuratov S. E., Development of disturbances in the system of colliding plates // VANT, Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. – 2013. – No 2. – P. 37–47 (in Russian)

1-10

### РАЗРУШЕНИЕ МЕТЕОРОИДОВ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ

В. И. Гроховский

Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: grokh47@mail.ru

Исследования структуры и свойств вещества внеземного происхождения (метеориты, грунт Луны и астероидов) в последнее время принимают особую актуальность в связи с осознанием кометно-астероидной опасности для Земли и изысканием возможностей ее предотвращения. Кроме того, характер разрушений при высокоскоростных соударениях и фрагментации тел в космосе и в атмосфере Земли, образовании кратеров на планетах и малых телах Солнечной системы определяется, прежде всего, физико-механическими свойствами вещества метеороидов.

В обзорном докладе приводятся основные результаты изучения вещества метеорита «Челябинск» различными аналитическими методами с позиций современного состояния метеоритики. Особенностью строения метеорита «Челябинск» LL5 является сосуществование нескольких литологий, связанных с разной степенью ударного метаморфизма в его космической предыстории. Яркий необычный характер разрушения и фрагментации метеорного тела «Челябинск» с большим количеством индивидуальных фрагментов обусловлен, прежде всего, его структурой на макро-, мезо- и микроуровнях, а также очень низкими значениями прочностных характеристик.

Микроструктура метеоритов весьма разнообразна даже в пределах одного типа и определяет характер разрушения при динамическом нагружении. Численные данные о характеристиках прочности и трещиностойкости, полученные на веществе метеоритов в соответствии с требованиями механики разрушения, весьма ограничены. В докладе обобщены результаты таких испытаний метеоритного вещества различного химического и структурного состава при статическом и динамическом нагружении и фрактографические особенности строения поверхностей разрушения. Наиболее высокий уровень механических характеристик при ударных испытаниях наблюдаются у атакситов, структура которых представлена смесью субмикроскопических фаз.

### THE FAILURE OF METEOROIDS WITH DIFFERENT COMPOSITION AND STRUCTURE

V. I. Grokhovsky

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

E-mail: grokh47@mail.ru

Research of extraterrestrial material (meteorites, regolith of asteroids and lunar soil) properties and internal structure is highly relevant for the asteroid and comet collision risk evaluation and mitigation. Physical and mechanical

properties of meteoroids material influence not only the way how they fracture during space collisions or high velocity atmospheric entry, but they also influence the formation of craters on a surface of planets and minor bodies of the Solar System.

LL5 Chelyabinsk meteorite structure contains several lithologies influenced by different degrees of impact metamorphism in its space history. Bright and unusual character of fracture and fragmentation of Chelyabinsk meteoritic body is determined by its structure in macro-, meso- and microscales and a very low mechanical strength.

Meteoritic microstructure is vary considerably even within one type of meteorites. Structure determines character of fracture in the case of dynamic loading. There are very limited data about mechanical properties and behavior of meteorites under loading. Mechanical test results of meteorites which have different compositions and structures are summarized in this report. The fracture surface analyses have been compared. The highest values of impact strength were obtained for ataxites with submicroscopical structures.

---

1-11

### СПОСОБЫ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОПАСНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Д. А. Грязных, В. А. Симоненко,  
В. П. Елсуков, С. Н. Лебедев, И. А. Литвиненко

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

E-mail: d.a.gryaznykh@vniitf.ru

В докладе описаны результаты исследования воздействия ядерных взрывов на опасные космические объекты (ОКО) с помощью различных численных методик. Технологии таких расчетов развиваются во ВНИИТФ более 20 лет. Рассматриваются следующие варианты подрыва ядерного устройства: 1) на поверхности ОКО, 2) заглубленный или 3) приподнятый. Передача энергии от взрыва к ОКО происходит через тепловые и/или ударные волны. При этом часть вещества ОКО выбрасывается с его поверхности, что приводит к передаче объекту импульса и его отклонению. Ударные волны и волны разрежения могут привести к его расколу на несколько фрагментов или полному диспергированию.

Взрыв ядерного устройства с энерговыделением порядка 1 Мт вблизи или на поверхности ОКО диаметром  $D < 600$  м за счет выброса вещества способен отклонить его на безопасное расстояние за время порядка периода его обращения. Каменный объект  $D < 1000$  м может быть разрушен одним или несколькими взрывами с энерговыделением 0,1–10 Мт. Выбор конкретного сценария воздействия на ОКО связан с тем, за какое время до столкновения объект будет обнаружен и определен как опасный.

### METHODS OF SHOCK IMPACT ON HAZARDOUS NEAR-EARTH OBJECTS

D. A. Gryaznykh, V. A. Simonenko,  
V. P. Elsukov, S. N. Lebedev, I. A. Litvinenko

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

E-mail: d.a.gryaznykh@vniitf.ru

We describe results of investigations of nuclear explosions impacts on hazardous near-Earth objects (HNEO) using different numerical methods. Techniques of such simulations are developed in VNIITF for more than 20 years. Different scenarios of nuclear device explosion are studied: 1) contact (on the surface of a HNEO), 2) penetrated, or 3) stand-off. Energy is transferred from the explosion to the HNEO by thermal and/or shock waves. A fraction of HNEO matter is ejected from its surface, leading to transfer of momentum to the object and its deflection. Shock and rarefaction waves can lead to its fragmentation or complete dispersion.

Explosion of a nuclear device with energy release of the order of 1 Mt near HNEO with diameter  $D < 600$  m or on its surface can deflect it to a safe distance from the Earth due to ejection of its matter during its revolution period. Stone object with  $D < 1000$  m can be disrupted by single or several explosions with energy release about 0.1–10 Mt. Specific scenario of nuclear devices impact on a HNEO is determined by a time interval before collision, when the object is discovered and determined as hazardous.

---

1-12

### ЛАМИНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ПРОСТЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ

В. А. Демин, Е. А. Попов

Пермский государственный национальный  
исследовательский университет, Пермь, Россия

E-mail: demin@psu.ru

Процессы перемешивания неоднородных по составу или температуре жидкостей в первую очередь представляют интерес с точки зрения реализации различных технологических процессов. Гомогенизация среды наиболее интенсивно идет на фоне развитой турбулентности, однако, как показывают расчеты и это подтверждают эксперименты, даже ламинарные колебательные конвективные режимы позволяют определенным образом управлять данными процессами.

Примером полости для контролируемого перемешивания жидкости является тонкий слой в форме прямоугольного параллелепипеда. Если условия подогрева таковы, что в жидкости реализуется двумерное движение в плоскости широких граней, то полость называется ячейкой Хеле–Шоу. При подогреве снизу, определенных тепловых условиях на границах и соотношении сторон широких граней в ячейке Хеле–Шоу возникают специфические колебательные режимы, способствующие активному перемешиванию жидкости [1]. Указанные колебательные режимы существуют при

малых значениях надкритичности и не требуют серьезных энергозатрат. Небольшое продвижение вверх по числу Рэлея приводит к определенной хаотизации этих колебательных течений, в тоже время до режима турбулентности еще далеко. Хаотизация свидетельствует о наличии странных аттракторов в указанной области параметров.

Движение в рассматриваемой тонкой полости не обязательно оказывается двумерным. Так, в изотермической, но неоднородной по составу жидкости возможны трехмерные конвективные движения даже пограничного характера [2].

Помимо прямого перемешивания чрезвычайно востребованным оказывается обратный процесс разделения смесей на компоненты. Механизмы разделения весьма разнообразны и применимы, как правило, только в определенных условиях. Для газов в основе методики разделения могут лежать термо- или фотофорез, для магниточувствительных сред – магнитофорез. Применительно к молекулярным многокомпонентным жидким смесям или газам для разделения их на компоненты чаще всего используется явление термодиффузии. В [3] проведено прямое численное моделирование процесса разделения водных растворов солей, характеризующихся положительной термодиффузией, в тонком наклонном слое жидкости при подогреве сверху. Подтвержден эффект максимального разделения указанных смесей при больших углах наклона относительно вертикали на фоне стационарного крупномасштабного ползущего течения.

Работа поддержана грантом РФФИ в рамках регионального конкурса инициативных проектов «Урал-а». Код проекта 13-01-96010.

### Литература

1. Бабушкин И. А., Глазкин И. В., Демин В. А., Платонова А. Н., Путин Г. Ф. Об изменчивости одного типичного течения в ячейке Хеле-Шоу // Изв. РАН, МЖГ. – 2009. – № 5. – С. 3–14.
2. Демин В. А., Костарев К. Г., Мизев А. И., Мошева Е. А., Попов Е. А. О конвективной неустойчивости встречных потоков двух взаиморастворимых жидкостей // Нелинейная динамика. 2014 (принята к печати).
3. Демин В. А. Конвективные сепараторы // Прикладная физика. – 2013. – № 4. – С. 60–67.

### LAMINAR MODES OF MIXING IN SIMPLE CONVECTIVE SCHEMES

В. А. Демин, Е. А. Попов

Perm State National Research University, Perm, Russia

E-mail: demin@psu.ru

Processes of missing of liquids inhomogeneous in terms of composition or temperature are interesting first of all from the viewpoint of various technological processes. Homogenization of medium transpires most intensively at the background of well-developed turbulence, however as shown by calculations and confirmed by experiments even laminar oscillating convective modes allow governing these process in some way.

Thin layer as rectangular parallelepiped is an example of cavity for controlled mixing of liquid. If conditions of heating are such that 2D motion in the plane of wide facets

takes place, the cavity is called Hele–Shaw cell. When heated up from below and at specific heat-related conditions and ratio of wide facets specific oscillation modes arise in Hele–Shaw cell and these modes contribute to active mixing of liquid [1]. These oscillation modes exist at low values of supercriticality and do not require high energy input. Small increase of Raleigh number leads to some chaotization of this oscillating flows however turbulence mode is still far away. Chaotization is an evidence of strange attractors presence in this range of parameters.

Motion in considered thin cavity is not necessarily 2D. So in isothermal liquid but inhomogeneous in terms of composition 3D convective motions are possible and they have the nature of boundary layer motion [2].

Inverse process of mixtures separation in components is highly demanded as well as direct mixing process. Separation mechanisms are quite diverse and are applicable only in specific conditions. Separation technique may be based on thermo- or photophoresis for gases and magnetophoresis may be applied for magnetically susceptible media. Thermal diffusion is most frequently used for separation of molecular multi-component liquid mixtures and gases. Paper [3] describes direct numerical simulation of separation of water solution of salts, characterized by positive thermal diffusion in thin oblique layer of liquid at heating from above. Effect of maximum separation of these liquids at large angles of inclination w.r.t. to normal at the background of stationary large-scale creeping flow was confirmed.

This study was supported by RFBR grant within the regional contest “Ural-a”. Project code is 13-01-96010.

### References

1. Babushkin I. A., Glazkin I. V., Demin V. A., Platonova A. N., Putin G. F. About variability of one typical flow in Hele-Shaw cell // Izvestia RAN, MZhG. – 2009. – No 5. – P. 3–14. (in Russian)
2. Demin V. A., Kostarev K. G., Mizev A. I., Mosheva E. A., Popov E. A. About convective instability of counter flows of two mutually soluble liquids // Nelineynaya mekhanika. 2014 (in print) (in Russian)
3. Demin V. A. Convective separators // Prikladnaya physica. – 2013. – No 4. – P. 60–67. (in Russian)

1-13

### ЧЕЛЯБИНСКИЙ БОЛИД И МЕТЕОРИТ «ЧЕЛЯБИНСК»

А. Е. Дудоров<sup>1,\*</sup>, Д. Д. Бадюков<sup>2</sup>, Н. Н. Горькавый<sup>1,3</sup>,  
О. В. Еретнова<sup>1</sup>, С. Н. Замоздра<sup>1</sup>, А. Е. Майер<sup>1</sup>,  
С. В. Таскаев<sup>1</sup>, В. А. Тюменцев<sup>1</sup>, С. А. Хайбрахманов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Челябинский государственный университет,  
Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Институт геохимии и аналитической химии  
им. В. И. Вернадского РАН, Россия

<sup>3</sup>Science Systems and Applications, Inc., Lanham,  
Maryland, USA

\*E-mail: dudorov@csu.ru

Представлены результаты исследования метеорита «Челябинск». Анализ видеозаписей показывает, что высота зоны начала регистрации болида – 97 км, начала

первой вспышки – 45 км, максимума основной вспышки – 34 км, окончания регистрации – 17 км. Эпицентр основной вспышки находился в нескольких километрах к юго-западу от села Еткуль. Опрос очевидцев показывает, что Челябинский болид являлся электрофонным. Анализ данных лимбового сенсора NASA/NOAA спутника «Suomi» указывают, что Челябинский болид оставил долгоживущий пылевой след в стратосфере.

Оптическая и сканирующая электронная микроскопия, рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный и рентгеноструктурный анализ, данный магнитометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света фрагментов показывают, что метеорит «Челябинск» относится к хондритам класса LL5 S4 W0.

Проанализирована выборка фрагментов метеорита «Челябинск». Показано, что функция масс фрагментов описывается суммой трех логнормальных распределений. Каждое распределение соответствует определенной области выпадения метеоритов вдоль траектории. Получена оценка полной массы выпавшего вещества, ~141 т.

Проведено численное моделирование движения, испарения и разрушения метеороида в атмосфере. Интенсивное энерговыделение на высотах 25–45 км является следствием механического разрушения метеороида, вызванного давлением воздуха на его переднюю поверхность. Получено хорошее соответствие между расчетами и наблюдательными данными по кривой светимости [1] и избыточному содержанию пыли в атмосфере [2].

Проанализированы статистические зависимости для метеоритов из Catalogue of Meteorites и Meteoritical Bulletin Database. Отмечено, что максимумы в распределении числа падений метеоритов по годам близки к годам минимумов магнитной солнечной активности. Оценена частота падения метеоритов различных размеров на Землю. Для метеоритов, подобных Челябинскому, средний интервал между падениями на Землю равен 30–40 годам.

### Литература

1. Popova O. P. et al. // Science. – 2013. – V. 342, No. 6162. – P. 1069.
2. Gorkavyi N., Rault D. F., Newman P. A., da Silva A. M., Dudorov A. E. // Geophys. Res. Lett. – 2013. – V. 40. – P. 4728.

### CHELYABINSK BOLIDE AND METEORITE «CHELYABINSK»

A. Dudorov<sup>1,\*</sup>, D. Badyukov<sup>2</sup>, N. Gorkavyi<sup>1,3</sup>,  
O. Eretnova<sup>1</sup>, S. Zamozdra<sup>1</sup>, A. Mayer<sup>1</sup>, S. Taskaev<sup>1</sup>,  
V. Tyumentsev<sup>1</sup>, S. Khaibrakhmanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chelyabinsk state university

<sup>2</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences, Russia

<sup>3</sup>Science Systems and Applications, Inc., Lanham, Maryland, USA

\*E-mail: dudorov@csu.ru

We present results of investigations of the meteorite «Chelyabinsk». Analysis of video recordings shows that registration of the bolide begins at height 97 km, height of the first burst is 45 km, height of the maximum of the main

burst is 34 km, registration of bolide finishes at height 17 km. Explosion Epicenter explosion lies several kilometers to the South-West from Etkul. Eyewitness questioning revealed that Chelyabinsk bolide was electrophonic. Limb Profiler on NASA/NOAA NPP/Suomi satellite detect long-lived stratospheric dust belt from the bolide.

Optical and SEM microscopy, EXRF EDX microanalysis, magnetic measurements and Raman spectroscopy of the fragments show that Chelyabinsk meteorite is the LL5 S4 W0 chondrite.

We analyze sample of registered fragments of meteorite «Chelyabinsk». Meteorites mass distribution is described by sum of three lognormal distributions. Each distribution corresponds to definite regions of the meteorites infall. We obtain lower estimate of the total mass of the infall meteorites, 141 tons.

Numerical modeling of motion, ablation and fracture of the meteoroid in atmosphere has been done. Intensive energy release at altitudes 25–45 km is a consequence of the mechanical fracture of the meteoroid, caused by air pressure on its surface. Our results agree with observed light curve [1] and excess of dust distribution in atmosphere [2].

We perform statistical analysis for meteorites from Catalogue of Meteorites и Meteoritical Bulletin Database. We found that maxima of fallings distribution over years correlate with years of solar activity minima. We estimate that mean time interval between infall of Chelyabinsk-like meteorites is 30–40 years.

1-14

### ЧАСТОТА ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ

А. Е. Дудоров, О. В. Еретнова

Челябинский государственный университет,  
Челябинск, Россия

E-mail: dudoruv@csu.ru, eretnova@csu.ru

Метеорит Челябинск вызвал интерес к переоценке частоты падения подобных тел. Такую оценку можно сделать, проведя статистический анализ падений метеоритов за достаточно большой промежуток времени. Оптимальной с нашей точки зрения является выборка метеоритов за последние сто лет, поскольку она будет являться наиболее полной.

С 1910 года по 2013 год включительно зарегистрировано 626 падений метеоритов. Сведения о них взяты из Catalogue of Meteorites (до июня 2002 г.) и из Meteoritical Bulletin Database.

В докладе проведен анализ некоторых статистических зависимостей для данной выборки метеоритов. Представлена гистограмма распределения падений по годам. Отмечено, что годы максимумов в распределении числа падений метеоритов близки к годам минимумов магнитной солнечной активности. Этот интересный факт нуждается в дополнительном исследовании. Показано, что распределение метеоритов по массам является логнормальным. Следовательно, они принадлежат к тому же классу объектов, что и астероиды и/или их осколки. Самое большое число метеоритов приходится на интервал  $m=(2,5-4,0)$  кг. С помощью кумуля-

тивного распределения числа метеоритов по массам определен приток метеоритного вещества:  $M=4,3 \cdot 10^4$  т/год. Это согласуется с результатами, полученными ранее другими авторами. Оценена частота падения метеоритов на Землю в зависимости от их первоначального диаметра. Для метеоритов, подобных Челябинскому, средний интервал между падениями на Землю равен 30–40 годам.

### FREQUENCY OF METEORITE FALLING

A. E. Dudorov, O. V. Eretnova

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: dudoruv@csu.ru, eretnova@csu.ru

After Chelyabinsk meteorite falling, interest arose to re-estimate the falling frequency of similar extraterrestrial body. In order to make this estimate, we need to carry out statistical analysis of meteorites fallings for long period. The sample of meteorites fallen during the last 100 years is optimal, since it is most complete.

Six hundred and twenty six fallings of meteorites are registered since 1910 to 2013 according to Catalogue of Meteorites (until June 2002) and Meteoritical Bulletin Database.

Some statistical distributions for these meteorites are obtained in our paper. The histogram of the distribution falling by years is presented. Maxima in the distribution falling by years are placed close to minima magnetic solar activity. This interesting fact requires to further study. The mass distribution of the studied meteorites is described by log-normal law. Therefore, the meteorites belong to the same class of object as asteroids and/or their fragments. Maximum in the mass distribution is corresponded to  $m=(2.5-4.0)$  kg. The influx of meteoritic material is obtained,  $M = 4.3 \cdot 10^4$  tons/year, with the help of the cumulative distribution of the number of meteorites over masses. It is consistent with results obtained by other authors. The frequency of meteorite falling on the Earth in dependence of the initial diameter of the meteorite within the range of 5 to 30 meters is evaluated. The average interval between fallings for meteorites similar to Chelyabinsk one is equal to 30–40 years.

1-15

### ПРЯМОЕ 3D ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ТЕЧЕНИИ СО СДВИГОМ СКОРОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

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

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

E-mail: M.Yu.Eguzhova@vniief.ru, vaz@vniief.ru

В ряде задач, связанных с удержанием плазмы магнитным полем, важную роль играет взаимодействие различного рода неустойчивостей плазмы и магнитного поля. Ранее, в работе [1] был рассмотрен ряд относящихся сюда вопросов на примере плоской задачи о гравитационном турбулентном перемешивании (ТП) слоёв плазмы при наличии магнитного поля.

В данной работе аналогичный подход применяется для задачи о другом типе возмущений. В ней исследуется развитие неустойчивости и турбулентного перемешивания в сдвиговом течении идеально проводящей плазмы с магнитным полем, напряженность которого варьировалась. Расчеты проведены по 3D методике ТРЭК[2] с учётом МГД эффектов.

Начальное поле постоянно во всей счетной области. Рассматриваются две задачи: а) поле параллельно скорости; б) поле перпендикулярно скорости и нормально к поверхности раздела сред. Для каждой из этих задач исследуются два типа начальных возмущений: регулярные (периодические) и случайные. Рассчитаны усреднённые значения компонент скорости и магнитного поля, а также среднеквадратичные значения пульсаций этих величин.

Для первой задачи прослежено развитие регулярных возмущений как на линейной, так и на нелинейной стадиях. Показано, что развитие нерегулярных возмущений при «слабом» поле приводит к турбулентному перемешиванию в полном соответствии с результатами работы [3], при этом возмущениями поля можно пренебречь. При «сильном» поле его влияние приводит к уменьшению скорости роста зоны ТП, а влияние последнего на поле – к его вытеснению из зоны ТП.

Во второй задаче одновременно наблюдаются два эффекта. Первый из них – генерация дополнительных компонент поля и скорости, не связанная с наличием начальных возмущений, При этом ширина зоны генерации растёт с альфвеновской скоростью. Второй связан с развитием неустойчивостей, однако внутри зоны генерации пульсации поля и скорости сильно подавлены.

Результаты описанных расчетов сравниваются с соответствующими результатами расчетов по  $k$ - $\epsilon$  модели, модифицированной для учета эффектов магнитного поля.

## Литература

1. Глазырин С. И., Егужова М. Ю., Жмайло В. А., Стаценко В.П., Янилкин Ю. В. Исследование гравитационного перемешивания в присутствии магнитного поля. Доклад на XI Забабахинских Научных Чтениях, г. Снежинск, 2012.
2. Стадник А. Л., Шанин А. А., Янилкин Ю. В., Эйлерова методика ТРЭК для расчета трехмерных газодинамических течений многокомпонентной среды. ВАНТ, сер. ММФП. – 1994. – Вып. 4. – С. 71-78.
3. Stadnik A. A., Statsenko V. P., Yanilkin Yu. V., Zhmailo V. A. Direct numerical simulation of turbulent mixing in shear flows. // Laser and Particle Beams. – 1997. – Vol. 15, #1. – P. 115-125.

### DIRECT 3D NUMERICAL SIMULATION OF INSTABILITY DEVELOPMENT AND TURBULENT MIXING IN SHEAR FLOWS IN MAGNETIC FIELD

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

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research  
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia  
E-mail: M.Yu.Eguzhova@vniief.ru, vaz@vniief.ru

Interaction of various instabilities of plasma and magnetic field plays an important role in some problems related to the plasma confinement by the magnetic field. Earlier a number of issues related to this problem was considered in [1]; there was used an example of a flat problem of gravitational turbulent mixing (TM) of plasma layers in the presence of magnetic field.

In this work an analogous approach is used for the problem of another type of perturbations. We study the evolution of instability and turbulent mixing in shear flows of ideal conducting plasma with the magnetic field, the magnetic field strength of which varies. The calculations were performed using 3D TREK method [2] with the account for MHD effects.

The initial field is constant across the calculating area. Two problems are being considered: a) the field parallel to the velocity; b) the field perpendicular to the velocity and normal to the surface of media interface. Two types of initial perturbations are analyzed for each problem: the regular (periodic) and the random ones. Averaged quantities of the velocity and the magnetic field component are calculated, as well as mean-square quantities of fluctuations of these parameters.

Development of regular perturbations both at linear and non-linear stages was tracked for the first task. It was shown that the evolution of random perturbations at “weak” field results into the turbulent mixing in total compliance with the results of [3], and perturbations of the field can be neglected here. In case of a “strong” field its influence results into the decrease of the growth velocity of the TM zone, and the influence of the latter on the field results into its displacement from the TM zone.

Two effects were observed at the same time in the second problem. The first one was the generation of extra components of the field and the velocity not related to the presence of initial perturbations. And the width of the generation zone grows at Alfvén velocity. The second one was related to the instability development; however, inside the

generation zone the field and velocity fluctuations are very much suppressed.

The results of the described calculations are compared with the respective calculation results by  $k$ - $\epsilon$  model modified to account for the magnetic field effects.

## References

1. Glazyrin S. I., Yeguzhova M. Yu., Zhmailo V. A. et al. Research on gravitational mixing in the presence of magnetic field. Report at the XI Zababakhin Scientific Readings, Snezhinsk, 2012.
2. Stadnik A. L., Shanin A. A., Yanilkin Yu. V. TREK Eulerian method for calculations of 3D gas-dynamic flows in multi-material medium. VANT, MMFP series. 1994. – # 4. – P. 71–78.
3. Stadnik A. A., Statsenko V. P., Yanilkin Yu. V., Zhmailo V. A. Direct numerical simulation of turbulent mixing in shear flows. // Laser and Particle Beams. 1997. – Vol. 15, # 1. – P. 115–125.

1-16

### ПРОБЛЕМЫ И ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНЕТАРНОЙ ЗАЩИТЫ

А. В. Зайцев<sup>1</sup>, Н. А. Махутов<sup>2</sup>, Д. В. Петров<sup>3</sup>,  
В. А. Пучков<sup>4</sup>, В. А. Симоненко<sup>3</sup>,  
А. А. Таранов<sup>4</sup>, О. Н. Шубин<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Некоммерческое партнерство «Центр планетарной защиты», г. Химки, Россия

<sup>2</sup> Рабочая группа «Риски и безопасность» при Президенте РАН, Россия

<sup>3</sup> Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина, Снежинск, Россия

<sup>4</sup> Министерство РФ по делам ГО, ЧС и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия

<sup>5</sup> Госкорпорация «Росатом», Россия

E-mail: zav-y@yandex.ru

Необходимость разработки мер по обеспечению планетарной защиты от космических рисков и угроз, связанных с астероидно-кометной опасностью (АКО), «космической погодой» и космическим мусором подтверждена Рекомендациями «круглого стола», состоявшегося 12 марта 2013 г. в Совете Федерации Федерального Собрания Российской Федерации. Одной из таких мер может стать разработка научно-технических основ и создание международной Системы планетарной защиты (СПЗ) «Цитадель» для защиты Земли от АКО, что также отвечает целям и задачам «Программы снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

В работе изложены требования к СПЗ, принципы и схема ее построения.

Предлагаемая СПЗ должна включать в себя два эшелона:

- эшелон краткосрочного (оперативного) реагирования (ЭКР);
- эшелон долгосрочного реагирования (ЭДР), а также две вспомогательных службы:
- служба прогнозирования районов и последствий падений опасных небесных тел (ОНТ);
- служба региональной защиты.



Приведен состав и характеристики основных ракетно-космических компонентов Системы – космических аппаратов (КА)-наблюдателей, обеспечивающих обнаружение ОНТ, КА-разведчиков для их изучения и КА-перехватчиков для перехвата ОНТ. Показано, что ЭКР может обеспечить с помощью кинетических и ядерных средств воздействия защиту от ОНТ размером до сотен метров, что составляет около 99,9% от числа астероидов, сближающихся с Землей. Этот эшелон может быть создан уже в ближайшие 5-7 лет, что позволит обеспечить гарантированную защиту Земли от астероидной и, частично, кометной опасности

Предложены возможные варианты защиты от более крупных ОНТ с помощью средств ЭДР.

Рассмотрены научно-технические, международно-правовые, финансовые и организационные проблемы, связанные с созданием СПЗ. Сделан вывод о возможности их решения, что позволяет приступить к практическим шагам по созданию Системы.

### PROBLEMS AND FUNDAMENTALS OF THE INTERNATIONAL PLANETARY DEFENCE SYSTEM DEVELOPMENT

A. V. Zaitsev<sup>1</sup>, N. A. Makhutov<sup>2</sup>, D. V. Petrov<sup>3</sup>,  
V. A. Puchkov<sup>4</sup>, V. A. Simonenko<sup>3</sup>,  
A. A. Taranov<sup>4</sup>, O. N. Shubin<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Planetary Defense Center, Russia

<sup>2</sup> Working Group «Risk and Safety» under the President  
of the RAS, Russia

<sup>3</sup> Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia  
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

<sup>4</sup> Ministry of the Russian Federation for Affairs of Civil Defence,  
Emergencies and Disaster Relief, Russia

<sup>5</sup> State Atomic Energy Corporation «Rosatom», Russia

E-mail: zav-y@yandex.ru

The need for taking measures to protect the planet against space risks and threats associated with asteroid and comet hazard (ACH), «space weather» and space debris was confirmed by Recommendations of the «Round Table», held on 12 March 2013 in the Council of Federation of the Federal Assembly of the Russian Federation. The development of scientific and technical bases and the creation of the international Planetary Defence System (PDS) «Citadel» to protect the Earth from ACH could become such measure and this also meets goals and objectives of the «Program for Reduction of Risks and Mitigation of Emergency Situations of Natural and Technological Character».

This paper describes requirements for the PDS, principles and a scheme for its development.

The proposed PDS should include two levels:

- echelon for short-term (operational) response (ESTR);
- echelon for long-term response (ELTR)

and two auxiliary services:

- service for forecasting areas and consequences of dangerous celestial bodies' (DCBs) falls;
- service for regional defence.
- the observational spacecrafts

Characteristics and composition of main rocket and space components of the System were identified – obser-

vational spacecrafts for discovering DCBs, reconnaissance spacecrafts for studying them and intercepting spacecrafts for intercepting the bodies. By using kinetic and nuclear means, the ESTR can protect from DCBs up to hundreds meters in size; that means – from 99.9% of asteroids approaching the Earth. This echelon can be created already in the nearest 5–7 years and thus provide guaranteed protection of the Earth against asteroid and, partially, against comet hazard.

The paper also provides options for protecting from larger DCBs by the ELTR means.

Scientific and technical, international legal, financial and organizational problems associated with the development of the PDS were reviewed. The conclusion that these problems can be resolved has been made. This allows starting practical steps for the System development.

1-17

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЙОНОВ И ПОСЛЕДСТВИЙ ПАДЕНИЙ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

А. В. Зайцев<sup>1</sup>, Ю. И. Зецер<sup>2</sup>, О. М. Кочетова<sup>3</sup>,  
В. И. Ларионов<sup>4</sup>, Н. А. Махутов<sup>5</sup>, О. П. Попова<sup>2</sup>,  
В. А. Пучков<sup>6</sup>, В. В. Светцов<sup>2</sup>, В. А. Симоненко<sup>7</sup>,  
Н. А. Скоркин<sup>7</sup>, А. А. Таранов<sup>6</sup>, Ю. А. Чернетенко<sup>3</sup>,  
В. А. Шор<sup>3</sup>, В. В. Шувалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Некоммерческое партнерство Центр планетарной защиты,  
Химки, Россия

<sup>2</sup> Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт прикладной астрономии РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Центр исследования экстремальных ситуаций,  
Москва, Россия

<sup>5</sup> Рабочая группа «Риски и безопасность»  
при Президенте РАН, Москва, Россия

<sup>6</sup> Министерство РФ по делам ГО, ЧС и ликвидации  
последствий стихийных бедствий, Москва, Россия

<sup>7</sup> Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия

E-mail: zav-y@yandex.ru

Представлены результаты работ по созданию Службы прогнозирования районов и последствий падений опасных небесных тел (ОНТ), выполняемых по заданию МЧС России. Данная Служба предназначена для обеспечения минимизации ущерба от этих падений до создания Системы планетарной защиты (СПЗ), а также для подстраховки основных средств будущей СПЗ в случаях:

- малого резерва времени до столкновения ОНТ с Землей, не позволяющего использовать средства СПЗ для его перехвата;

- угрозы падения на Землю крупных фрагментов разрушенного вблизи Земли ОНТ.

Рассмотрен возможный состав и характеристики основных компонентов Службы – наземно-космических средств наблюдения и программно-аппаратного комплекса (ПАК), для прогнозирования районов и последствий падений ОНТ. Приводятся результаты разработки

данного ПАК. С его помощью будет осуществляться прогноз условий входа ОНТ в атмосферу Земли, проводится моделирование его движения в атмосфере, определяются район предполагаемого падения (взрыва), моделируются процесс взрыва в различных средах (воздушный, наземный или в водной среде) и поражающих факторов связанных с ним.

На основании этих данных будет определяться возможные последствия падения ОНТ для населения и территорий, и разрабатываться мероприятия по снижению возможного ущерба и ликвидации чрезвычайных ситуаций силами и средствами национальных и международных служб гражданской обороны. К этим мероприятиям в первую очередь относится эвакуация населения, материальных и культурных ценностей, а также опасных материалов и объектов из ожидаемого района падения ОНТ.

Приводятся результаты моделирования некоторых возможных сценариев, связанных с падениями ОНТ.

### FORECASTING AREAS AND CONSEQUENCES OF CELESTIAL BODIES' FALLS

A. V. Zaitsev<sup>1</sup>, Yu. I. Zetser<sup>2</sup>, O. M. Kochetova<sup>3</sup>,  
V. I. Larionov<sup>4</sup>, N. A. Makhutov<sup>5</sup>, O. P. Popova<sup>2</sup>,  
V. A. Puchkov<sup>6</sup>, V. V. Svetsov<sup>2</sup>, V. A. Simonenko<sup>7</sup>,  
N. A. Skorkin<sup>7</sup>, A. A. Taranov<sup>6</sup>, Yu. A. Chernetenko<sup>3</sup>,  
V. A. Shor<sup>3</sup>, V. V. Shuvalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Planetary Defense Center, Russia

<sup>2</sup> Institute of Geosphere Dynamics of RAS, Russia

<sup>3</sup> Институт прикладной астрономии РАН, Russia

<sup>4</sup> Emergency Services Research Centre, Russia

<sup>5</sup> Working Group «Risk and Safety» under the President of the RAS, Russia

<sup>6</sup> Ministry of the Russian Federation for Affairs of Civil Defence, Emergencies and Disaster Relief, Russia

<sup>7</sup> Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: zav-y@yandex.ru

The paper presents results of work on the development of Services for forecasting areas and consequences of falls of dangerous celestial bodies (DCBs), performed at the request of the EMERCOM Russia. This Service is designed for mitigating damage from the falls in the period before the creation of the Planetary Defence System (PDS) and also for backing main means of the future PDS in case of:

- small reserve time before the PDS impact, which does not allow the use of PDS means for the interception;
- threat of large parts of destroyed near the Earth DCB falling to the Earth.

Possible composition and characteristics of main components of the Service were identified. They include ground-space monitoring tools and hardware-software complex (HSC) for forecasting areas and consequences of DCBs' falls.

Results of the HSC's development are presented. It will be used for: forecasting conditions of DCB's entry into the Earth atmosphere, simulating its motion in the atmosphere, identifying the area of the alleged fall (explosion), simulating the explosion and estimating damaging factors associated with it in various media (air, land or water).

On the basis of these data, possible consequences of DCBs' falls for the population and territories will be identified. Measures for mitigating potential damage and rescue operations by forces and means of national and international civil defense services will also be defined.

These measures comprise first of all evacuation of the population, material and cultural values and dangerous materials and objects from the expected DCB's impact area. Simulation results for some possible scenarios associated with DCBs' falls are presented in the paper.

1-18

### МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

В. И. Зельдович<sup>1</sup>, Н. Ю. Фролова<sup>1</sup>, А. Э. Хейфец<sup>1</sup>,  
С. М. Долгих<sup>2</sup>, К. В. Гаан<sup>2</sup>, Е. В. Шорохов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов УрО РАН, Россия, Екатеринбург

<sup>2</sup> Российский Федеральный Ядерный Центр ВНИИТФ, Россия, Снежинск

E-mail: zeldovich@imp.uran.ru

Цилиндрическая оболочка с внутренним диаметром 118 мм и толщиной стенки 5,7 мм из низкоуглеродистой стали 20 была подвергнута действию косой ударной волны, распространяющейся вдоль наружной поверхности. Нагружение осуществлялось в режиме скользящей детонации. В результате нагружения произошло схлопывание оболочки, и был получен сплошной цилиндр диаметром ~50 мм, поверхность которого имела «ребристое» строение. Усредненная степень деформации в радиальном направлении, определенная по изменению формы и размеров превращенного участка, составила ~80%. Усредненная степень деформации в осевом направлении составила 13%. Таким образом, радиальная деформация превышала осевую в шесть раз.

Важно заметить, что в условиях быстропротекающего процесса схлопывания структурные изменения в свободном феррите и перлите стали происходят в значительной степени независимо. Исследование изменения микроструктуры и микротвердости по радиусу схлопнутого цилиндра показало, что можно выделить три основные зоны с характерным строением. В наружной зоне толщиной ~4 мм преобладает действие локализованной деформации и высокого давления. Локализация деформации происходит путем необычных периодических сдвигов под углами 60 градусов, которые приводят к возникновению трехгранных призм, создающих ребристую поверхность цилиндра. В свободном феррите видны следы цикла  $\alpha$ - $\epsilon$ - $\alpha$  превращений в виде пластин толщиной ~1 мкм. Структура второй зоны толщиной ~8 мм формируется под действием мощного течения материала в радиальном направлении. В свободном феррите под действием высокого давления и повышенной температуры происходит  $\alpha$ - $\gamma$  превращение, и следы цикла  $\alpha$ - $\gamma$ - $\alpha$  превращений видны в виде тонких коротких пластинок толщиной в несколько сотен нанометров. Таким образом, граница первой и второй зон

соответствует тройной точке железа. Во второй зоне микротвердость имеет максимальное значение, что объясняется большой степенью деформации и дисперсностью структуры в свободном феррите. В третьей, центральной зоне, имеющей форму круга радиусом ~13 мм, структура изменяется под действием деформации и существенного повышения температуры. Тонкопластинчатая структура в свободном феррите сменяется равноосными зернами, размер которых возрастает к оси цилиндра. Микротвердость в этой зоне имеет минимальное значение. Несмотря на развитие процесса рекристаллизации, микроструктура сохраняет следы мощного радиального течения.

Работа выполнена по плану РАН (тема «Структура», № г. р. 01201064335), при поддержке Программы Президиума РАН № 12-П-2-1009 и Проекта Президиума РАН № 12-П-2-1030.

### METALLOGRAPHIC INVESTIGATIONS OF THE DEFORMATION PHENOMENA AT COLLAPSE OF A CYLINDRICAL STEEL SHELL

V. I. Zel'dovich<sup>1</sup>, N. Yu. Frolova<sup>1</sup>, A. E. Kheifets<sup>1</sup>,  
S. M. Dolgikh<sup>2</sup>, K. V. Gaan<sup>2</sup>, E. V. Shorohov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of physics of metals, Ural Division  
of Russian Academy of Sciences, Russia, Ekaterinburg

<sup>2</sup> Russian Federal Nuclear Center VNIITF, Russia, Snezhinsk  
E-mail: zeldovich@imp.uran.ru

Cylindrical shell with an internal diameter of 118 mm and a wall thickness of 5.7 mm low carbon steel st-20 was subjected to action of shock wave propagating along the outer surface. Loading was carried out in the mode of sliding detonation. As a result of collapse of the shell a solid cylinder with diameter of ~50 mm was obtained. Surface of the cylinder had “ribbed” structure. The average degree of deformation in the radial direction defined by a change in the shape and size of the deformed place was ~80 %. The average degree of deformation in the axial direction was 13%. Thus, radial deformation exceed of axial one six times.

It is important to note that in the context of fast processes of collapse the structural changes in the free ferrite and pearlite steel occur largely independently. Study of changes in microstructure and microhardness of the collapsed cylinder along the radius show that there are three main areas with characteristic structure. In the surface zone with thickness of ~ 4 mm the action of localized deformation and high pressure are predominant. Localization of deformation occurs by untypical periodic shear by angles of 60 degrees, which give rise the triangular prisms producing the ribbed surface of the cylinder. There are traces of cycle  $\alpha$ - $\varepsilon$ - $\alpha$  transformation like as plates with thickness of ~1 micron in the free ferrite. The structure of the second zone with thickness of ~8 mm is formed by influence of a powerful flow of the material radially. The  $\alpha$ - $\gamma$  transformation take place in a free ferrite under high pressure and elevated temperature. Traces of cycle of  $\alpha$ - $\gamma$ - $\alpha$  transformation have a form of short thin plates with thickness of several hundred nanometers. Thus, the boundary of the first and second zones corresponds to the triple point of iron. Maximum of microhardness observed

in the second zone due to the high deformation degree and dispersion patterns of structure in the free ferrite. The structure changes under the influence of deformation and significant increased temperature occurred in the third central zone having a circular form with ~13 mm in radius. The Plate structure in the free ferrite is replaced by equiaxed ferrite grains, the size of which increases along the radius. Microhardness in this zone has a minimum value. Despite the development of the recrystallization process, the microstructure has traces of a powerful radial flow.

Supported by Russian Academy of Sciences (theme «Structure», № 01201064335), the Program of Presidium of the RAS (№ 12-П-2-1009) and Project of Presidium of RAS (№ 12-П-2-1030)

1-19

### ДЕТОНАЦИОННАЯ СМЕРТЬ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРА

М. Я. Иванов<sup>1</sup>, Ю. Л. Серов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центральный Институт Авиационного Моторостроения им.  
П.И. Баранова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Физико-Технический Институт им. А. Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ivanov@ciam.ru; yuserov@mail.ioffe.ru

Наиболее разрушительный за последние 100 лет взрыв метеорита произошел 15 февраля 2013 г. в небе над Челябинской областью России. Метеорит явился наибольшим космическим объектом, взорвавшимся в атмосфере Земли с 1908 года, когда наблюдалось разрушительное воздействие Тунгусского метеорита. Судя по химическому анализу состава его фрагментов, Челябинский метеорит относится к типичным хондритам – каменным метеорам с низким содержанием железа. Метеорит был зарегистрирован на высоте примерно 90 км и имел скорость около 20 км/с, превысившую в 50 раз скорость звука. На высоте около 25 км метеорит разрушился в результате мощного взрыва, что привело к повреждению на земле некоторых строений, выбитым оконным стеклам у многих зданий и травмам (в основном, осколочным порезам) более, чем у 1600 человек. Данный взрыв сопровождался яркой вспышкой света, образованием большого количества незначительных по размерам фрагментов метеорита и воздействием сильной ударной волны. Энергетическая оценка мощности взрыва этого метеора составила около 500 килотонн (в тротиловом эквиваленте).

Одной из наиболее вероятных причин зарегистрированного процесса разрушения метеорита в атмосфере Земли является тепловой взрыв с детонационным процессом сгорания [1–3]. Такой детонационный режим сгорания космического тела оказывается возможным с точки зрения современной плазменной модели детонации. В этой модели детонационная волна представляет собой ионно-звуковую ударную волну. Она формируется ионно-звуковым солитонным сгустком, определяющим все характерные особенности развития детонационного процесса. Подобный сценарий разрушения

метеора согласуется с известными экспериментальными данными по детонации.

В представленном докладе мы рассматриваем основные стадии детонационного разрушения метеорита: образование мощной головной ударной волны при обтекании метеорита (сжатого ударного слоя с высокими значениями температуры и давления перед передней затупленной кромкой его головной части); наличие интенсивного теплового (в том числе радиационного) разогрева вещества метеорита, достаточно быстрого испарения и ионизации вещества (в окрестности передней затупленной кромки метеора) и образование плазменного солитона, который определяет скорость распространения детонационной волны сгорания кремния в азоте и кислороде. При этом тепловая радиация играет важную роль в рассматриваемом процессе высокотемпературного взрыва метеорита. С целью подтверждения приведенного сценария детонационной смерти Челябинского метеора нами приводятся дополнительные экспериментальные результаты по измерениям скорости распространения детонационных волн в различных взрывчатых веществах [4, 5].

Большое число опубликованных видео регистраций теплового взрыва метеора служат также подтверждением справедливости рассмотренного нами процесса разрушения метеоритов в атмосфере Земли.

### Литература

1. Ivanov M. Ja., Serov Yu. L. Thermal death of the Chelyabinsk meteor with energy nearly 500 kilotonnes. *Very High Energy Phenomena in the Universe. Proc. Rencontres de Moriond. March 9–16, 2013 sessions in La Thuile, Aosta valley, Italy*, pp. 343–347.
2. Иванов М. Я., Серов Ю. Л., Соколов В. Е. Теплофизические проблемы внутренней аэродинамики высокотемпературных воздушно-реактивных двигателей и внешней аэродинамики входящих в атмосферу тел (на примере Челябинского болида и шаттла «Колумбия») 12-е Совещание по магнетоплазменной аэродинамике. 26-28 марта 2013 г., Москва, ИВТАН.
3. Ivanov M. Ja. Solution of Modern Thermo Physical Problems of Applied External and Internal Aerodynamics with Dark Matter-Energy Simulation. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2014. – No.2.
4. Серов Ю. Л. Плазменная модель детонации: влияние ионного состава среды на структуру детонации смесей горючих газов. В сб. *Актуальные проблемы российской космонавтики. Материалы XXXII академических чтений по космонавтике.* – М.: 2008. – С. 157–158.
5. Серов Ю. Л., Иванов М. Я. Нелинейные свойства плазмы в течениях с ударными волнами. Материалы XI Международной конференции «Забабахинские научные чтения», ЗНЧ-2012, Снежинск, 16-20 апреля 2012.

### DETONATION DEATH OF THE CHELYABINSK METEOR

M. Ja. Ivanov<sup>1</sup>, Yu. L. Serov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia

<sup>2</sup> A. F. Ioffe Physical Institute, St.-Petersburg, Russia

E-mail: ivanov@ciam.ru; yuserov@mail.ioffe.ru

a wide, remote forest area of Siberia. The Chelyabinsk meteor was a typical chondrite – a stony meteor with low iron content. The meteor was near 17 meters across and weight nearly 10,000 tons. The analysis reveals that the meteor first became visible around 90 kilometers above ground at an estimated speed of 18 km/s, approximately 50 times the speed of sound. At a height of nearly 25 kilometers, it exploded damaging thousands of homes and injuring more than 1,500 people in and around Chelyabinsk. The explosion generated a bright flash, producing many small fragmentary meteorites and a powerful shock wave. The explosive energy was nearly 500 kilotons (in the TNT equivalent).

One of main real explanation is a thermal explosion with detonation burning process [1–3]. Such detonation mode of combustion of a space body is possible from the point of view of modern plasma model of a detonation. In this model the detonation wave represents an ion-acoustic shock wave. It is formed by the ion-sound solitonic bunch determining all characteristics of detonation development process. This description accurately agrees with the experimental data on detonation.

We consider the main stages of a meteor detonation: very high temperature and pressure in head shock layer (near leading blunt body edge); intensive radiation heat in detonation medium (a stony meteor); very fast evaporation and ionization processes (from leading blunt edge); plasma soliton formation, which determines detonation wave propagation. The thermal radiation plays one of the main roles in considered high temperature burning process. Additional experimental results (measured speeds of detonation waves in various explosives) are given with the purpose of validation of the proposed model [4, 5].

Many video registrations of the meteor thermal explosion are also confirmed our explanation.

### Reference

1. M. Ja. Ivanov, Yu. L. Serov. Thermal death of the Chelyabinsk meteor with energy nearly 500 kilotonnes. *Very High Energy Phenomena in the Universe. Proc. Rencontres de Moriond. March 9–16, 2013 sessions in La Thuile, Aosta valley, Italy*, pp. 343–347.
2. M. Ja. Ivanov, Yu. L. Serov, V. E. Sokolov. Thermo physical problems of internal aerodynamics of high-temperature air-breathing engines and external aerodynamics of reentry bodies (by an example of the Chelyabinsk bolide and the «Columbia» shuttle). *Proc. 12th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Moscow, Russia, 26–28 Marth, 2013, IHT RAN.*
3. M. Ja. Ivanov. Solution of Modern Thermo Physical Problems of Applied External and Internal Aerodynamics with Dark Matter-Energy Simulation. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2014, № 2.
4. Yu. L. Serov. 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.
5. M. Ja. Ivanov, Yu. L. Serov. Nonlinear dynamic properties of plasma flows with shock waves. *Proc. XI Int. Conf. ZST-2012, Snezhinsk, 16–20 Apr. 2012.*

The destroying meteor from the last 100 years blasted above the Chelyabinsk region in Russia on 15 February 2013. It is the largest known object to have entered Earth's atmosphere since the 1908 Tunguska event which destroyed

1-20

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ ОТ АФЕЛИЯ ДО ПАДЕНИЯ НА СНЕГ

Г. В. Ионов

Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия  
E-mail: gionov@mail.ru

Широко распространено заблуждение, что небольшие метеориты (до тонны) падают горячими. Многие в качестве аргумента приводят фотографии снежных столбиков, образовавшихся в месте пробоя метеоритом снега. В данной работе было проведено моделирование изменения температуры внутри метеороида от афелия до вхождения в атмосферу и внутри фрагментов во время торможения с учетом абляции и сдувания верхнего расплавленного слоя, а также во время свободного падения до поверхности снега.

Моделирование распространения тепла проводилось в сферическом приближении. Температуропроводность космического тела выбиралась в двух вариантах: для «груды камней» была использована температуропроводность лунного реголита  $10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с, для монолитного метеороида – температуропроводность кварца  $1,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Рассмотрен прогрев Солнцем в случае оси вращения перпендикулярной и параллельной эклиптике, а также хаотическое вращение. Были рассмотрены варианты с различным альбедо в далекой инфракрасной области, ответственной за радиационное остывание.

При расчете тепловых потоков внутри фрагментов во время торможения в атмосфере граничная температура ограничивалась температурой плавления 1800 К, при этом радиус фрагментов уменьшался за счет потери массы на абляцию. Моделирование остывания в процессе свободного падения производилось с учетом локальной температуры и плотности воздуха [1], а также за счет радиационных потерь. Для крупных фрагментов также учитывался нагрев воздуха во встречном потоке.

Проведенные расчеты показали, что наиболее вероятно выпадение метеоритов с температурой ниже 0°C, хотя в случае вращения метеороида в плоскости эклиптики подсолнечная точка могла достаточно сильно прогреться и крупные фрагменты могли сохранить это тепло вплоть до момента падения.

### Литература

1. Метеостанция Верхнее Дуброво. Зондирование атмосферы 00:00 UTC 15 Feb 2013 <http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=naconf&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=2013&MONTH=02&FROM=1500&TO=1600&STNM=28445>

## MODELING OF HEATING AND COOLING OF THE BOLIDE FRAGMENTS FROM THE APHELION TO FALL ON SNOW

G. V. Iionov

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

There is a widespread misconception that small meteorites (up to a ton) fall in the hot condition. Many people in an argument reference to the photos of snow columns formed in the breakdown in the snow by falling meteorite. In this work, a simulation of the temperature change was done as inside the meteoroid from aphelion before entering the atmosphere and inside the fragments during braking in the Earth atmosphere considering ablation and blowing the top of the molten layer, as well as during free fall to the snow surface.

Mathematical modeling of the heat conduction was performed in the spherical approximation. The thermal diffusivity of the cosmic body chosen in two versions: for «rubble pile» was used thermal diffusivity of lunar regolith  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, for monolithic meteoroid – thermal diffusivity of quartz  $1.4 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. It was considered in the case of the sun warming as for the rotation axis perpendicular and parallel to the ecliptic, and the chaotic rotation. Options have been considered with different albedo in the far infrared region responsible for radiative cooling.

When calculating the heat flow inside fragments during deceleration in the atmosphere, boundary temperature was limited by melting 1800 K, with a radius of fragments decreased by weight loss on ablation. Simulation of cooling during freefall made with regard to the local air temperature and density [1], and also due to radiative losses. For larger fragments also includes heating the air in the counter flow.

The calculations showed that the most likely meteorite temperature at the landing moment is below 0°C, although in the case of the rotation axis of the meteoroid in the ecliptic plane the undersolar point could strongly heat and large fragments could keep it warm until the landing.

### References

1. Verhnee Dubrovo station. Upper air sounding at 00:00 UTC 15 Feb 2013 <http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=naconf&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=2013&MONTH=02&FROM=1500&TO=1600&STNM=28445>

1-21

## РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Г. В. Ионов

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

E-mail: gionov@mail.ru

Челябинский болид 15 февраля 2013 был зарегистрирован на фотографиях и видеозаписях из различных пунктов земной поверхности, расположенных на расстояниях до нескольких сотен километров от места явления [1]. С использованием большой совокупности видеоданных была построена высокоточная модель движения фрагментов в атмосфере. Такими исходными данными являются в первую очередь видеозаписи с автомобильных регистраторов. Видеозапись с камеры наблюдения Мельникова о падения метеорита в озеро Чебаркуль дополняет информацию о конечном участке движения Чебаркульского фрагмента. Параметры образовавшегося ледяного кратера, места находок метеоритов и их параметры были использованы для калибровки модели ветрового сноса. Видеозаписи камер наблюдения [2] позволили уточнить направления на огненный шар в некоторые моменты времени с помощью сопоставления теней от деталей ландшафта, создаваемых огненным шаром и солнцем в определённые моменты года.

Для расчета траектории в первую очередь с максимальной точностью определяется положение в пространстве выбранной опорной детали следа, которая легко идентифицируется на большом количестве видеозаписей. При дальнейшем моделировании движения фрагментов считается, что траектория проходит через эту опорную точку. Направление движения в ней определяется итеративно поворотами траектории в пространстве, приближающими ее к наблюдательным данным. Интегрирование движения вдоль траектории выполняется методом Верле с учетом трения и абляции и ветра в атмосфере с состоянием, измеренным возле Екатеринбурга тремя часами ранее.

Построенная кинематическая модель Челябинского болида хорошо согласуется со всем набором наблюдательных данных и может быть использована для расчёта звуковых и световых явлений, моделирования фрагментации и выпадения метеоритов, восстановления орбиты метеороида в Солнечной системе. Основные параметры траектории следующие: на высоте 90 км скорость была равна 18.96 км/с, угол к горизонту 17,3°, масса Чебаркульского фрагмента при падении на лед 910 кг, скорость 213 м/с, угол падения 78,6°.

### Литература

1. Лоскутов Н. Каталог фотографий и видеозаписей Челябинского события. <http://chelyabinskfall.ya.ru/>
2. Камеры наружного наблюдения компании Интерсвязь. <http://stream1.is74.ru/>
3. А. П. Голубь, И. Б. Косарев, И. В. Немчинов, В. В. Шувалов, Излучение и абляция крупного метеороида при его движении

сквозь атмосферу Земли // *Астрономический вестник*. – 1996. – Т. 30, № 3. – С. 213–228.

4. A. B. Bailey, J. Hiatt, Sphere Drag Coefficients for a Broad Range of Mach and Reynolds Numbers // *AIAA Journal*. – 1972. – V. 10, No. 11. – P. 1436–1440.

5. V. V. Emel'yanenko, O. P. Popova, N. N. Chugai et al. Astronomical and Physical Aspects of the Chelyabinsk Event (February 15, 2013) // *Solar System Research*, July 2013. – Vol. 47, Issue 4. – P. 240–254.

6. Nick Gorkavyi, D. F. Rault, P. A. Newman et al. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // *Geophysical Research Letters*. – 2013. – V. 40, Issue 17. – P. 4728–4733.

7. Borovicka J., Spurny P., Brown P. et al. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // *Nature*, 14 November 2013. – Vol. 503. – P. 235–247.

8. Brown P. G., Assink J. D., Astiz L. et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*, 14 November 2013. – Vol. 503. – P. 238–241.

9. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*, 29 November 2013. – Vol. 342 No. 6162. – P. 1069–1073.

10. Ионов Г. В. Определение траектории челябинского болида по записям автомобильных видеорегистраторов и моделирование движения фрагмента в атмосфере // *Вестник ЧелГУ*. – 2014. – Вып. 19, № 1. – С. 30–39.

11. Метеостанция Верхнее Дуброво. Зондирование атмосферы 00:00 UTC 15 Feb 2013 <http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=naconf&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=2013&MONTH=02&FROM=1500&TO=1600&STNM=28445>.

## THE SIMULATION OF FRAGMENTS MOTION IN THE EARTH ATMOSPHERE ACCORDING TO THE OBSERVATIONAL DATA

G. V. Ionov

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

E-mail: gionov@mail.ru

The characteristic of Chelyabinsk bolide is its detection from the different locations of the ground surface that are located at the distances of several hundred kilometers from the place of event [1]. Due to the abundance of data on Chelyabinsk bolide the accurate model of the accompaniments can be built. These basic data are primarily the video records from the drive recorders. The video record from the video camera of Melnikov about the fall of the meteorite in the Chebarkul Lake supports the information about the final segment of moving of Chebarkul fragment. The characteristics of the formed ice crater, the places of the meteorite found and its characteristics can also serve for the calibration of the wind deflection model. The video records from street cameras [2] have allowed to clarify the directions to the fireball at some times by comparing the details of shadows created by the fireball and the sun at certain times of the year.

Primarily, the position in space of any one detail of trace is determined with the maximum precision. This pivot detail shall be selected as easy identifiable on many video records. As for the further simulation it shall be considered that the trajectory goes through the position of the pivot detail in space. It remains to be found the direction along which the base fragment was moving. It shall be done in iterated way by the rotation of the trajectory in the space

that leads it to the straight sight lines along which the luminous part of the bolide was observed from the different points at the ground surface. The movement trajectory was simulated by the Verlet integration. The mass evolved due to the ablation, the fragmentation was not included because it is not important for determination of the trajectory. The variable gravitational field and the atmosphere deceleration force are taken into account.

Kinematic model of the bolide is in good agreement with the entire set of observational data and can be used to calculate the sound and light effects, modeling of fragmentation and falling of meteorites, recovery meteoroid orbits in the Solar system. The main parameters of the trajectory as follows: at an altitude of 90 km velocity was 18.96 km/s, the angle to the horizon 17.3°, mass of the Chebarcul fragment at falling on the ice is 910 kg, speed is 213 m/s, the angle of incidence equal to 78.6°.

### References

1. Loskutov N. The catalog of photographs and videos of the Chelyabinsk event. <http://chelyabinskfall.ya.ru/>
2. Records from surveillance cameras of «Intersvyaz» company. <http://stream1.is74.ru/>
3. Golub' A. P., Kosarev I. B., Nemchinov I. V., Shuvalov V. V. Izluchenie i ablyatsiya krupnogo meteoroida pri ego dvizhenii skvoz' atmosferu Zemli // *Astron. vestn.* – 1996. – T. 30. № 3. – S. 213.
4. A. B. Bailey and J. Hiatt, Sphere Drag Coefficients for a Broad Range of Mach and Reynolds Numbers // *AIAA Journal.* – 1972. – V. 10, No. 11. – P. 1436–1440.
5. Emel'yanenko V. V., Popova O. P., Chugai N. N. et al. Astronomical and Physical Aspects of the Chelyabinsk Event (February 15, 2013) // *Solar System Research*, July 2013. – Vol. 47, Issue 4. – P. 240–254.
6. Nick Gorkavyy, D. F. Rault, P. A. Newman, A. M. da Silva, A. E. Dudorov, New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // *Geophysical Research Letters.* – 2013. – V. 40, Issue 17. – P. 4728–4733.
7. Borovicka J., Spurny P., Brown P. et al. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // *Nature*, 14 November 2013. – Vol. 503. – P. 235–247.
8. P. G. Brown, J. D. Assink, L. Astiz et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*, 14 November 2013. – Vol. 503. – P. 238–241.
9. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*, 29 November 2013. – Vol. 342 No. 6162. – P. 1069–1073.
10. Ionov G. V. The determination of the trajectory of Chelyabinsk bolide according to the records of the drive cams and the simulation of the fragments motion in the atmosphere // *Vestnik ChelGU.* – 2014. – Issue 19. № 1. – P. 30–39.
11. Verhnee Dubrovo station. Upper air sounding at 00:00 UTC 15 Feb 2013 <http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=nac&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=2013&MONTH=02&FROM=1500&TO=1600&STNM=28445>

1-22

## АНАЛИЗ ЗВУКОВЫХ ЗАПИСЕЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ

Г. В. Ионов

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

E-mail: gionov@mail.ru

Каждое деление фрагментов в Челябинском болиде приводило к скачку мощности преобразования кинетической энергии в тепловую за счет возрастания площади поперечного сечения. Такие скачки породили серию ударных волн, достигших поверхности Земли в виде серий скачков давления. Эти возмущения воздушной среды зарегистрированы на видеозаписях микрофонами, а также в виде колебаний стекол, плакатов и автомобильных выхлопов [1].

Разработана методика выделения скачков давления из аудиозаписей по наличию эхо-откликов от окружающих препятствий. Совокупность найденных скачков давления на множестве аудиозаписей используется для поиска методом наибольшего правдоподобия точек деления фрагментов вдоль траектории. Для определения кривых распространения звука, которые согласно принципу наименьшего действия являются кривыми наискорейшего прохождения звука из точки в точку, используется метод Монте-Карло с дихотомическим делением кривой и случайным смещением в пространстве точки деления. Локальная скорость звука вычисляется из температуры воздуха и скорости ветра с учетом профиля атмосферы [2]. С использованием кривой энерговыделения [3] оценивается перепад давления в цилиндрической ударной волне и локальная скорость звука находится с учетом этого перепада давления.

Найденные точки фрагментации и интенсивности скачков энерговыделения могут помочь в выборе модели фрагментации имевшей место в Челябинском болиде.

### Литература

1. Лоскутов Н. Каталог фотографий и видеозаписей Челябинского события. <http://chelyabinskfall.ya.ru/>
2. Метеостанция Верхнее Дуброво. Зондирование атмосферы 00:00 UTC 15 Feb 2013 <http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=nac&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=2013&MONTH=02&FROM=1500&TO=1600&STNM=28445>
3. Brown P. G., Assink J. D., Astiz L. et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*, 14 November 2013. – Vol. 503. – P. 238–241.

## THE BOLIDE SOUND RECORDS ANALYSIS AND RECOVERING OF DETAILS OF THE FRAGMENTS MOVEMENT THE ATMOSPHERE

G. V. Ionov

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

E-mail: gionov@mail.ru

Each splitting of the fragments in the Chelyabinsk bolide led to a jump in the power of converting kinetic energy into heat by increasing the cross-sectional area. Such jumps have generated a series of shock waves that have reached the Earth's surface as a series of pressure shocks. These perturbations of the air environment was recorded with microphones, as well as oscillations of windows, posters and vehicle exhausts [1].

The technique of separation and gain of pressure shocks signal by the help of audio echo responses from the surrounding obstacles was developed. The set of determined pressure shocks is used to find of the fragments splitting points along the trajectory. Curves of the sound propagation determined according to the principle of least action are steepest curves of sound transmission from point to point. To found the curves we using the Monte Carlo method with the dichotomous division of the curve and a random offset in the space of division points. The local sound velocity is calculated from the air temperature and wind speed taking into account the profile of the atmosphere [2]. We using the energy curve [3] to estimate the pressure jump in the cylinder shock wave and the local speed of sound is depends from this pressure jump.

Calculated points of fragmentation and energy intensity jumps can help in choosing a model of fragmentation took place in Chelyabinsk bolide.

### References

1. N. Loskutov. The catalog of photographs and videos of the Chelyabinsk event. <http://chelyabinskfall.ya.ru/>
2. Verhnee Dubrovo station. Upper air sounding at 00:00 UTC 15 Feb 2013 <http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=naconf&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=2013&MONTH=02&FROM=1500&TO=1600&STNM=28445>
3. Brown P. G., Assink J. D., Astiz L. et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature, 14 November 2013. – Vol. 503. – P. 238–241.

высокоточных технологических линий, энергетических станций и подстанций, участков и узлов линий электропередач, важно как можно более полно и точно представить оценки сейсмической опасности и сейсмического риска. В последние десятилетия наметился подход к оценкам сейсмической опасности, который основан на указании не только сейсмической балльности по 12-тибалльным шкалам МСК в масштабах общего, детального и сейсмического микрорайонирования, но и в единицах пиковых ускорений грунтов при землетрясениях. Дополнительный учет длительностей сейсмических колебаний на участке строительства, их частотного состава, поляризации, закона спада амплитудной интенсивности сейсмических волн на линии от очага землетрясения до рассматриваемого участка как за счет геометрического расширения фронта волны, так и за счёт затухания, даёт возможность существенного уточнения оценок сейсмической опасности и сейсмического риска.

Фактор сейсмической уязвимости зданий и сооружений обычно считается неизменным во времени, однако в ряде случаев степень уязвимости объектов из-за износа строительных материалов и конструкций, а также техногенеза, настолько возрастает со временем, что становится необходимым этот фактор учитывать.

Обычно на картах сейсмического районирования указываются зоны максимально возможных интенсивностей землетрясений или пиковых ускорений грунтов. На некоторых из этих карт указываются также средние повторяемости землетрясений и соответствующие максимальные сотрясения грунтов в пределах выделенных зон. Поэтому для обеспечения устойчивости и долговечности срока эксплуатации зданий или сооружений особо ответственного назначения важна не только максимальная интенсивность сейсмических воздействий, также важно принимать во внимание сейсмические колебания всех землетрясений с интенсивностями от наименьшей до наибольшей. Технологии географических информационных систем – ГИС – по своему содержанию приспособлены для послойного представления геоданных для любой заданной точки карты сейсмического районирования на основе использования законов повторяемости землетрясений для всех сейсмогенных зон, которые хорошо известны, например, для территории Таджикистана.

## COMPLETENESS AND ACCURACY OF SEISMIC RISK ASSESSMENTS

F. H. Karimov

Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe

E-mail: farshed\_karimov@rambler.ru

1-23

## ПОЛНОТА И ТОЧНОСТЬ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА

Ф. Х. Каримов

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Академии наук Республики Таджикистан, г. Душанбе

E-mail: farshed\_karimov@rambler.ru

Для обеспечения сейсмобезопасного строительства объектов специального назначения, например, гео- и астрофизических полигонов, различных научных и инженерно-технических испытательных станций,

To ensure seismic safe constructions of special designation, such as geo- and astrophysical polygons, scientific and engineering test grounds, high-precision technological lines, power stations and substations, high power electric lines and equipment, it is important to provide complete and accurate seismic hazard and risk assessments. For the recent decades there has been an approach actively developed to seismic hazard assessments in terms of not only 12-number seismic intensity MSK scale including general,



detailed and micro- seismic zoning, but also in terms of peak ground acceleration during earthquakes. Supplementary inclusion of durations of possible seismic vibrations at the constructions' site, their frequency spectrum, polarization, amplitude intensity decay law of seismic waves along the propagation span from the earthquake source to the site under consideration both by geometrical wave front expanding and by their damping enables significant refinement of seismic hazard and seismic risk assessments.

Factor of seismic vulnerability of buildings and structures is usually considered invariable along with the time, but in some cases the vulnerability degree of objects due to wear of materials and structures, as well as technogenic impacts is increasing with the time so that this factor has to be considered too in seismic hazard and risk assessments.

Usually seismic zoning maps indicate zones of earthquakes with maximum possible intensity or peak ground acceleration. Some of these maps specify average recurrence of earthquakes and corresponding maximum ground shaking within the designated zones. To ensure stability and durability lifetime of buildings or structures of extra responsible designation it is important to indicate not only the maximum seismic intensity, but also to take into account the site ground seismic vibrations from all possible earthquakes with intensities from least to highest. Geographic information systems are duly adapted to stratified geodata representation in terms of content for any given point on the maps of seismic zoning based on use of earthquake recurrence law for all seismogenic zones, well known, for example, on the territory of Tajikistan.

---

1-24

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ  
СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ,  
ВЫТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ПЛОСКОГО  
РАДИАЛЬНОГО СОПЛА**

С. П. Киселев, В. П. Киселев, В. Н. Зайковский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
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 и экспериментов нестационарного истечения сверхзвуковой струи из плоского радиального сопла. Интерес к этой задаче связан с использованием радиальных сопел в методе ХГН для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность труб. В работе [1] приведены результаты экспериментального исследования осредненной (по времени) картины течения. В данной работе приведены результаты исследования нестационарных эффектов, имеющих место при истечении сверхзвуковой струи из плоского радиального сопла.

Сверхзвуковая струя, вытекающая из плоского радиального сопла в затопленное пространство (воздух), резко расширялась на некотором расстоянии от среза сопла. Видеосъемка процесса истечения с экспозицией порядка 4 мкс показала, что резкое расширение струи связано с развитием неустойчивости в струе. В рамках

SST к-омега модели турбулентности с использованием пакета FLUENT были выполнены численные расчеты течения радиальной струи.

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Было показано, что на некотором расстоянии от среза сопла вытекающая струя теряет устойчивость. В струе развиваются изгибные колебания струи, которые приводят к развалу струи. Возникающие в результате развала струи крупномасштабные пульсации имеют трехмерный характер, что подтверждается фотографиями струи, выполненными в трех перпендикулярных плоскостях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-01-00352).

**Литература**

1. Зайковский В. Н., Косарев В. Ф., Клинов С. В., Кавун И. Н., Кундасев С. Г. Исследование сверхзвуковой струи, истекающей из радиального плоского сопла // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. Доклады V Всероссийской конференции. Новосибирск. 26–29 марта 2013 г. Том II: Новосибирск. Параллель. 2013. С. 63–67.

**INVESTIGATION OF UNSTEADY SUPERSONIC  
JET FLOWING FROM A FLAT RADIAL NOZZLE**

S. P. Kiselev, V. P. Kiselev, V. N. Zaikovskii

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

This paper presents the results of numerical calculations and experiments of unsteady supersonic jet flowing from a flat radial nozzle. Interest in this problem associated with the use of radial nozzles in Cold Spray method for coating the inner surface of the pipes. In [1] the results of the experimental study averaged (in time) flow was presented. This paper presents the results of the study of unsteady effects taking place at the flowing of a supersonic jet from a flat radial nozzle. Supersonic jet flowing from a flat radial nozzle in a space (air) dramatically expanded at a certain distance from the nozzle.

Videography of the flowing jet with an exposure of about 4 microsecond showed that the dramatic expansion of the jet associated with the development of instability in the jet. Within the SST k-omega turbulence model using FLUENT package were performed numerical calculations of the radial flow of the jet. Results are in good agreement with experimental data. It was shown that at a certain distance from the nozzle flowing jet loses stability. The bending vibrations of the jet are developing that leads to the destruction of the jet and the large-scale pulsations to appear in the jet. The large-scale pulsations have three-dimensional character, as evidenced by photographs of the jet, made in three perpendicular planes.

This work was partially supported by RFBR (grant N 14-01-00352).

**References**

1. Zaikovskii V.N., Kosarev V.F., Klinkov S.V., Kavun I. N., Kundasev S.G. Investigation of supersonic jet flowing from a radial flat nozzle // Interaction of highly energy flows with

materials in advanced technology and medicine. Reports V Russian conference. Novosibirsk. 26-29 march 2013. Vol. II: Novosibirsk. Parallel. 2013. – P. 63-67.

1-25

**ПАДЕНИЕ КРУПНОГО КОСМИЧЕСКОГО  
ОБЪЕКТА ВО ВНУТРЕННИЙ ВОДОЕМ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
ИМПАКТНОГО ЦУНАМИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА ПРИБРЕЖНУЮ ТЕРРИТОРИЮ**

О. Г. Котова, И. В. Глазырин, В. П. Елсуков,  
А. В. Карпеев, Д. А. Краснослабодцев, В. Н. Ногин,  
В. А. Симоненко, А. В. Хмелев

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

E-mail: ogkotova@vniitf.ru

При столкновении достаточно крупного космического тела с Землёй, при котором основная часть массы тела достигает поверхности Земли, основным разрушающим фактором является сейсмическое воздействие. В тех случаях, когда падение происходит во внутренний водотм, дополнительным разрушающим фактором для прилегающих к водоёму территорий может стать импактное цунами. В работе рассмотрено падение, при котором диаметр сферически симметричного тела на момент входа в воду составляет 24 м, а скорость вхождения 15 км/с. Оценивается соотношение энергий, потраченных на образование кратера на дне водоема и переданных сейсмическим волнам и волне импактного цунами. Рассматривается движение этой волны по прибрежной территории.

**LARGE COSMIC BODY INCIDENT INTO INLAND  
WATER: MODELING OF IMPACT TSUNAMI  
FORMATION AND ITS INFLUENCE ON THE  
NEARSHORE ZONE**

O. G. Kotova, I. V. Glazyrin, V. P. Elsukov,  
A. V. Karpeev, D. A. Krasnoslobodtsev, V. N. Nogin,  
V. A. Simonenko, A. V. Khmelyov

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

E-mail: ogkotova@vniitf.ru

In collision of a large cosmic body with the Earth when the main bulk of the body reaches a ground surface the main destructive factor is a seismic impact. In the case when the body falls into inland water, the accessory destructive factor for nearshore zone could be impact tsunami. The incident of spherically symmetric body of 24 m in diameter with velocity 15 km/s at the moment of interaction with the water is analyzed. Correlations of energies, spent on crater in under-water ground formation and transmitted to seismic waves and impact tsunami, are evaluated. Motion of the wave over the nearshore zone is treated.

1-26

**ОСОБЕННОСТИ ГИПЕРЗВУКОВОГО  
ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

В. Г. Лупанов

Челябинский государственный университет,  
Челябинск, Россия

E-mail: VICTR@CSU.RU

За последние полтора года, с момента появления Челябинского болида, опубликовано большое количество работ посвященных этому событию. Материалы видеорегистрации позволили определить временные и пространственные координаты траектории движения метеороида с ее характерными особенностями. Была проведена работа большим количеством любителей и профессионалов по сбору фрагментов метеорита, проведению анализа их структуры, состава физико-химических свойств.

На основе этих данных предлагается гипотеза о возможном сценарии развития аэродинамических и тепло-массообменных процессов, предшествующих разрушению основного тела метеороида на фрагменты. Для обоснования сделанных гипотез о протекающих физических процессах планируется оценка общего энергобаланса явления, моделирование гиперзвукового обтекания тела воздушным потоком с целью определения параметров аэродинамического и теплового нагружения тела, оценка скорости прогрева тела с учетом абляции и оценка параметров энерговыделения на участке траектории, связанной с разрушением на фрагменты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант № 13-01-00072.

**HYPERSONIC PECULIARITIES OF THE BODY  
MOVEMENT IN THE EARTH'S ATMOSPHERE**

V. G. Lupanov

Chelyabinsk, Russia

E-mail: VICTR@CSU.RU

For the last one and a half year, since Chelyabinsk's bolide has appeared, a lot of works dedicated to this event have been published. Video registration materials had allowed to fix temporal and spatial coordinates of the motion path of the meteorite with his typical peculiarities. A big work had been done by many amateurs and professionals in order to gather fragments of the meteorite, analyze its structure and physicochemical mixture.

On the basis of these facts, a hypothesis has been suggested of the possible scenario of the development of the aerodynamical and heat-mass-transfer processes that forego the destruction of the main body of the meteorite on the fragments. In order to prove the stated hypothesizes about proceeding physical processes, it is planned to estimate the total power balance of the phenomenon, to model a hypervelocity flow around the body by the windstream, for the purpose of fixing aerodynamical and thermal characteristics of the loading body, and to size up velocity of the heating up of the body taking into account ablation, and, moreover, to estimate energy release parameters on the

trajectory which is connected with the destruction of the meteorite on the fragments.

The work is done with the RFBR support. Grant № 13-01-00072.

---

1-27

### ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕГРАД НА ГЛУБИНУ ВНЕДРЕНИЯ УДАРНОГО ЯДРА

А. С. Мазур<sup>1</sup>, К. А. Рудомёткин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mazuras@mail.ru

Представлены результаты по изучению влияния стандартных механических характеристик материалов преград при растяжении ударной вязкости и трещиностойкости на глубину внедрения ударного ядра из меди марки М1 с начальной скоростью соударения  $v_0=2$  км/с. В результате проведенных исследований установлено, что не существует общей связи между механическими характеристиками и глубиной внедрения. Результаты испытания рассматривались в двух группах металлов одного класса (стали, алюминиевые сплавы) – пластичные и хрупкие. Для сталей это разбиение нужно производить в определённых диапазонах уровней прочности: низкой, средней и высокой. В качестве параметра, который относит материал к пластичной или хрупкой группе, выбрано относительное удлинение  $\delta_5$  при растяжении. Для пластичных металлов существует связь между глубиной внедрения и характеристиками сопротивления деформированию (пределом текучести, пределом прочности и твёрдости): чем больше характеристика сопротивления, тем меньше глубина внедрения. Для преград из хрупких металлов – чем больше ударная вязкость, тем меньше глубина внедрения. С ростом предела прочности для высокопрочных сталей глубина внедрения является немонотонной функцией предела прочности: с его ростом глубина до некоторого значения предела прочности уменьшается, затем начинает увеличиваться. Предполагается, что обнаруженный эффект немонотонности связан с появлением впереди внедряющегося с высокой скоростью ударного ядра трещины, которая обгоняет его, и, тем самым, облегчает ему условия проникания. Косвенным свидетельством данной гипотезы служит корреляция между глубиной внедрения и критическим коэффициентом интенсивности напряжений  $K_{IC}$  (трещиностойкостью) высокопрочных сталей и глубиной внедрения: чем меньше  $K_{IC}$ , тем больше глубина внедрения.

Проведенные микроструктурные исследования (с помощью методов световой металлографии) преград из высокопрочных сталей также показали высокую трещиноватость (практически без признаков пластической деформации) материала в точке стагнации преграды и ударного ядра. В пластичных преградах выявлены

эффекты стадийности процесса проникания, которые характеризуются узловыми точками на берегах каверны.

### INFLUENCE OF METALL BARRIER MECHANICAL PROPERTIES AT A PENETRATION DEPTH OF STRIKING BALL

A. S. Mazur<sup>1</sup>, K. A. Rudometkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State Technological Institute (technical university), Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Special design-engineering bureau Technolog, Saint Petersburg, Russia

E-mail: mazuras@mail.ru

The results of influence research of standard mechanical properties of metal barriers under stretching, resilience, resistance to cracking at a penetration depth of striking ball from copper M3 at impact initial velocity of  $V_0=2$  km/sec. Due to performed research is found that mechanical properties and penetration depth are not generally related. The research results are given from two groups of one class metal (steel, aluminum alloy), malleable and brittle. Necessary to differentiate steels by certain ranges of tensile strength level: low, moderate and high. The identification characteristic of material group malleable or brittle is an extension ratio  $\delta_5$  during stretching. There is a relation for malleable metals between penetration depth and deformation resistance (yield point, tensile strength limit and toughness limit): the more resistance characteristic the less penetration depth. For barriers from brittle metals is the more resilience the less penetration depth. With increasing tensile strength limit the penetration depth for high tensile strength steels is nonmonotonous function of tensile strength limit: with increasing tensile strength limit the penetration depth decreasing to certain value and after starts increasing. It is suggested that the founded nonmonotonous effect is related with appearance of a crack in front of striking ball with high speed penetration; the crack overruns the ball and makes the penetration easier. An indirect proof of such suggestion is a correlation between penetration depth and critical stress intensity factor  $K_{IC}$  (resistance to cracking) for high tensile strength steels; the less  $K_{IC}$  the more the penetration depth.

Performed microstructural research (light metallography) of barriers from high tensile strength steels showed high material jointing (actually without signs of structural yielding) at stagnation point of the barrier and the striking ball. In malleable barriers stage penetration effects are found that are described by adjacent nodes at cave edges.

---

1-28

## ДВИЖЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА В АТМОСФЕРЕ

А. Е. Дудоров, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет,  
Челябинск, Россия

E-mail: mayer@csu.ru

Челябинский болид представляет собой пример интенсивного энерговыделения природного происхождения с полной выделившейся энергией порядка 500 клотонн тротилового эквивалента [1]. Явление сопровождалось яркой вспышкой и ударной волной в воздухе, вызвавшей повреждения стекол зданий даже на расстояниях в несколько десятков километров от траектории метеороида. Представленное исследование посвящено объяснению взрывообразного характера энерговыделения Челябинского метеороида на высотах более 20 км от поверхности земли. Проведено численное моделирование движения, абляции и разрушения метеороида в атмосфере, при этом использовались стандартные упрощенные подходы метеоритной астрономии [2–4]. Получено соответствие результатов расчетов наблюдательной кривой блеска [1] и данным [5] по избыточному содержанию пыли в атмосфере (за счет абляции метеороида).

Резкий рост энерговыделения метеороида на высотах между 45 и 25 км (кинетический взрыв) является следствием его механического разрушения, а не наоборот. Разрушение обусловлено механическими напряжениями в метеороиде, возникающими за счет давления потока воздуха на его переднюю поверхность. Челябинский метеороид изначально был крайне неоднороден по своим механическим свойствам – он содержал рыхлые области с низкой механической прочностью. Это привело к развитию двух каскадов разрушения – на высотах 55–50 км и 40–35 км соответственно. Интенсивное испарение метеороида имело место на высотах от 50 км до 25 км с максимумом на 33 км; абляция должна происходить в основном в форме испарения, полная аблированная масса составила порядка 99,5% начальной массы.

### References

1. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V. et al. // *Science*. – 2013. – V. 342, No. 6162. – P. 1069.
2. Baldwin B., Sheaffer Y. // *J. Geophys. Research*. – 1971. – V. 76, No. 19. – P. 4653.
3. Svetsov V. V., Nemtchinov I. V., Teterev A. V. // *Icarus*. – 1995. – V. 116. – P. 131.
4. Popova O. // *Earth Moon Planets*. – 2004. – V. 95. – P. 303.
5. Gorkavyi N., Rault D. F., Newman P. A., da Silva A. M., Dudorov A. E. // *Geophys. Res. Lett.* – 2013. – V. 40. – P. 4728.

## MOTION AND FRACTURE OF CHELYABINSK METEOROID IN ATMOSPHERE

A. E. Dudorov, A. E. Mayer

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: mayer@csu.ru

The asteroid impact near Chelyabinsk is an example of intensive energy release of natural origin with the total energy of about 500 kT of TNT [1]. It initiates bright flash and shock wave in air, which cause glass damage even on distance of several tens of km away from the meteoroid trajectory. Present research is dedicated to explanation of an explosion-like energy release of the Chelyabinsk meteoroid at altitudes above 20 km from the ground surface. Numerical modeling of motion, ablation and fracture of the meteoroid in atmosphere has been done on the basis of standard approaches used in the meteoritic astronomy [2–4]. A correlation with the observed light curve [1] and the excess dust distribution in atmosphere [5] has been obtained.

A sharp increase of the meteoroid energy release at altitudes between 45 and 25 km (a kinetic explosion) is a consequence of its mechanical fracture, but not vice versa. The fracture is caused by mechanical stresses in the meteoroid created by air pressure on its front surface. Chelyabinsk meteoroid initially was highly inhomogeneous with respect to its mechanical properties—it contained friable areas with low mechanical strength. It led to presence of two fracture cascades—at altitudes 55–50 km and 40–35 km respectively. An intensive ablation of the meteoroid substance took place at altitudes from 50 km down to 25 km with the maximum at 33 km; the ablation was mainly in the form of vaporization; the total ablated mass is 99.5% of the initial mass.

### References

1. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V. et al. // *Science*. – 2013. – V. 342, No. 6162. – P. 1069.
2. Baldwin B., Sheaffer Y. // *J. Geophys. Research*. – 1971. – V. 76, No. 19. – P. 4653.
3. Svetsov V. V., Nemtchinov I. V., Teterev A. V. // *Icarus*. – 1995. – V. 116. – P. 131.
4. Popova O. // *Earth Moon Planets*. – 2004. – V. 95. – P. 303.
5. Gorkavyi N., Rault D. F., Newman P. A., da Silva A. M., Dudorov A. E. // *Geophys. Res. Lett.* – 2013. – V. 40. – P. 4728.

1-29

## ОБ ОДНОЙ НОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КОНТАКТНОГО РАЗРЫВА

А. Ю. Микулин, С. Е. Куратов

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

E-mail: botsman1990@mail.ru

На данный момент известно несколько физических процессов, для удовлетворительного теоретического описания которых переход из горения в детонацию является необходимым. Наиболее общепринятой причиной данного перехода считается турбулизация фронта

горения. Процесс её возникновения, тем не менее, до сих пор остается неясным. В настоящей работе предлагается рассмотрение возможного механизма, объясняющего данное явление.

Суть этого механизма заключается в развитии неустойчивости на границе раздела активной и пассивной сред. Под активной средой понимается вещество, в котором происходят реакции с образованием высокоэнергетических частиц.

Для анализа данной неустойчивости в работе был использован гидродинамический подход. С помощью метода Чепмена – Энскага определены условия, при выполнении которых этот подход правомерен. Путём оценок сделан вывод о значительности вклада рассмотренной неустойчивости в процесс турбулизации фронта горения для некоторых физических процессов.

### ABOUT ONE INSTABILITY OF CONTACT DISCONTINUITY

A. Yu. Mikulin, S. E. Kuratov

Dukhov FSUE VNIIA, Moscow, Russia

Several physical processes necessarily described by deflagration to detonation transition are currently known. Turbulization of deflagration front is believed to be the most commonly accepted reason for this transition. However the process, originating it, is still unclear. Current study discusses possible mechanism elucidating this phenomenon.

This mechanism essentially implies development of instability on the interface of active and passive media. Here active media is the matter where reactions generating high-energy particles transpire.

We used hydrodynamic approach for analysis of this instability. Using Chapman-Enskog method we determined conditions under which this approach is valid. In terms of estimates we made a conclusion that contribution of this instability to the process of deflagration front turbulization is significant for some physical processes.

го материала ограничена газодинамическим пределом, связанным с разрушением материала струи при возникновении «внутреннего взрыва» при соударении материала облицовки на оси симметрии заряда.

При новом режиме формирования кумулятивной струи (предложенного и развиваемого авторами) [1] без точки полного торможения с образованием внутренней зоны постоянного давления – застойной зоны, масса струи всегда больше массы песта. За счет перераспределения газодинамических параметров в области разворота потока устраняются условия разрушения формируемой кумулятивной струи за счет «внутреннего взрыва» и скорость струи может существенно превышать газодинамический предел при плотности материала струи порядка плотности материала облицовки, что ранее в мире считалось невозможным. Следует ожидать сглаживающего влияния такой зоны на развитие различного рода возмущения, в частности, сглаживание Релей-Тейлоровской неустойчивости для тонких облицовок.

Принципиальной новизной предлагаемого подхода к решению задачи образования кумулятивных струй с недостижимыми в классической схеме параметрами будет то, что разворот потока материала облицовки будет происходить до схлопывания его на оси симметрии, с углом схлопывания материала кумулятивной облицовки будет больше 180 градусов, что невозможно в известных схемах течения. Это позволит управлять параметрами струи (увеличение массы, радиуса и импульса по сравнению с известными в мировой практике схемами) в крайне широких пределах и открывает новые возможности в технике и технологиях.

В работе приведены результаты предварительных исследований методом вычислительного эксперимента, подтверждающие основные положения нового режима струеобразования.

### Литература

В. Ф. Минин, И. В. Минин, О. В. Минин. Способ и устройство (варианты) формирования высокоскоростных кумулятивных струй для перфорации скважин с глубокими незапестованными каналами и с большим диаметром. Патент РФ 2412338. Опубликовано: 20.02.2011, Бюл. № 5

1-30

### ФИЗИКА КУМУЛЯЦИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ГИПЕРКУМУЛЯТИВНОГО РЕЖИМА СТРУЕОБРАЗОВАНИЯ

В. Ф. Минин, О. В. Минин, И. В. Минин

Сибирская государственная геодезическая академия,  
Новосибирск, Россия

E-mail: Prof.minin@gmail.com

Согласно гидродинамической теории Лаврентьева - Биркгофа формирования кумулятивных струй в кумулятивных зарядах, скорость струи возрастает с уменьшением угла раствора облицовки с одновременным уменьшением массы струи и увеличением массы песта. В классических кумулятивных зарядах невозможно получение высоких масс и скоростей струи в «низких» облицовках, а максимальная скорость струи для данно-

### PHYSICS OF CUMULATION: THE FUTURE OF HYPERCUMULATIVE REGIME OF JET FORMATION

V. F. Minin, O. V. Minin, I. V. Minin

Siberian State Academy of Geodesy  
Plahotnogo ave, NovosibirskRussia

E-mail: Prof.minin@gmail.com

According to the hydrodynamic Lavrentiev – Birkhoff theory of cumulative jets formation in the shaped charges, jet velocity increases with decreasing angle of liner while reducing the mass of the jet and the increase in mass of slug. In classical shaped charges it is impossible to obtain high mass and velocity of the jet in the “low” liners (with big angle), and the maximum velocity of the jet for a given material is limited to gas-dynamic limit relating to the material destruction of the jet in the event of “internal

explosion” in the collision lining material on the axis of symmetry of the charge.

Under the new regime of a cumulative jet formation (proposed and developed by the authors) [1] without a point of complete inhibition with the formation of the inner zone of constant pressure – the stagnation zone, the mass of the jet is always more than mass of slug. By reallocating of the dynamic parameters in the region of flow conditions for the destruction formed eliminated cumulative jet due to “internal explosion” and the jet velocity can greatly exceed the limit of the gas-dynamic with the material density of the jet is almost equal to the density of liner material that previously considered impossible in the world. We should expect the smoothing effect of such a zone in the development of various kinds of perturbations, in particular, smoothing Raleigh – Taylor instability for thin liners.

The principal novelty of the proposed approach to solving the problem of cumulative jets with unreachable in the classical scheme parameters is that reversal of liner materials flow will be lining up to its collapse on the axis of symmetry, with the angle facing collapse cumulative material will be more than 180 degrees, which is impossible in conventional flow diagrams. This will control the parameters of the jet (increase the mass, radius, and pulse as compared to known schemes in the world) in a very wide range and opens up new opportunities in engineering and technology.

The results of preliminary studies by numerical experiments confirm the main provisions of the new regime of cumulative jet formation.

#### Reference

V. F. Minin, I. V. Minin, O. V. Minin. Procedure and device (versions) for generation of high-velocity jet streams for perforation of wells with deep unlined channels and large diameter. Patent RU 2412338. Published 20.02.2011, Bull. 5.

---

1-31

### ГИДРОДИНАМИКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЗАСЛОНКИ

А. К. Музыря

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

E-mail: A.K.MUZYRYA@VNIITF.RU

Изложена инженерная теория вращательного движения диска в среде с гидродинамическим сопротивлением. Основу теории составляют соответствующие дифференциальные уравнения движения. Для них по экспериментальным данным определен коэффициент сопротивления жидкости и рассчитан момент распределенной по диску силы сопротивления.

Практическое использование теории состоит в применении к разработке быстродействующих устройств (заслонок), перекрывающих сечения различных каналов (например, трубопроводов).

Отличительной особенностью рассматриваемых заслонок является применение в них взрывного привода, содержащего несколько граммов взрывчатого вещества.

В итоге показана возможность перекрытия потоков за времена порядка 0,1 с.

### HYDRODYNAMICS OF QUICK VALVE

A. K. Muzyrya

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

E-mail: A.K.MUZYRYA@VNIITF.RU

The engineering theory of disk rotation in medium with hydrodynamic resistance is presented. The corresponding differential equations of motion form the basis of the theory. The coefficient of liquid resistance was determined for them by the experimental data and the moment of the resistance force distributed along the disk was calculated.

Practical use of the theory consists in the application of high-speed units (shutters) blocking the cross-sections of various channels (for example, pipelines) to the development.

The distinctive feature of the considered shutters is application of several grammes of explosive in them as the actuator. As a result the possibility of the streams blocking for times of the order of 0.1 s was demonstrated.

---

1-32

### ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ИНДУЦИРОВАННАЯ ДЕФЕКТАМИ, В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

О. Б. Наймарк, С. В. Уваров,  
И. А. Банникова, И. А. Пантелеев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

E-mail: naimark@icmm.ru

Условия ударно-волнового эксперимента дают уникальную возможность исследования влияния структуры жидкостей на релаксационные процессы на масштабах ударно-волнового фронта ( $10^{-8}$ – $10^{-7}$  м), на которых механизмы собственно гидродинамического течения не успевают реализоваться [1–3]. На этих масштабах возможен анализ роли мезоскопических структурных механизмов, которым уделяется значительное внимание в современных «гидродинамических» подходах турбулентности, когда наблюдается изменение глобальных свойств системы в условиях развитой турбулентности [4, 5]. Турбулентность обнаруживает при этом универсальные статистические свойства для глобальных (интегральных) характеристик течения – степенная универсальность распределения мощности в замкнутых областях турбулентного течения (по схеме Кармана) в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re \sim 10^5$ – $10^9$ , что позволило сделать вывод об универсальности сценария развития турбулентного течения при подчинении последнего ограниченному количеству конечно-амплитудных мод возмущений потока. Аналогичный результат был получен в [6] при анализе статистики флуктуаций при пластическом деформировании сплава AlMg, обна-

руживающего стохастическую динамику напряжения пластического течения. Волна сжатия в дистиллированной воде инициировалась электровзрывом медного проводника в цилиндрической камере, измерение скорости проводилось с использованием оптоволоконной системы VISAR на различных расстояниях от места инициирования волнового импульса. Целью настоящего экспериментального исследования является изучение закономерностей нарастания волновых фронтов в жидкости и проявлений автомодельности, аналогичной степенной универсальности нарастания пластического волнового фронта в твердых телах [6, 7]. Полученный результат, подтвердивший степенную зависимость скорости деформации от амплитуды напряжений с показателем 3,2 при формировании волновых фронтов в жидкостях, позволяет высказать предположение о роли конечно-амплитудных возмущений, индуцированных дефектами, в проявлениях глобальной универсальности турбулентных течений жидкостей и реализации механизма переноса импульса и развития неустойчивостей, аналогичных наблюдаемым при пластическом течении в твердых телах [8].

#### Литература

1. Сахаров А. Д., Зайдель Р. М., Минеев В. Н., Олейник А. Г. Докл. АН СССР. – 1964. – Т. 159, № 5. – С. 1019.
2. Минеев В. Н., Зайдель Р. М. ЖЭТФ. – 1968. – Т. 54, № 6. – С. 1634.
3. Наймарк О. Б. Письма в ЖЭТФ. – 1998. – Т. 67, № 9. – С. 751.
4. Bramwell S. T., Holdsworth P. C. W. and J.-F. Pinton. Nature. – 1998. – Vol. 396. – P. 552.
5. Pinton J.-F. and Holdsworth P. C. W. Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. 60, n. 3. – P. 2452.
6. Froustey C., Наймарк О. Б., Пантелеев И. А. Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2, № 3. – С. 70.
7. Наймарк О. Б., Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13, № 5. – С. 113.
8. Naimark O. B., Defect Induced Transitions as Mechanisms of Plasticity and Failure in Multifield Continua. In: Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure, Ed. G. Capriz and P. Mariano, Birkhäuser, Boston, 2004. – P. 75.

#### DEFECTS-INDUCED TURBULENCE IN CONDENSED MATTER UNDER INTENSE IMPACTS

O. B. Naimark, S. V. Uvarov,  
I. A. Bannikov, I. A. Panteleev

Institute of Continuous Media Mechanics UrB RAS,  
Perm, Russia

E-mail: naimark@icmm.ru

Conditions of shock-wave experiment provide unique opportunities in terms of research of liquid structure influence on relaxation processes in the scale of shock-wave front ( $10^{-8}$ – $10^{-7}$  m), where mechanisms of hydrodynamic flow as such do not have enough time to take place [1–3]. One can analyze the role of mesoscopic structural mechanisms in this scale, mechanisms that are the focus in today's "hydrodynamic" approaches to turbulence, when global properties of the system are changed in conditions of well-developed turbulence [4, 5]. Thus turbulence has universal statistical properties of global (integral) flow fea-

tures such as exponential universality of power distribution in closed domains of turbulent flow (according to Karman's scheme) in the range of Reynolds numbers  $Re \sim 10^5$ – $10^9$ , that allows conclusion about universal scenario of turbulent flow evolution when it is governed by limited number of finite-amplitude modes of flow disturbances. Similar results were observed in paper [6] within analysis of fluctuation statistics at plastic strain of AlMg alloy, having stochastic dynamics of plastic flow stress. Compression wave in distilled water was initiated by electric explosion of copper wire in cylindrical chamber, velocity was measured using VISAR optic fiber system at varying distance from wave pulse initiation. Study of regularities of wave fronts growth in liquid and phenomena of self-similarity similar to exponential universality of plastic wave front growth in solids [6, 7] was the purpose of current experimental study. Our results confirming exponential dependence of strain rate on stress amplitude with exponent 3.2 at formation of wave fronts in liquids allows assumption about the role of finite-amplitude disturbances induced by defects in phenomena of global universality of turbulent flows of liquids and implementation of mechanism of momentum transfer as well as development of disturbances similar to observed at plastic flows in solids [8].

#### References

1. Sakharov A. D., Zaidel R. M., Mineev V. N., Oleynik A. G. Doklady AN SSSR. – 1964. – Vol. 159, No 5. – P. 1019. (in Russian).
2. Mineev V. N., Zaidel R. M. JETP. – 1968. – Vol. 54, No 6. – P. 1634. (in Russian).
3. Naimark O. B. Pisma v JETP. – 1998. – Vol. 67, No 9. – P. 751.
4. Bramwell S. T., Holdsworth P. C. W. and J.-F. Pinton. Nature. – 1998. – Vol. 396. – P. 552.
5. Pinton J.-F. and Holdsworth P. C. W. Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. 60, n. 3. – P. 2452.
6. Froustey C., Naimark O. B., Panteleev I. A. Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. – 2009. – Vol. 2, No 3. – P. 70. (in Russian).
7. Naimark O. B. Fizicheskaya mesomekhanika. 2010. Vol. 13, No 5. P. 113. (in Russian).
8. Naimark O. B., Defect Induced Transitions as Mechanisms of Plasticity and Failure in Multifield Continua. In: Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure, Ed. G. Capriz and P. Mariano, Birkhäuser, Boston, 2004. – P. 75.

1-33

#### ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ПРОНИКАНИЯ КС В ГОРНЫЕ ПОРОДЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОНИКАНИЯ

А. Г. Нескин, А. Н. Зеленов

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

E-mail: neskinag@gmail.com

В докладе приведены результаты исследований влияния материала струи, ее плотности и скорости на глубину проникания в горную породу с учетом переходных

процессов происходящих в породе под воздействием высокоскоростного проникания.

Приведены результаты расчетной оценки проникания КС в кварцевую породу и зависимость глубины проникания от материала струи, скорости струи и таких параметров породы как, прочность, сжимаемость, пористость и упруго-вязкие свойства, а так же наличия фазовых переходов, обусловленных ударно-волновым воздействием.

В качестве образца горной породы рассмотрен кварц, который при высоких давлениях имеет две переходные фазы отличающиеся плотностями, 2,9 г/см<sup>3</sup> и 4,3 г/см<sup>3</sup>, соответственно.

Для сравнения приведены расчеты проникания КС в кварц, бетон и в алюминиевую преграду с учетом сжимаемости преграды.

Результаты исследований позволили оценить оптимальное распределение скорости вдоль струи, минимальную и максимальную скорость проникания КС, при которых глубина проникания струи в преграду из имитатора горной породы является максимальной.

Результаты позволяют оптимизировать конструкцию заряда с целью увеличения его пробивной способности.

**ESTIMATED MAXIMUM SPEED  
OF SHAPED-CHARGE JET PENETRATION  
INTO THE ROCK AND OPTIMIZATION  
OF SPEED DISTRIBUTION TO INCREASE  
PENETRATION DEPTH**

A. G. Neskin, A. N. Zelenov

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

E-mail: neskinag@gmail.com

Effect of the material, density, and speed of a jet on the depth of its penetration into the rock was investigated taking into account transition processes occurring in the rock due to high-speed penetration and results of this investigation are presented.

The paper also presents estimated shaped-charge jet penetration into the quartz rock and how penetration depth depends on the jet material and speed, such rock parameters as strength, compressibility, porosity, and elastic-viscous properties as well as phase transitions induced by shock action.

Quartz is taken as a rock sample since under high pressure it has two transition phases with different densities, i.e. 2.9 g/cm<sup>3</sup> and 4.3 g/cm<sup>3</sup>, respectively.

For comparison, the paper provides estimated shaped-charge jet penetration into quartz, concrete, and an aluminum barrier with its compressibility taken into account.

Investigation results allowed estimation of the optimal speed distribution along the jet, the minimal and maximal speed of the shaped-charge jet penetration whereat the depth of jet penetration into the rock simulator barrier is a maximum one.

The results allow the design of the charge to be optimized as to increase its penetrability.

1-34

**Пороховой генератор давления для  
импульсно-волнового воздействия  
на призабойную зону продуктивного  
пласта с целью интенсификации  
притока флюидов в скважину**

А. Г. Нескин, А. Н. Зеленов, М. Л. Соколов

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

E-mail: neskinag@gmail.com

В докладе приведены конструкция и технические характеристики разработанного порохового генератора давления для использования в нефтяных и газовых скважинах с целью повышения нефтегазоотдачи продуктивных пластов.

Под воздействием избыточного давления пороховых газов порядка 500 атм., создаваемых генератором в скважине, что в два раза превышает пластовое давление, происходит растрескивание породы

Для эффективного выполнения разрыва пласта с образованием сети трещин рекомендуется проведение предварительной перфорации перфорационными системами ПМИ90-03,-06,-08 с зарядами большого отверстия(БО).

Приведен оценочный расчет остаточных длины и ширины трещины образующейся в породе под воздействием избыточного давления пороховых газов генератора. При необратимой деформации горной породы в случае когда давление газов двукратно превышает пластовое давление полная деформация складывается из упругой  $\epsilon_e$  и пластической  $\epsilon_p$  составляющих  $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$ .

Трещина после снятия с ее контура постоянной нагрузки полностью не смыкается. Протяженность образовавшейся остаточной трещины составляет от 2 до 20 м, шириной от 2 до 4 мм.

**POWDER PRESSURE GENERATOR FOR  
PULSED-WAVE IMPACT ON THE WELLBORE  
AREA OF A PRODUCING FORMATION  
TO STIMULATE FLUID INFLOW**

A. G. Neskin, A. N. Zelenov, M. L. Sokolov

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

E-mail: neskinag@gmail.com

The paper presents the design and technical characteristics of our powder pressure generator developed for application in oil and gas wells to increase oil and gas recovery of producing formations.

In a well, the powder pressure generator produces powder gases with up to 500 atm overpressure that causes the rock fracturing as it two times exceeds the formation pressure.

Preliminary perforation with the help of perforating guns PMI90-03,-06, and -08 having the big-hole charges is recommended in order the bed fracturing with the formation of fracturing pattern could be efficient.



The residual length and width of a fracture formed in the rock due to the excess pressure of powder gases from the generator were estimated and this estimation is presented. In the case of irreversible deformation of the rock when gases pressure two times exceeds that of the producing formation, the total deformation is the sum of elastic  $\varepsilon_e$  and plastic  $\varepsilon_s$  constituents.

After removal of a constant load from the periphery, a fracture fails to completely close. The length of the formed residual fracture varies from 2 up to 20 m with the 2–4 mm width.

---

1-35

## О ПРИРОДЕ ВЗРЫВОВ ЧЕЛЯБИНСКОГО И ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТОВ

А. А. Потапов<sup>1</sup>, Ю.К. Евдокимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань Россия  
E-mail: potapov@cplire.ru, evdokimov1@mail.ru

Падение Челябинского метеорита вызвало интерес научной общественности к объяснению природы мощного взрыва, приведшего к столь значительным разрушениям. В свою очередь, челябинский феномен вызвал и новый всплеск интереса к множеству версий и вариантов, объясняющих гигантский взрыв Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. Несомненно, большое сходство явлений позволяет рассматривать вместе эти два феномена. В нашем докладе предлагается новая гипотеза, объясняющая физическую природу взрывов Челябинского и Тунгусского метеоритов, не противоречащая классическим научным представлениям.

Авторы при этом придерживаются методологического принципа Оккама: «Не следует привлекать новые сущности без необходимости» для объяснения, в нашем случае, природы этих взрывов. В рамках предлагаемой гипотезы объединены и непротиворечиво разрешены следующие особенности взрывов и сопутствующих явлений этих феноменов:

Механизм и источник колоссальной мощности взрывов и разрушений, не объяснимые только мощностью возникшей ударной волны, как результат преобразования кинетической энергии при торможении метеорита в атмосфере.

Фактически полное отсутствие метеорного вещества Тунгусского метеорита и весьма незначительное количество найденного вещества Челябинского метеорита при их начальных огромных массах.

Образование и яркое свечение серебристых облаков задолго (за три дня, начиная с 27 июня) до падения Тунгусского метеорита.

В докладе обоснованы механизмы образования и генерации дополнительной взрывчатой газовой компоненты при падении метеорита, приведшей к объемному распределенному взрыву с большим разру-

шительным потенциалом, соизмеримым или намного превосходящим мощность ядерного взрыва. Приведены соответствующие количественные оценки.

## ABOUT THE NATURE OF CHELYABINSK AND TUNGUSKA METEORITE

A. A. Potapov<sup>1</sup>, Yu. K. Evdokimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics, Russia, Moscow,

<sup>2</sup>Tupolev Kazan National Research Technical University, Russia, Kazan

E-mail: potapov@cplire.ru, evdokimov1@mail.ru

Fall of Chelyabinsk meteorite aroused interest of scientific community to describe a nature of the powerful explosion which caused significant consequences. In its turn, Chelyabinsk phenomenon causes also new splash of interest to big count of versions and variants describing the giant explosion of Tunguska meteorite in June 30th, 1908. Undoubtedly, a big similarity of these scenes allows to consider these two phenomena together. New hypothesis about the nature of physical nature of Chelyabinsk an Tunguska meteorite is proposed in our report, which doesn't counter to the classical scientific ideas.

Authors adhere to the methodological principle of Occam: "It shouldn't required to involve new entities without necessity" to explain, in our case, the nature of explosions. Within an author proposed hypothesis there are merged and directly solved the following peculiarities of explosions and accompanying effects of the phenomena:

The mechanism and a source of colossal power explosions and destructions inexplicable only by power of arisen blast as result of kinetic energy conversion during meteorite damping in atmosphere.

Actually full lack thereof of meteorite substance of Tunguska meteorite and very small volume of found substance of Chelyabinsk meteorite with its giant initial mass.

Appearance and bright glow of silver clouds well before (three days before, from June 27th) fall of Tunguska meteorite.

In the report mechanisms of formation and generation of additional explosive gas component during fall of meteorite led to volumetric distributed explosion with big destruction potential comparable or far superior the power of a nuclear explosion there are substantiated. The corresponding quantitative estimates are shown.

---

1-36

**О ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ  
ОПАСНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ  
ПРИБЛИЖАЮЩИХСЯ К ЗЕМЛЕ  
СО СТОРОНЫ СОЛНЦА**

М. Е. Прохоров, А. И. Захаров

Государственный астрономический институт имени  
П. К. Штернберга, Московский государственный  
университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: mike@sai.msu.ru

Одной из составных частей программы противодействия астероидно-кометной опасности является обнаружение объектов сближающихся с Землей. Опасными считаются тела, размер которых превышает 100 м. Опасные тела, впервые сближающиеся с Землей, необходимо обнаруживать заранее для того, чтобы успеть принять меры противодействия. Падение опасного тела с размерами близкими к 500 м вызывает локальную катастрофу на расстояниях до нескольких десятков километров от места падения. Для таких событий помимо активного воздействия (изменение орбиты или разрушение астероида) возможны пассивные меры, например, проведение эвакуации. Для ее успешного проведения необходимо с высокой точностью определить траекторию движения объекта и предсказать место его падения. После этого проводятся необходимые мероприятия противодействия. Поскольку на них необходимо отвести не менее 10–15 дней, опасный объект должен быть обнаружен минимум за 20–30 дней до столкновения.

Один из наиболее действенных методов обнаружения опасных космических тел является непрерывный систематический обзор небесной сферы. При этом окрестности Солнца (порядка  $\sim 30^\circ$ ) недоступны для наблюдений из-за высокой засветки.

Траектории некоторой части объектов, сталкивающихся с Землей, в последние 30 дней перед столкновением лежат именно в этом в недоступном наблюдениям  $30^\circ$  конусе вокруг направления на Солнце.

Расчеты показывают, что примерно 60% опасных объектов, приближающихся из  $30^\circ$  околосолнечной области (она занимает 13,4% площади небесной сферы), могут быть обнаружены на более ранних этапах полета (более чем за 30 суток до столкновения с Землей) во время обзора остальной части неба небесной сферы.

Существуют два семейства опасных объектов, у которых траектории движения не проходят через область пространства, доступную для наблюдений.

Если улучшить характеристики целевой аппаратуры КА таким образом, чтобы наблюдения опасных объектов можно было вести на угловом расстоянии до  $15^\circ$  от направления на Солнце, то одно из двух «ненаблюдаемых» семейств объектов полностью исчезнет, а второе семейство сократится более чем в 2 раза.

**POSSIBILITY OF DETECTION  
FOR HAZARD COSMIC BODIES APPROACHING  
THE EARTH FROM THE SUN SIDE**

M. E. Prokhorov, A. I. Zakhsrov

Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State  
University, Moscow, Russia

E-mail: mike@sai.msu.ru

One of the components of a counteraction program to asteroid-comet hazard is the detection of near-Earth objects. The hazards of the body that are larger than 100 m. Dangerous body, first fly-by near the Earth, it is necessary to detect in advance in order to have time to take measures of counteraction. Fall dangerous body with dimensions close to 500 m produces a local disaster at distances up to several tens of kilometers from the crash site. For such events, besides the active effects (destruction of an asteroid or a change its orbit) may be passive measures, such as evacuation. For successful evacuation is necessary to accurately determine the trajectory of the object and to predict the location of its fall. After that taking the necessary measures of counteraction. Because they need to take at least 10-15 days, a dangerous object to be detected at least 20-30 days before the fall.

One of the most effective methods for the detection hazardous cosmic bodies is ongoing systematic survey of the celestial sphere. Solar neighborhood (about  $\sim 30^\circ$ ) are not available for observation because of the high illumination.

The trajectory of some part of the colliding with the Earth objects in the last 30 days before the collision lie in this inaccessible for observations  $30^\circ$  cone around the Sun direction.

Calculations show that approximately 60% of hazardous objects approaching Earth from  $30^\circ$  near-Solar cone (it occupies 13.4% of the celestial sphere) can be detected at an earlier stage of flight (more than 30 days prior to collision) during the survey the rest of the sky.

There are two families of hazardous objects that have trajectory of motion does not pass through a region of space that is available for observations.

If we improve the characteristics of the target hardware so that the observation hazardous objects could lead to an angular distance of  $15^\circ$  from the direction of the Sun, the first of two «unobservable» object families will completely disappear, and the second family to fall by more than 2 times.

1-37

**АСТЕРОИДНО-КОМЕТАНАЯ ОПАСНОСТЬ –  
ВЫЗОВ ЧЕЛОВЕЧЕСТВУ XXI ВЕКА**

Л. В. Рыхлова

ОВД «Мещанский» УВД ЦАО, Москва, Россия

E-mail: rykhlova@inasan.ru

Общее количество потенциально опасных небесных тел размером более 50 м, т. е. представляющих реальную опасность локального масштаба для Земли? оце-

нивается в сотни тысяч. Из них реально открыто до настоящего времени не более 2%.

Много научных конференций и публичных дискуссий за последние 20 лет были проведены под эгидой ООН, правительств и парламентов многих стран. Лидирующие страны мира начали развивать технологии открытия и исследования объектов, сближающихся с Землей, а также разрабатывать проекты противодействия столкновению таких тел с нашей планетой.

В докладе дан краткий обзор состояния активности в исследовании этой проблемы в России.

### ASTEROID-COMET HAZARD – THE MANKIND,<sup>s</sup> CHALLENGE IN THE 21-CENTURY

L. V. Rykhlova

Ministry of Interior Affairs, Moscow, Russia

E-mail: rykhlova@inasan.ru

The total number of potentially hazardous NEO larger than 50 m is estimated as some hundreds of thousands. Only about 2% of them have been detected.

Large number of scientific conferences and public discussions are led by UN, governments and parliaments of some countries. The leading countries began to invest funds in the technology of discovery and monitoring the objects approaching the Earth, as well as to counteracting the hazard of collisions of such bodies with our planet.

A brief overview of the current state of activities in Russia on the asteroid/comet hazard – problem is presented.

1-38

### НЕЛОКАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ В МЕТАЛЛЫ

Г. Г. Савенков<sup>1</sup>, Т. А. Хантулева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,

Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,

Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru; khan47@mail.ru

Предложена новая физическая модель сверхглубокого проникания потока микрочастиц в металлическую мишень и разработана новая математическая модель процесса внедрения отдельной микрочастицы в преграду. Физическая модель основывается на экспериментально зафиксированном факте об утрате кристаллического строения центральной зоны пробитого и затем схлопнувшегося канала, образуемого частицей при проникании в металл. Известно, что аморфизация структуры металла является признаком предельно высокой степени пластической деформации и обусловлена процессами диспергирования (образования новых структурных элементов) материала вследствие интенсивного развития ротационных (вихревых) мод деформации, а не локального разогрева среды, как это считалось ра-

нее. Время разогрева, как и время тепловой релаксации, много больше времени движения частицы в среде. Кроме того, во всех ранних моделях не учитываются волновые эффекты, которые при высокоскоростных процессах играют первостепенную роль. Поток частиц, падающих на поверхность с высокой скоростью (более 1 км/с), индуцирует упругопластические волны, бегущие перед частицами и формирующие волновой пакет, распространяющийся с групповой скоростью пластической волны. Внутри пакета происходит перенос массы среды, за счет скоростной дисперсии пакет расплывается. За счет взаимодействия прямых и отраженных волн начинают расти вращательные моды пластической деформации. Образующиеся динамические структуры приводят к возникновению пульсационного давления в среде и уменьшению ее сопротивления за счёт вращений элементов структуры и микрочастиц (которые, как минимум, не превосходят по размерам структурные элементы). Тот факт, что из всего потока налетающих на мишень микрочастиц, только их некоторая доля (примерно 0,1%) проникает на большую глубину, говорит о росте скоростной дисперсии в пакете. Появление редких крупномасштабных пульсаций скорости связано с резонансными эффектами при интерференции упругопластических волн в материале преграды.

Построенная математическая модель описывает три стадии процесса проникания отдельной частицы. Первая стадия – волновая, на которой реакция материала мишени определяется его упругими характеристиками, вторая – переходная между первой и гидродинамической стадиями процесса. На переходной стадии среда проявляет как упругие, так и гидродинамические свойства, модули упругости начинают зависеть от скорости деформации, а сопротивление среды – от градиентов скорости, размеров и геометрии границ системы. Определяющими характеристиками на этой стадии являются скорость ввода передаваемого среде импульса и его длительность, а также инерционные эффекты. На гидродинамической стадии частицы движутся не в сплошной, а уже в динамически структурированной среде, где возникает продольный градиент пульсационного давления, формирующий силу сопротивления. Частица останавливается, когда волновой фронт убеждает вперед, и давление исчезает. Длина пути на этой стадии приближенно определяется выражением

$$l_f = \frac{1}{k} \ln(v_{01} / v_{02}) + \gamma,$$

где  $k = \rho C_x S / 2m_0$ ,  $\rho$  – плотность материала частицы,  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления,  $S$  – площадь миделева сечения частицы,  $m_0$  – её масса;  $v_{01}, v_{02}$  – эффективная резонансная скорость частицы после переходного участка и по окончании гидродинамической стадии;  $\gamma$  – длина запаздывания гидродинамического сопротивления, увеличивающая глубину проникания в зависимости от размера вихре-волновых структурных элементов среды и частиц. Эффект сверхглубокого проникания возникает при сочетании снижения сопротивления пульсирующей среды и роста скорости  $v_{01}$  за счет наложения импульсов большого числа соседних частиц в плотном потоке достаточной длительности.

## NONLOCAL MODEL FOR SUPERDEEP PENETRATION OF MICROPARTICLES INTO METALS

G. G. Savenkov<sup>1</sup>, T. A. Khantuleva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Spetsial'noye konstruktorsko-tehnologicheskoye byuro «Tekhnolog», Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: sav-georgij@yandex.ru; khan47@mail.ru

New physical model for superdeep penetration of micro-particle flux into metallic targets is proposed. New mathematical model for the separate particle embedding into an obstacle is developed. The physical model is based on the experimentally fixed data on amorphization of the metal structure in the target when the crystal structure is lost in the central zone of the channel pierced by a penetrating particle and then collapsing. It is well known that amorphization of the structure is a feature of limiting high plastic strain-rate and conditioned not by local heating as considered earlier, but by the dispersion processes (new structure elements formation) in material. The heating time as the heat relaxation time is much more than the particle motion time. Moreover the wave effects playing an important role in dynamic processes are not taken into account in all previous models. The particle flux bumping into a target surface at high speed (more 1 km/s) generates a wave packet propagating ahead at a group velocity of the plastic front. The medium mass transport arises inside the packet that spreads due to the velocity dispersion. The straight and reflected waves interference leads to the intensive growth of rotational (vortex) plastic deformation modes. The forming dynamic structures depending on the initial velocity of the particle flux, its density and particle size originate a pulsation pressure in the target medium and reduce the medium resistance due to the rotations both of the structure elements and micro-particles which size doesn't exceed the particle's one. As only a part of the whole flux (about 0,1%) of micro-particles penetrate deep, the particle velocity dispersion during penetration considers to be large. The rare large scale velocity pulsations appear on account of resonance effects at wave interference into the target material.

In accordance with the physical conception given above the constructed mathematical model describes three stages of penetration of a separate particle into a medium. The first stage is the wave one, material reaction to the shock induced by a particle bumping into a target is determined by elastic material properties.

The second stage is a transition between the wave and final hydrodynamic stages. On the transition stage of penetration the medium of target demonstrates both its elastic and hydrodynamic properties, the medium elastic modulus begin depend on the strain-rate, and the medium resistance on the velocity gradients, size and geometry of a system. According to the constructed model the motion on the stage is determined the velocity of the pulse input into a medium, its duration and inertial properties. On the hydrodynamic stage micro-particles move not in continuous medium but in the structured one where the longitudinal pulsation gradient forms a resistant force. The particle stops when the wave packet goes ahead and the pressure

disappears. The length of the stage is approximately defined by expression

$$l_f = \frac{1}{k} \ln(v_{01} / v_{02}) + \gamma,$$

where  $k = \rho C_x S / 2m_0$ ,  $\rho$  – particle material density,  $C_x$  – front resistance coefficient  $S$  – Midel section square,  $m_0$  – particle mass;  $v_{01}, v_{02}$  – effective resonance particle velocities after the transition stage and after the hydrodynamic stage correspondingly;  $\gamma$  – retardation length for the hydrodynamic resistance increasing the penetration depth depending on the size of the wave-vortex medium structure elements and the particle's one. Then superdeep penetration of separate particles may be explained by a superposition of two effects: the pulsing medium resistance decreasing and the velocity  $v_{01}$  increasing due to an addition of numerous adjacent particles impulses in a dense flux of sufficient duration.

---

1-39

## ИНЬ И ЯНЬ В ЖИВОМ И НЕЖИВОМ МИРЕ

В. Н. Смирнов

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

Согласно китайской философии и учению тибетских монахов инь и янь представляют собой две части целого. Эти части могут гармонизировать и вызывать восхищение (танцующая пара в фигурном катании), создавать шедевры в литературе (Ильф и Петров) и в науке (Ландау и Лифшиц), соперничать в музыке (Моцарт и Сальери), вызывать военные действия и т. п.

Подобное учение проповедуется диалектическим материализмом в основном законе единства и борьбы противоположностей (раздвоение единого на противоположные части и их последующее взаимодействие, взаимопроникновение, борьба и разрешение противоречий).

В интересующей нас научной области схождения оболочки к центру или к оси в роли инь и янь выступают тело оболочки и пустота, в ней заключенная. Показано, что энергия компактирования оболочки в сплошной шар или стержень  $E \sim (V_s \cdot V_c) / V_0$ , где  $V_s, V_c, V_0$  – объемы тела оболочки, ее пустоты и суммарный объем.

Если рассматривать семейство оболочек с переменными  $V_s$  и  $V_c$ , но так что  $V_s + V_c = V_0 = \text{const}$ , то  $E_{\text{max}}$  соответствует оболочке с  $V_s = V_c$ .

Если  $V_s \neq V_c$ , то из данного семейства оболочек найдутся две (зеркальные), для которых  $E_1 = E_2 < E_{\text{max}}$  и  $V_{s1} = V_{c2}, V_{s2} = V_{c1}$ .

Рассмотренные свойства инь и янь оболочек распространяются и на другие области науки и техники (термодинамика, электротехника, оптика, газодинамика, спорт, ядро атома). Например, с помощью инь и янь, приняв их в качестве протонов и нейтронов в ядре атома, можно охарактеризовать устойчивость ядер, сопоставить относительную живучесть зеркальных ядер и т. п.

## YIN AND YANG IN LIVING AND NONLIVING WORLD

V. N. Smirnov

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

According to Chinese philosophy and teaching of Tibetan monks, yin and yang represents the two parts of a whole. These two parts can be in harmony with one another and inspire wonder (a dancing pair in figure skating), create literary masterpieces (Ilf and Petrov), make discoveries in science (Landau and Lifshitz), compete in music (Mozart and Salieri), and cause military activities, etc.

Dialectical materialism shares a similar teaching in the fundamental law of the unity and conflict of opposites (splitting of a single whole into opposite parts and their further interaction, interpenetration, conflict, and resolution of contradictions).

In the considered research area covering shell convergence towards the center or the axis, a shell solid and a cavity therein act as yin and yang. It is shown that energy of shell compacting into a solid ball or a bar is  $E \sim (V_s \cdot V_c) / V_0$ , where  $V_s$ ,  $V_c$ ,  $V_0$  are volumes of the shell solid, the shell cavity, and their bulk volume.

If we consider the family of shells with variables  $V_s$  and  $V_c$ , such that  $V_s + V_c = V_0 = \text{const}$ , then  $E_{\text{max}}$  is obtained at  $V_s = V_c$ .

If  $V_s \neq V_c$ , then the given family of shells will have two (mirror) shells with  $E_1 = E_2 < E_{\text{max}}$  and  $V_{s1} = V_{c2}$ ,  $V_{s2} = V_{c1}$ .

The considered yin and yang properties of shells also hold true for other fields of science and technology (thermodynamics, electrical engineering, optics, gas dynamics, atomic nucleus) and also sports. For example, yin and yang considered as protons and neutrons in the atomic nucleus can be used to describe nuclei stability, compare relative survivability of mirror nuclei, etc.

---

1-40

## ДВУХСТАДИЙНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ УДЛИНЕННЫХ УДАРНИКОВ

Н. С. Жилыева, В. Ф. Куропатенко, Е. В. Недоспасова,  
В. Г. Полеев, В. Н. Смирнов, Л. В. Хардина

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

В докладе освещаются результаты исследований симметричного взаимодействия проникающих элементов (ПЭ) с движущейся (1–3 км/с) плоской преградой (металлической – сталь и газовой – продукты взрыва). ПЭ представляют собой пластины (сталь, В<sub>4</sub>С, АМц), обращенные одним торцом к преграде.

Процесс взаимодействия ПЭ с преградой разделяется на две стадии:

- активная (динамическая) при больших давлениях,
- пассивная (инерционная) при малых давлениях.

Активная стадия описывается известной теорией гидродинамического проникания. Пассивная стадия, обсуждаемая впервые, характеризуется медленным

уменьшением запасенной трансляционной кинетической энергии и кинетической энергии вихрей. Определение динамики деформаций ПЭ на пассивной стадии проводится с помощью экспериментов и неоднородных расчетов.

Обсуждается проявление разнообразной реакции на динамическую нагрузку высокомодульного (В<sub>4</sub>С) ПЭ. Анализируются причины смещения ПЭ (в направлении движения преграды) с продольной скоростью 120–180 м/с и расслоение ПЭ на две симметричные части, выброс аэрозольных частиц с открытых поверхностей ПЭ.

## TWO-STEP DEFORMATION OF EXTENDED IMPACTORS

N. S. Zhilyaeva, V. F. Kuropatenko, E. V. Nedospasova,  
V. G. Poleev, V. N. Smirnov, L. V. Khardina

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

The paper presents results of the study focused on the symmetric interaction between penetrating elements and a moving (1–3 km/s) planar barrier (metal – steel or gas – explosion products). Penetrating elements – are plates (steel, В<sub>4</sub>С, АМТs) with one end facing the barrier.

Interaction of penetrating elements with the barrier has two stages:

- active (dynamic) under high pressures;
- passive (inertial) under by low pressure.

The active stage is described by the well-known theory of hydrodynamic penetration. The passive stage, described for the first time, is characterized by slow decrease in the accumulated translational kinetic energy and the kinetic energy of vortices. Experiments and non-1D calculations are performed to determine deformation dynamics of penetrating elements at the passive stage.

Diverse response of the high-modulus (В<sub>4</sub>С) penetrating elements to dynamic loads is discussed. The paper analyzes factors causing penetrating elements to move (in the same direction as the barrier) with the longitudinal velocity of 120–180 m/s; layering of penetrating elements into two symmetrical parts; and aerosol particles ejection from the open surfaces of penetrating elements.

---

1-41

## ДВУХИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСКОРИТЕЛЕ ИГУР-3,5 ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

П. С. Базаров, А. Н. Власов, П. А. Насонов,  
М. Ю. Столбиков, Д. В. Финашин

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

Для увеличения информативности результатов рентгенографирования при регистрации быстропротекающих процессов, таких как развитие детонации в ВВ,

отдельные явления в оболочках, разлет высокоскоростных фрагментов актуальна задача отработки многоимпульсного режима генерации тормозного излучения на рентгенографических установках. На рентгеновском ускорителе прямого действия ИГУР-3,5 реализован двухимпульсный режим генерации путем изменений в существующем генераторе на базе индуктивного накопителя энергии и электровзрывных проводниках. Отличие устройства высоковольтного генератора для данного режима от обычного заключается в использовании разных видов проводников. Для формирования серии высоковольтных импульсов используется последовательно-параллельный взрыв наборов электровзрывных проводников разного диаметра.

В докладе изложены общие принципы работы рентгенографического ускорителя ИГУР-3,5 в режиме генерации двух последовательных импульсов тормозного излучения, приведены характерные осциллограммы двухимпульсного режима, рентгенограмма взрывного эксперимента. В ходе работ исследованы зависимости параметров импульсов излучения от величины нагрузки (зазор в ОП и между катодом и анодом в диоде ускорителя), приведена аналитическая оценка просвечивающей способности ускорителя на 1 м по свинцу для каждого генерируемого последовательного импульса излучения.

#### **TWO-PULSE MODE OF BREMSSTRAHLUNG GENERATION BY IGUR-3.5 ACCELERATOR FOR FAST PROCESSES RECORDING**

P. S. Bazarov, A. N. Vlasov, P. A. Nasonov,  
M. Yu Stolbikov, D. V. Finashin

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

Multi-pulse mode of bremsstrahlung generation on X-ray facilities needs to be further developed in order registration of such fast processes as detonation evolution in explosives, spall phenomena in shells, and scattering of high-speed fragments could provide increased amount of radiographic data. The two-pulse generation mode is implemented in the direct-action IGUR-3.5 X-ray accelerator by modifying the existing reactor based on the inductive energy storage and electroexplosive wires. The specific feature of this high-voltage generator design intended for this mode is that it uses various types of electroexplosive wires. A serial-parallel explosion of sets of different-diameter conductors is used to generate a series of high-voltage pulses.

The paper covers the main principles of the IGUR-3.5 X-ray accelerator operation in the mode of generating two serial bremsstrahlung pulses, gives oscillograms typical for the two-pulse mode, and also the X-ray diffraction image obtained from the explosive experiment. The dependencies of the bremsstrahlung pulse parameters on the accelerator parameters (i.e. on the peaking discharger gap and the cathode – anode gap in the accelerator diode) are investigated, and an analytical estimation of the accelerator power of X-raying to the 1-m distance from the radiation source to the test lead is given for each generated serial bremsstrahlung pulse.

1-42

#### **АЛГОРИТМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ ДЕТЕКТОРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА**

В. В. Зырянов, Д. В. Сысков

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

В РФЯЦ – ВНИИТФ создается комплекс импульсной малоракурсной рентгеновской томографии (МРТ). Для регистрации рентгеновских изображений разрабатывается мозаичная сцинтилляционная электронная система. В качестве прототипа модуля системы регистрации используется детектор гамма-излучения «Демарт 256-0», разработанный и изготовленный специалистами ИЯФ СО РАН. Начиная с мая 2012 года на внутреннем полигоне РФЯЦ – ВНИИТФ проводятся экспериментальные исследования основных характеристик детектора «Демарт 256-0». Для реконструкции трехмерных рентгеновских изображений требуется правильная предварительная обработка экспериментальных данных. Реконструкция для построения трехмерных изображений производится специалистами РФЯЦ – ВНИИТФ и основана на возможности получения информации о распределении плотности разных материалов по совокупности проекционных данных.

Целью данного доклада является обоснование и описание алгоритма предварительной обработки экспериментальных данных с детектора, которые представлены в виде осциллограмм. В докладе приведен алгоритм обработки экспериментальных данных: аппроксимация формы сигнала математической функцией – несимметричной модификацией Гаусса (логарифмический Гаусс), минимизация и определение оптимальных параметров аппроксимирующей функции. Для предварительной обработки данных использовался специализированный пакет программ «ROOT».

#### **ALGORITHM OF THE PRELIMINARY DATA HANDLING, GAINED FROM THE DETECTOR GAMMA – RADIATIONS ON THE BASIS OF THE MATRIX SCINTILLATOR**

V. V. Zyryanov, D. V. Syskov

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

In Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics there is a complex pulsing ultra-aspect angle an X-ray tomography. For recording of X-ray images, the mosaic scintillation electronic system is developed. As a prototype of the unit of system of recording the detector gamma - radiations is used «Demart 256-0», developed and made by specialists Institute of the Nuclear physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science. Since May 2012 on interior polygon experimental researches of the main detector characteristics.

For reconstruction of three-dimensional X-ray images, the correct preliminary handling of experimental data is required. Reconstruction is made for creation of three-dimensional images and is based on possibilities of obtaining of the information on allocation of density of different materials on plurality of the projection data.

The purpose of the given report is the substantiation and exposition of algorithm of preliminary handling of experimental data from the detector, which are presented in the form of oscillograms. In the report the algorithm of handling of experimental data is given: approximation of the form of a signal by mathematical function – the asymmetrical modification of the Gauss (the logarithmic Gauss), minimization and determination of optimum parameters of approximating function. The specialized software package «ROOT» was used for preliminary data handling.

---

1-43

### МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФРАГМЕНТОВ МЕТЕОРИТА «ЧЕЛЯБИНСК»

С. В. Таскаев<sup>1</sup>, Д. М. Галимов<sup>2</sup>, Д. А. Жеребцов<sup>2</sup>,  
В. В. Ховайло<sup>3</sup>, М. В. Горшенков<sup>3</sup>,  
А. Н. Васильев<sup>4</sup>, А. Н. Голованов<sup>4</sup>, О. С. Волкова<sup>4</sup>,  
В. Ю. Тимошенко<sup>4</sup>, А. И. Максимова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Челябинский государственный университет»,  
Челябинск, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный  
университет» (НИУ), Челябинск, Россия

<sup>3</sup> ФГБОУ ВПО «Московский институт стали и сплавов»  
(НИТУ), Москва, Россия

<sup>4</sup> ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова», Москва, Россия

\*E-mail: tsv@csu.ru

В работе приводятся результаты исследования фрагментов Челябинского метеорита методами оптической и сканирующей электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного микроанализа, рентгеноструктурного анализа, магнитометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Полученные данные позволяют отнести большинство изученных метеоритов к классу обыкновенных хондритов типа LL5. Однако обнаружен фрагмент, не попадающий под эту классификацию и представляющий собой железокремнистый метеорит с атипичным содержанием химических элементов.

Основным методом, используемым для определения свойств и классификации метеоритов, длительное время являлась оптическая микроскопия. Определение удельных содержаний включений (таких как хондры и материал матрицы) и распределение хондр по размерам с помощью микроскопии в отраженном свете используется для предварительного определения класса метеорита. В настоящее время оптическая микроскопия высокого разрешения [1] может быть эффективно дополнена применением более сложных инструментальных аналитических методов, например, таких как

сканирующая электронная микроскопия, совмещенная с рентгенофлуоресцентным энергодисперсионным микроанализом. Применение этого метода позволяет получить точное содержание химических элементов в исследуемом веществе, с последующей классификацией возможных фаз.

Традиционным методом для определения точного фазового состава материалов (в том числе метеоритов) является рентгеноструктурный анализ, однако, его применение для анализа метеоритов значительно затрудняет их неоднородный состав. В настоящее время наиболее информативным неразрушающим методом анализа является рентгеновская томография высокого разрешения, позволяющая не только классифицировать фазы, входящие в состав метеорита, но и показать их пространственное распределение по образцу [2].

В связи с тем, что оптическая и электронная микроскопия не позволяют точно классифицировать присутствующие в метеорите фазы, в этой работе приводятся также результаты измерений магнитной восприимчивости и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Использование информации, полученной приведенными выше методами позволяет сделать комплексный анализ метеоритов, их морфологии, минералогического и элементного состава, сделать выводы о его происхождении и метаморфозах.

### Литература

1. Ryan C Ogliore, Christine E Jilly. Gigapixel optical microscopy for meteorite characterization. *Planetary Science*, 2013, 2:3.
2. Agata Krzesinska. High resolution X-Ray tomography as a tool for analysis of internal textures in meteorites. *Meteorites*. Vol. 1, No. 1, 2011, 3–12.

### MULTISPECTRAL ANALYSIS OF THE CHELYABINSK METEORITE SAMPLES

S. V. Taskaev<sup>1</sup>, D. M. Galimov<sup>2</sup>, D. A. Zherebtsov<sup>2</sup>,  
V. V. Khovaylo<sup>3</sup>, M. V. Gorshenkov<sup>3</sup>,  
A. N. Vasiliev<sup>4</sup>, A. N. Golovanov<sup>4</sup>, O. S. Volkova<sup>4</sup>,  
V. U. Timoshenko<sup>4</sup>, A. I. Maximova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup> Moscow Institute of steel and alloys (National Technological University), Moscow, Russia

<sup>4</sup> Moscow State University, Moscow, Russia

\*E-mail: tsv@csu.ru

In the paper we report the results devoted to classification of the Chelyabinsk meteorite samples with the help of optical and SEM microscopy, EXRF EDX microanalysis, magnetic measurements and Raman spectroscopy. These analysis allow us to classify most of the samples to LL5 ordinary chondrites. Despite that, we report about one unusual sample of the metal-stone meteorite with high Ti excess which is fall out from previous classification of LL5 chondrite.

---

1-44

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОВЫХ СРЕД, ВЫЗВАННОЙ ДЕЙСТВИЕМ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ – ТЭЙЛОРА, ПРИ ЧИСЛАХ АТВУДА 0,2 И 0,8**

А. А. Тяктев, А. В. Павленко, Н. Б. Аникин,  
Ю. А. Пискунов, И. Л. Бугаенко,  
А. М. Андреев, С. С. Мокрушин

Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия  
E-mail: tyaktev@mail.ru

На установке МУТ отработан режим действия неустойчивости Рэля – Тэйлора при больших ( $>10^5$ ) числах Рейнольдса. С использованием пар газов  $\text{CO}_2/\text{воздух}$  (число Атвуда 0,2) и  $\text{CO}_2/\text{гелий}$  (число Атвуда 0,8) проведено исследование развития зоны перемешивания и пульсаций скорости вещества в зоне турбулентной смеси.

**EXPERIMENTAL STUDY OF CHARACTERISTICS OF GAS-MEDIA TURBULENT MIXING ZONE INDUCED BY RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY AT ATWOOD NUMBERS 0.2 AND 0.8**

A. A. Tyaktev, A. V. Pavlenko,  
N. B. Anikin, Yu. A. Piskunov,  
I. L. Bugaenko, A. M. Andreev, S. S. Mokrushin

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

Multi-functional shock tube was used to study the effect of Rayleigh-Taylor instability at large Reynolds numbers ( $>10^5$ ). Vapors of  $\text{CO}_2/\text{air}$  (Atwood number 0.2) and  $\text{CO}_2/\text{helium}$  (Atwood number 0.8) were chosen to study the development of mixing zone and substance velocity pulsations in the turbulent mixing zone.

Clearance for information exchange #361, dated February 27, 2014.

1-45

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО АКУСТО-КОНВЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИНАМИКУ ЭКСТРАКЦИИ ВЛАГИ ИЗ ЗЕРЕН КЕДРА**

А. В. Федоров, А. А. Жилин

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Россия, Новосибирск  
E-mail: lab20@itam.nsc.ru

Кедровые орехи широко применяются в медицинской, косметической и пищевой промышленности. Полезные свойства кедрового ореха обусловлены содержанием в его ядрах большое количество витаминов,

аминокислот, макро- и микроэлементов. Как известно кедровый орех добывают в труднодоступных районах и очень сжатые сроки в осенний период. В результате этого собранный кедровый орех имеет повышенную влажность. Для сохранения питательных и лечебных свойств кедрового ореха необходимо уменьшить содержание влаги в орехе-сырце до 15%. Традиционно для этого используется термический способ, в результате чего затрачивается большое количество энергии, времени и при этом ядро теряет свои полезные свойства.

В работе для сушки ореха в отличие от термической обработки предлагается применение высокоинтенсивного акусто-конвективного подхода, основанного на эффекте Гартмана. Главным преимуществом данного метода является отсутствие нагрева осушаемого материала, что позволяет сберечь полезные свойства ядра кедрового ореха и уменьшить время сушки.

Экспериментально определена динамика экстракции влаги из зерен, скорлупы и ядер кедрового ореха для трех режимов сушки: акусто-конвективного, термо-конвективного и термического. При акусто-конвективной сушке: – проведен анализ вклада элементов зерен кедрового ореха (скорлупы и ядра) в динамику сушки ореха; – отмечено сходство динамики экстракции влаги из скорлупы кедрового ореха и из зерен зернистого силикагеля что, по всей видимости, связано с протеканием схожих физических процессов в осушаемых материалах. Показано, что при термо-конвективной сушке наблюдается билинейный закон экстракции влаги, а при тепловом режиме сушке имеет место комбинированный закон экстракции, состоящий из трех временных этапов характеризующихся различными режимами кинетики сушки. В результате проведенных исследований найдены количественные характеристики по динамике экстракции влаги из зерен кедрового ореха при трех способах сушки, которые показали, что производительность сушки акусто-конвективным способом в два раза выше, чем термо-конвективным и в пять раз выше, чем термическим. Для описания динамики экстракции влаги в акусто-конвективном случае предложена простая релаксационная модель, удовлетворительно описывающая экспериментальные данные по акусто-конвективной сушке зерен, скорлупы и ядер кедрового ореха.

**INVESTIGATION INTO THE INFLUENCE OF HIGH INTENSIVE ACOUSTO- CONVECTIVE IMPACT ON THE DYNAMICS OF MOISTURE EXTRACTION FROM CEDAR KERNELS**

A. V. Fedorov, A. A. Zhilin

Khristianovich Institute of Theoretical  
and Applied Mechanics SbD RAS, Russia, Novosibirsk  
E-mail: lab20@itam.nsc.ru

Cedar nuts are widely used in medicine, cosmetical and food industry. Useful properties of cedar nut are stipulated by the content of great amount of vitamins, amino acids, macro- and micro-elements. As it is known, cedar nuts are gathered in hard-to-reach places within very short period of time in autumn. As the result of this, gathered cedar nuts have increased moisture. In order to preserve nutritious and curative properties of cedar nut, it is necessary to decrease



moisture content in raw nut up to 15%. For this purpose, traditionally thermal method is used, which needs great amount of energy, time and in addition, the nut loses its useful properties.

Contrary to thermal processing, we propose to use high intensive acousto-convective approach based on Gartman effect. The main advantage of this method is the absence of heating that permits to save useful properties of cedar nut kernel and to decrease drying time.

Through experiment, we determined the dynamics of moisture extraction from kernels and shuck of cedar nut for three regimes of drying: acousto-convective, thermo-convective and thermal. With acousto-convective drying, we made an analysis of kernel elements contribution into the nut drying dynamics; it was noted that the dynamics of moisture extraction from cedar nut shuck resembles the dynamics of moisture extraction from silica gel kernels. Probably, this is related to the running of similar physical processes in dried materials. It was shown that with thermo-convective drying, one observes bilinear law of moisture extraction, and with thermal drying regime, we have a combined law of extraction, which consists of three time stages characterized by various regimes of drying kinetics. Performed investigations permitted to find quantitative characteristics on dynamics of moisture extraction from cedar nut kernels under three methods of drying, which showed that drying efficiency with acousto-convective method is twice as higher than with thermo-convective and it is higher by a factor of five in comparison with thermal method. In order to describe the dynamics of moisture extraction by acousto-convective method, we proposed a simple relaxation model that well describes experimental data on acousto-convective drying of kernels and shuck of cedar nut.

1-46

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАДЕНИЯ ФРАГМЕНТА МЕТЕОРИТА «ЧЕЛЯБИНСК» В ОЗЕРО ЧЕБАРКУЛЬ

С. А. Хайбрахманов, А. Е. Дудоров

Челябинский государственный университет, Челябинск,  
Россия

E-mail: khaibrakhmanov@csu.ru

В работе приводятся оценки размеров полыньи, образуемой при падении метеорита на водную поверхность, покрытую льдом, в зависимости от характеристик падающего метеорита. Известно, что после падения метеорита 15 февраля 2013 года в озере Чебаркуль образовалась полынья диаметром 8 м. Масса метеорита, поднятого со дна оз. Чебаркуль, составляет 650 кг. Теоретические оценки показывают, что падение метеорита с такой массой и средней плотностью  $3,5 \text{ г/см}^3$  со скоростью 330 м/с на лед, имеющий среднюю прочность 15 МПа, приводит к образованию кратера размером от 1 до 7 м.

### INVESTIGATION OF THE FALLING OF THE «CHELYABINSK» METEORITE FRAGMENT ON THE CHEBARKUL LAKE

S. Khaibrakhmanov, A. Dudorov

Chelyabinsk state university, Chelyabinsk, Russia

E-mail: khaibrakhmanov@csu.ru

We estimate diameter of the glade formed on the water surface covered by ice due to falling of a meteorite in dependence on the meteorite characteristics. Diameter of the glade in the Chebarkul Lake formed after falling of the «Chelyabinsk» meteorite on February 15, 2013 is 8 meters. Mass of the meteorite recovered from the Chebarkul Lake is 650 kg. Theoretical estimations show that falling of the meteorite with this mass having mean density  $3.5 \text{ g/cm}^3$  and velocity 330 m/s on the ice with the compressive strength 15 MPa leads to formation of the crater with diameter 1–7 m.

1-47

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННЫХ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ШАРОВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ МАГНИТНЫХ ПОРОШКОВЫХ ФИГУР

В. И. Зельдович<sup>1</sup>, А. Э. Хейфец<sup>1</sup>, Н. Ю. Фролова<sup>1</sup>,  
А. К. Музыря<sup>2</sup>, А. Ю. Симонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

E-mail: kheifetz@imp.uran.ru

Шаровые образцы из стали 12Х18Н10Т диаметром 40 мм были подвергнуты взрывному нагружению. Образцы были покрыты слоем взрывчатого вещества (ВВ) ТГ5/5 толщиной 20 мм. Заряд ВВ подрывался в 6 или 12 точках, симметрично расположенных на поверхности ВВ. Разновременность инициирования ВВ не превышало  $1 \times 10^{-7}$  с. Давление на поверхности образцов было 40 ГПа. Вся система нагружения помещалась в массивный корпус, который замедлял процесс разгрузки и предотвращал разрушение образцов при разгрузке.

Цель работы состояла в обнаружении мартенсита деформации, возникшего при нагружении аустенитной стали 12Х18Н10Т, в изучении макроскопической и микроскопической картины его образования и получении дополнительных сведений о взаимодействии ударных волн в образцах.

Магнитные измерения показали, что при додекаэдрическом нагружении среднее содержание мартенсита составляет 10%, и это в 2 раза больше, чем при квазикубическом нагружении. Размеры центральной полости, толщина зоны плавления и область рекристаллизованной структуры в квазидодекаэдре также существенно (~в 2 раза) больше. То есть, среднее содержание мартенсита коррелирует с микроструктурными изменениями, возникшими в результате кумуляции.

Для того чтобы выявить картину распределения ферромагнитного мартенсита, возникший в неферромагнитном аустените при нагружении, был применен метод магнитных порошковых фигур. Суспензия – взвесь магнитного порошка в масле – наносилась на поверхность диаметрального сечения шара. После помещения образца в магнитное поле порошок концентрировался в местах образования мартенсита. В исследуемой стали мартенсит деформации возникает только при температуре ниже точки  $M_d \approx 150^\circ \text{C}$ . То есть, свободные от магнитного порошка зоны выявили области образца, в которых остаточная температура превышала  $M_d$ , а их граница представляла собой изотерму  $T=M_d$ . Распределение магнитного порошка показало, что в центральной части шара, нагруженного в 12 точках, в лучах Альтшулера и в областях, прилегающих к поверхности шара, температура была выше  $M_d$ . Кроме того, магнитные порошковые фигуры выявили образование тонкого слоя ферромагнитной фазы (по-видимому,  $\delta$ -феррита) на периферии зоны плавления.

Таким образом, использование метода магнитных порошковых фигур позволило получить наглядную картину распределения мартенсита и провести полуквантитативную оценку распределения температур при данном режиме взрывного нагружения.

Работа выполнена по плану РАН (тема «Структура», № г.р. 01201064335), при поддержке Программы Президиума РАН № 12-П-2-1009 и Проекта Президиума РАН № 12-П-2-1030.

#### INVESTIGATION OF THE 12KH18N10T STEEL SPHERICAL SAMPLES, LOADED BY CONVERGING SHOCK WAVES, BY MEANS OF MAGNETIC POWDER FIGURES

V. I. Zel'dovich<sup>1</sup>, A. E. Kheifets<sup>1</sup>, N. Yu. Frolova<sup>1</sup>,  
A. K. Musyria<sup>2</sup>, A. Yu. Simonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of physics of metals, Ural Division  
of Russian Academy of Sciences, Russia, Ekaterinburg

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

\*E-mail: kheifetz@imp.uran.ru

Ball samples of steel 12Kh18N10T with diameter of 40 mm were subjected to explosive loading. The samples were covered with a layer of explosive TG 5/5 20 mm thick. The explosive charge was initiated in 6 or 12 points symmetrically arranged on the surface of explosives. Time difference of initiation does not exceed  $1 \times 10^{-7}$  sec. Pressure on the surface of the samples was 40 GPa. The loading system was placed in the massive case, which slowed the process of release and prevents the destruction of samples during unloading.

Aim of the work was the investigation of deformation martensite arising during loading of austenitic steel 12Kh18N10T, the study of macroscopic and microscopic patterns of martensite arising and the obtaining of additional information about the interaction of shock waves in the samples.

Magnetic measurements showed that the average content of martensite at dodecahedral loading is 10%, and it

is 2 times more than the one at quasicubic loading. Size of the central cavity, the thickness of the melting zone and the region of recrystallized structure also are significantly higher (~2 times) in the quasidodecahedron. That is, the average content of martensite correlated with microstructural changes arising as a result of cumulation.

In order to identify the distribution pattern of the ferromagnetic martensite arising in non-ferromagnetic austenite during loading, we used the method of magnetic powder figures. Slurry – a magnetic powder slurry based on the oil – was placed on the surface of the diametrical cross section of the ball. After placing the sample in a magnetic field the concentrated powder in places of martensite formation take place. In the investigated steel martensite of deformation occurs only at temperatures below  $M_d \approx 150^\circ$ . That is, free of magnetic powder zones of the sample identified areas in which the residual temperature exceeded  $M_d$ , and their border was an isotherm  $T=M_d$ . The distribution of the magnetic powder showed that in the central portion of the ball loaded in 12 points on the Altshuler's beams and in the areas adjacent to the ball surface, the temperature was higher of  $M_d$ . Moreover, the magnetic powder patterns revealed the formation of a thin layer of the ferromagnetic phase (presumably  $\delta$ -ferrite) on the periphery of the melting zone.

Thus, the use of the magnetic powder figures allowed obtaining a clear picture of the distribution of martensite and carry out semi-quantitative assessment of the temperature distribution for a given mode of explosive loading.

Supported by Russian Academy of Sciences (theme «Structure», № 01201064335), the Program of Presidium of the RAS (№ 12-П-2-1009) and Project of Presidium of RAS (№ 12-П-2-1030).

1-48

#### УСТАНОВКИ БИМ 234.3000М И ЛИУ-2 В СОСТАВЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РГК Б1

А. Р. Ахметов, А. А. Каргин, П. А. Колесников,  
О. А. Никитин, С. Д. Хренков

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

Рентгенографический комплекс РГК-Б1 состоит из установок на базе импульсного безжелезного бетатрона типа БИМ 234.3000М (далее бетатроны), и линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2 (далее ЛИУ-2). Бетатроны обеспечивают двухракурсную съемку динамических объектов под углом  $90^\circ$ . Каждый из бетатронов может генерировать от одного до трех импульсов излучения в одном газодинамическом эксперименте. ЛИУ-2 способен формировать до двух импульсов излучения.

В данном докладе изложен режим совместной эксплуатации бетатронов и ЛИУ-2. Это позволит получать рентгенограммы с 3 ракурсов при проведении одного взрывного эксперимента. Для реализации режима совместного использования бетатронов и ускорителя ЛИУ-2 были внесены аппаратные изменения в систему управления и контроля бетатронов и в устройство блокировок и синхронизации ЛИУ-2. Временные пара-

метры синтезируемых управляющих сигналов определяются требованиям эксперимента.

В докладе дается краткое описание вышеизложенных установок, систем управления, синхронизации и блокировок, временные диаграммы срабатывания основных узлов и управляющих сигналов, блок-схема совместной работы.

LIA-2 linear induction accelerator Линейный индукционный ускоритель БИМ-бетатрон импульсный малогабаритный

#### **BIM234.3000M AND LIA-2 INSTALLATIONS AS PART OF X-RAYING COMPLEX RGK B1**

A. R. Akhmetov, A. A. Kargin, P. A. Kolesnikov,  
O. A. Nikitin, S. D. Khrenkov

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

X-raying complex RGK-B1 includes such installations as pulsed ironless betatron BIM234.3000M (hereafter «betatron») and linear induction accelerator LIA-2 (hereafter «LIA-2»). Betatrons are used for two-angle recording of dynamic objects at an angle of 90 degrees. Each betatron can generate from one to three radiation pulses during one gas-dynamic experiment. LIA-2 can generate up to two radiation pulses.

This paper describes the mode of synchronous operation of these two installations. This mode allows us to take three-angle X-ray images during one explosive experiment. In order to implement this mode of joint operation, we introduced modifications into the hardware of both the betatron control and monitoring system, and the LIA-2 interlocking and synchronizing device. Time parameters of the generated control signals are specified by experimental conditions.

The paper gives brief description of the above installations, their control systems, and synchronizing and interlocking devices, as well as time diagrams of main units actuation, time diagrams of control signals, and the block-diagram of synchronous operation.

---

1-49

#### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОСТИ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА УДАРНОЙ ТРУБЕ**

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 экспериментальных исследований коэффициента гетерогенности и спектральных характеристик зоны турбулентного перемешивания. Исследования проводились на ударной трубе, работающей в режиме генерации стационарной

ударной волны с числом Маха  $M=1,8$ . В экспериментах использовались разноплотные газы:  $\text{CO}_2 - \text{N}_2$  (число Атвуда  $A=0,21$ ). Регистрация процесса развития турбулентного перемешивания проводилась методикой «лазерный лист». С помощью калибровочных зависимостей определены абсолютные концентрации газовой смеси в зоне турбулентного перемешивания для различных безразмерных координат  $\xi$ . По результатам экспериментов определены профили безразмерной плотности, коэффициенты гетерогенности и спектральные характеристики зоны турбулентного перемешивания.

#### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HETEROGENEITY OF TURBULENT MIXING ZONE ON THE SHOCK TUBE**

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

The results of experimental investigation of heterogeneity coefficient and spectral characteristics of the turbulent mixing zone are given in this report. The investigation was held on the shock tube working in the regime of stationary shock wave generation with Mach number  $M=1.8$ . Gases with different density were used in these experiments:  $\text{CO}_2 - \text{N}_2$  (Atwood number  $A=0.21$ ). Registration of the evolution process was held by the «laser sheet» method. With the help of calibration dependences, absolute concentrations of gas mixing were determined in the turbulent mixing zone for different dimensionless coordinates  $\xi$ . Profiles of dimensionless density, heterogeneity coefficients and spectral characteristics of the turbulent mixing zone were determined from the experimental results.

---

1-50

#### **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОГО СПЕКТРА ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ**

Ю. В. Янилкин, В. П. Стаценко, О. Г. Синькова,  
О. Н. Чернышова, Г. С. Фирсова

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

Численно исследуется развитие гравитационного турбулентного перемешивания при вариации начального спектра возмущений контактной границы между тяжелым и легким веществами. Расчеты проводились как по 2D методике ЭГАК, так и по 3D методике ТРЭК.

Зависимости от времени ширины ЗТП на поздней (автомодельной) стадии близки во всех 3D вариантах, как с гармоническими, так и со случайными начальными возмущениями. Точно так же, приведенные к безразмерному виду величины турбулентной энергии

и квадратичной пульсации плотности на автомоделной стадии в расчетах с гармоническими начальными возмущениями близки к полученным в 3D расчете со случайными возмущениями. Показано, что выход на автомоделный режим в сильной степени зависит от начальных данных задачи.

Полученное в численных 3D расчетах спектральное распределение скоростей и масштабов в высокочастотной области на автомоделной стадии близко к колмогоровскому распределению, соответствующему 3D турбулентности.

Рассмотрено также влияние на развитие ЗТП начальных локальных возмущений, амплитуды которых существенно больше амплитуды начальных фоновых возмущений. Проведено сравнение с известными экспериментальными данными по взаимному влиянию локальных возмущений на скорость роста ширины ЗТП и наоборот. Показано, что локальные возмущения в течение долгого времени могут влиять на развитие ЗТП, в том числе и на скорость роста ширины ЗТП.

Анализируется вопрос о влиянии счетной сетки на получаемые решения.

#### NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF INITIAL PERTURBATION SPECTRUM ON THE EVOLUTION OF GRAVITATIONALLY INDUCED TURBULENT MIXING

Yu. V. Yanilkin, V. P. Statsenko, O. G. Sin'kova,  
O. N. Chernysheva, G. S. Firsova

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

The evolution of gravitationally induced turbulent mixing with a varying spectrum of initial perturbations of the interface between a light material and a heavy material is studied numerically. Simulations by 2D code EGAK and 3D code TREK have been carried out.

In all 3D simulations, both for harmonic and random initial perturbations, the time-dependences of the TMZ widths in a late (self-similar) stage are in a good agreement. Similarly, the turbulent energy and quadratic density fluctuations (reduced to their dimensionless form) in the self-similar stage of simulations with harmonic initial perturbations are close to those in 3D simulations with random initial perturbations. It is shown that transition to the self-similar regime depends, to a high extent, on the initial data for the given problem.

In the self-similar stage, the spectral distribution of velocities and scales in the high-frequency region obtained in 3D simulations is close to Kolmogorov's distribution in case of 3D turbulence.

The influence of local initial perturbations, with amplitudes significantly exceeding the amplitudes of background initial perturbations, on the TMZ growth has been also considered. The calculated results have been compared to the known experimental data on the mutual influence of local perturbations and growing TMZ widths. It has been shown that local perturbations may influence for a long time the TMZ growth, as well as the growth rate of TMZ width.

The computational grid influence on the resultant numerical solution is studied.

#### ПОДХОД РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АБЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ОДНОЙ РЕНТГЕНОГРАММЫ

С. Вэй, Х. Ли, Ц. Лю, Н. Дин

Институт прикладной физики и вычислительной математики,  
Пекин, Китай

Целью экспериментов в области гидродинамики является описание состояния вещества, подвергнутого воздействию мощных ударных волн, созданных ВВ. Для осесимметричных объектов берется только одна рентгенограмма с применением рентгеновских лучей с расходящимся пучком, причем рентгенографическая ось направлена перпендикулярно симметричной оси объекта. Восстановление распределения плотности объекта производится путем инверсии преобразования Абеля. В дискретной постановке преобразование Абеля выражается матрицей  $A \in R^{m \times n}$  с радиальной плотностью объекта  $\rho \in R^n$ . Способ получения рентгенограммы описывается уравнением:

$$d = KAp + n. \quad (1)$$

Здесь  $d$  обозначает измеренные данные,  $K$  и  $n$  соответственно размытие зерна и помехи со стороны системы считывания. Для вычисления  $p$  из Ур. (1) в рамках современных методов ([1, 2]) плотность полагается кусочно-постоянной либо линейной, а рентгеновские лучи полагаются параллельными. С практической точки зрения это довольно ограничивающее приближение. На основе рентгеновских лучей с расходящимся пучком предлагается модель с регуляризацией полной вариации высокого порядка:

$$\min_p \left\{ \varepsilon(\rho) = \mu_1 \|\nabla \rho\|_1 + \mu_2 \|\nabla^2 \rho\|_1 + 1/2 \|KA\rho - d\|_2^2 \right\}, \quad (2)$$

где  $\Delta$  – дискретный лапласиан,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — параметры регуляризации. Задача оптимизации решается с применением метода обобщенного лагранжиана. Проводится сравнение нашей модели с другими потенциальными методами регуляризации, такими как TV, TGV, LLT. Численные тесты демонстрируют преимущества предложенной модели в плане ступенчатой редукции, сохранения уровня плотности, затрат машинного времени и улучшение отношения сигнал-помеха (см. рис. 1, 2).

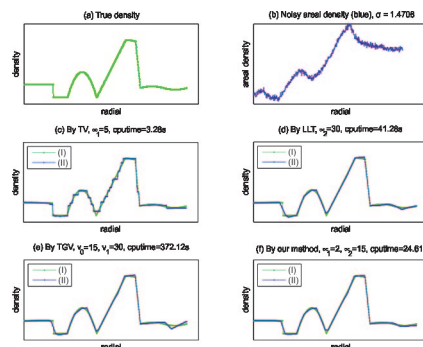


Рис. 1. Трансформация Абеля

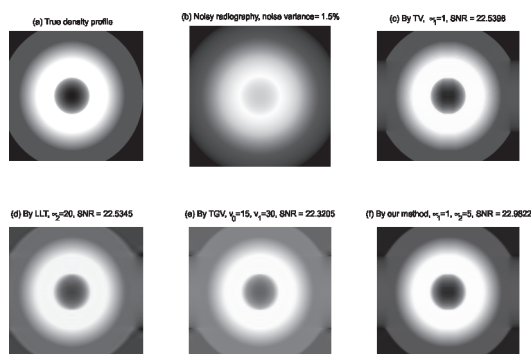


Рис. 2. Томографическое обращение (реконструкция)

## Литература

1. T. J. Asaki, R. Chartrand, K. R. Vixie, and B. Wohlberg, Abel inversion using total variation regularization, *Inverse Problem* 21, 2005. – P. 1895–1903.
2. R. Abraham, M. Bergounioux, and E. Trelat, A penalization approach for tomographic reconstruction of binary axisymmetric objects, *Applied Mathematics and Optimization*. – 2008. – 58. – P. 345–371.

## REGULARIZATION APPROACH FOR ABEL TRANSFORM BASED IMAGE RECONSTRUCTION BY A SINGLE RADIOGRAPH

S. Wei, H. Li, J. Liu, N. Ding

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics,  
Beijing, China

The purpose of hydrodynamics experiments is to characterize the state of matter subjected to powerful shocks under the effect of explosives. For axially symmetric objects, only a single radiograph is taken using fan-beam X-rays with a radiographic axis perpendicular to the symmetric axis of the object. To reconstruct the varying density of object leads to Abel transform inversion. In the discrete setting, we formulate the Abel transform as a matrix  $A \in R^{m \times n}$ , and the object radial density as  $\rho \in R^n$ . The radiograph process can be characterized by the equation:

$$d = KAp + n. \quad (1)$$

Here  $d$  denotes the measured data,  $K$  and  $n$  respectively represent the blurring kernel and the noise caused by the recording system. To solve  $p$  from Eq. (1), the contemporary methods ([1, 2]) make the assumption that the density is piecewise constant or linear and the X-rays are parallel. From a practical point of view, this is quite a restrictive approximation. Based on fan-beam X-rays, we propose the high-order total variation regularization model:

$$\min_{\rho} \left\{ \varepsilon(\rho) = \mu_1 \|\nabla \rho\|_1 + \mu_2 \|\nabla^2 \rho\|_1 + 1/2 \|KAp - d\|_2^2 \right\}, \quad (2)$$

where  $D$  – is the discrete Laplacian operator,  $\mu_1$  and  $\mu_2$  are regularization parameters. The optimization problem is solved using the augmented Lagrangian method. We compare our model with other potential regularization techniques, like TV, TGV, LLT. The numerical tests show that the proposed model has advantages on staircasing reduction, density level preservation, CPU time cost and SNR improvement (See Fig. 1, 2).

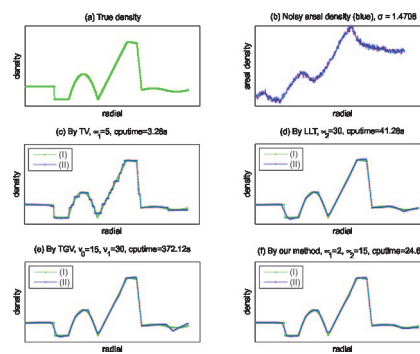


Fig. 1: Abel inversion

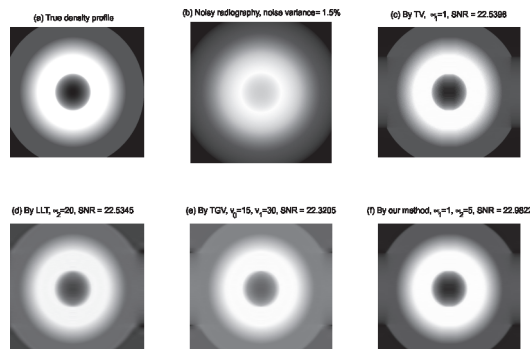


Fig. 2: Tomographic reconstruction

## References

1. T. J. Asaki, R. Chartrand, K. R. Vixie, and B. Wohlberg, Abel inversion using total variation regularization, *Inverse Problem* 21, 2005. – P. 1895–1903.
2. R. Abraham, M. Bergounioux, and E. Trelat, A penalization approach for tomographic reconstruction of binary axially symmetric objects, *Applied Mathematics and Optimization*. – 2008. – 58. – P. 345–371.

1-52

## УДАРНО-ВОЛНОВАЯ ИСТОРИЯ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА

Д. Д. Бадюков

Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва,  
Россия

E-mail: badyukov@geokhi.ru

Челябинское событие 15 февраля 2013 года сопровождалось выпадением множества фрагментов метеоритного тела на поверхность, общая масса которых составляет 4–6 тонн при доатмосферной массе тела 13 000 тонн. Метеорит относится к группе LL5 обыкновенных хондритов и представлен двумя разновидностями – светло- и темноокрашенными. В задачи данной работы входило изучение ударной истории метеорита на его родительском теле и определение степени ударного метаморфизма его разностей. Как светлые, так и черные разности вещества демонстрируют различные остаточные эффекты преобразования вещества в результате воздействия ударной волны – планарную трещиноватость (ПТ) в минералах, планарные деформационные структуры (ПДС) в оливине и полево шпате, мозаичность оливина и пироксена, диаплектизацию полевого шпата,

тонкие «черные» прожилки, жилы импактного расплава и почернение. В светлых разностях присутствует вещество, испытавшее как относительно низкую (~20–25 ГПа), так и более высокую (~25–30 ГПа) степень ударного метаморфизма (УМ), что устанавливается по интенсивности развития ПДС, мозаичности в оливине и преобразованию полевого шпата. Образцы метеорита с «высокой» степенью УМ содержат тонкие – от долей микрона до 1–2 мм – т. н. черные прожилки, сложенные каплями металла и сульфида, скелетными кристаллами оливина и зернами вероятно гранат – меджоритового твердого раствора. Черные разности метеорита сложены почерневшими обломками хондритового вещества, цементирующимися жилами импактного расплава толщиной от первых миллиметров до первых сантиметров и демонстрируют ударно-иницированные преобразования в плагиоклазе, аналогичные преобразованиям в светлой разности с «высокой» степенью УМ, реликты ПДС в оливине и его слабый мозаицизм, а также черные прожилки. Нами предполагается, что как черные прожилки, так и жилы импактного расплава возникли на фронте УВ по механизму, схожему с механизмом образования полос адиабатического сдвига в металлах, при этом на плоскостях скольжения возникает расплав с температурой выше 210 °С. В тонких черных прожилках кристаллизация расплава происходила в волне разгрузки в области 8–3 ГПа, тогда как импактный расплав кристаллизовался при нормальном давлении.

### SHOCK HISTORY OF THE CHELYABINSK METEORITE

D. D. Badykov

Vernadsky Institute of Geochemistry and analytical chemistry  
RAS, Moscow, Russia

E-mail: badyukov@geokhi.ru

The Chelyabinsk bolide on February 15, 2013 was accompanied by falling of numerous fragments of the body on the ground with an estimated total mass of 4–6 tons by a pre-atmospheric body mass of 13 000 tons. The meteorite was classified as LL5 ordinary chondrite. Two lithologies are present according to their colors, namely dark and light lithologies. The aims of the work are determination of a shock metamorphism level and recovering of a shock history of its parent body. Both light and dark lithologies show different shock metamorphic features in the matters like planar fractures (PF) in olivine and pyroxene, planar deformation features (PDF) in olivine and plagioclase (oligoclase), mosaicism in olivine and pyroxene(s), thin shock veins, dikes of an impact melt and “shock-blackening”. Samples with the light lithology show different stages of the shock metamorphism in accord with intensity of shock effects, one group was shocked in range of 20–25 GPa and second one was shocked in range of 25–30 GPa. Samples with the higher shock stage contain thin (<1 μm to 1–2 mm) shock veins consisting of tiny olivine and pyroxene grains with glass, metal and sulfide droplets, and clasts of chondrite minerals. Fragments with the black lithology consist of totally or partially “blackened” clasts of the host chondrite cemented by 3 mm–4 cm thick impact melt dikes, the chondrite mass demonstrate shock metamorphic effects in plagioclase similar to the ones in the light lithology with

“high” degree of shock metamorphism, relic PDF in olivine having weak mosaicism, and shock veins. We suggest that both shock veins and melt dikes were formed at a front of a shock wave like formation of adiabatic shear bands in metals. During the process a chondrite matter on slipping planes was melted what requires temperatures higher 210 °C. Shock veins were crystallized in a rarefaction wave by 8–3 GPa whereas impact melts in dikes were quenched at normal pressure. High bulk post-shock temperatures invoked “blackening” and annealing of some shock effects

1-53

### СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВЕЩЕСТВЕ ВНЕЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ.

Р. Ф. Гиззатуллина<sup>1</sup>, В. И. Гроховский<sup>1</sup>,  
Е. А. Козлов<sup>2</sup>, Г. А. Яковлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

E-mail: gizrozka91@bk.ru, ea\_kozlov@mail.ru,  
e.a.kozlov@vniitf.ru

Важную роль в эволюции вещества внеземного происхождения играют ударные процессы. Разнообразные свидетельства ударного воздействия наблюдаются в метеорите Челябинск LL5. В брекчированных фрагментах данного метеорита можно различить три типа литологии: 1) участки светлой литологии с ударно-переплавленными темными прожилками; 2) массивные участки серой литологии, образовавшиеся, вероятно, при полном ударном переплаве; 3) участки темной литологии, очевидно, образовавшиеся в результате взаимодействия ударно расплавленного вещества серой литологии с веществом светлой литологии. Эксперименты по ударному нагружению вещества светлой литологии метеорита Челябинск LL5 должны обеспечить широкий диапазон воздействия температуры и давления. Ранее при нагружении сферическими ударными волнами вещества метеорита Саратов L4 [1–3] были показаны несмешиваемость силикатных и сульфидных расплавов, протекание окислительно-восстановительных реакций, эффект аномального массопереноса вещества.

Сравнительный анализ ударного нагружения железных метеоритов Сихотэ-Алинь и Чинге с различным содержанием Ni показал разные структурные изменения. Были выявлены структуры ударного метаморфизма, а именно: наличие следов  $\alpha \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha_e$  превращения в камасите, свидетельства массивного превращения  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha_m$  в камасите, зоны контактного плавления на границе рабдит – камасит, области полного переплава фосфидов. Было установлено, что поликристаллическая структура зоны контактного плавления сформирована фазой с ОЦК кристаллической решеткой и является пересыщенным твердым раствором фосфора в  $\alpha$ -Fe (Ni).

**Литература**

1. Козлов Е. А., Жугин Ю. Н., Литвинов Б. В. и др. Особенности физико-химических превращений хондрита «Саратов» в сферических ударных волнах // ДАН.1997. Т. 353, No 2, 183–186 с.
2. Kozlov E. A., Zhugin Yu. N., Litvinov B. V. et al. Features of Physical-Chemical Transformations for «Saratov» Chondrite in Spherical Shock Waves / In: Abstracts of Int. Conf. Shock Waves in Condensed Matter, July 12–17, 1998, St.-Petersburg. – Russia. – P. 182–183 / In: Abstracts of Int. Conf. Space Protection of the Earth, September 23–27, 1996, Snezhinsk (Chelyabinsk -70), Russia., P. 36–37.
3. Русаков В. С., Купин Ю. Г., Бадюков Д. Д. и др. Состояния атомов Fe в минералах хондрита «Саратов» после воздействия сферических ударных волн (по результатам исследования обжатого вещества методом мессбауэровской спектроскопии) // Геохимия, 1998, С. 300–303.

**STRUCTURAL TRANSFORMATIONS  
OF THE MATTER IN SOME METEORITES  
BEFORE AND AFTER SHOCK-ISENTROPIC  
LOADING**

R. F. Gizzatullina<sup>1</sup>, V. I. Grokhovsky<sup>1</sup>,  
G. A. Yakovlev<sup>1</sup>, E. A. Kozlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia,

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

E-mail: gizrozka91@bk.ru, ea\_kozlov@mail.ru,  
e.a.kozlov@vniitf.ru

The shock processes play the main role in the evolution of extraterrestrial matter. For instance, there are various evidences of the impact processes in Chelyabinsk LL5 meteorite. Three types of lithology for brecciate fragments of this meteorite were distinguished such as: 1) regions with light lithology and shock-melted dark streaks; 2) massive grey lithology regions probably resulting from a shock remelting; 3) regions with dark lithology probably formed due to the interaction of the melted grey lithology matter with the light lithology regions. Shock loading of the light lithology matter from Chelyabinsk LL5 should provide a wide range of temperature and pressure effects. Previously, the studies of Saratov L4 meteorite by spherical shock waves loading demonstrated immiscible silicate and sulfide melts, redox reactions and effect of anomalous mass transfer [1–3].

A comparative analysis of the shock loading of Sikhotealin and Ching iron meteorites with different Ni content demonstrated different structural variations. The structures of shock metamorphism were observed in the iron meteorites, namely traces of  $\alpha \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha_\varepsilon$  transformations in kamacite,  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha_m$  massive transformation in kamacite, contact melting zones at the rhabdite–kamacite boundary, and complete remelted phosphide regions. It was shown that the polycrystalline structure of the contact melting zone was formed by the bcc phase that was supersaturated solid solution of phosphorus in the  $\alpha$ -Fe(Ni).

**References**

1. Kozlov E. A., Zhugin Y. N., Litvinov B. V. Features physicochemical transformations chondrite «Saratov» in spherical shock waves // DAN. – 1997. – Т. 353, No 2. – p. 183–186.
2. Kozlov E. A., Zhugin Yu. N., Litvinov B. V. et al. Features of Physical-Chemical Transformations for «Saratov» Chondrite

in Spherical Shock Waves / In: Abstracts of Int. Conf. Shock Waves in Condensed Matter, July 12–17, 1998, St.-Petersburg., Russia, P. 182–183 / In: Abstracts of Int. Conf. Space Protection of the Earth, September 23–27, 1996, Snezhinsk (Chelyabinsk-70), Russia., P. 36–37.

3. Rusakov V. S., Kupin Y. G., Badyukov D. D. and other, State of Fe atoms in minerals chondrite «Saratov» after exposure of spherical shock waves (according to a study of the compressed substance by Mossbauer spectroscopy) // Geochemistry, 1998, С. 300–303.

1-54

**ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ  
ХОНДРИТА «ЧЕЛЯБИНСК», ОБЪЕМНАЯ  
ПЛОТНОСТЬ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ  
РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ЕГО УДАРНОЙ  
СЖИМАЕМОСТИ**

Е. А. Козлов, А. Ю. Николаев, Д. Т. Юсупов,  
Д. П. Кучко, М. А. Ральников, С. А. Бричиков,  
А. В. Ольховский, Ю. Г. Смирнов, О. С. Юрченко,  
О. В. Смачная, О. В. Лысенко, О. В. Седова

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

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

В дополнение к [1, 2], представлены результаты РФЯЦ–ВНИИТФ по оценке химического и минерального состава, средней плотности метеорита «Челябинск» и первые данные по его ударной сжимаемости, полученные с использованием новых измерительных устройств с многоканальной лазерно-интерферометрической диагностикой.

**Литература**

1. Olga P. Popova et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization, Science, 2013, v. 342, No. 6162, pp. 1069–1073.
2. Olga P. Popova et al., Supplementary Materials for Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization, [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1).

**CHEMICAL AND MINERAL COMPOSITION  
OF «CHELYABINSK» CHONDRITE, VOLUME  
DENSITY AND PRELIMINARY RESULTS  
ON SHOCK COMPRESSION**

Е. А. Козлов, А. Ю. Николаев, Д. Т. Юсупов,  
Д. П. Кучко, М. А. Ральников, С. А. Бричиков,  
А. В. Ольховский, Ю. Г. Смирнов, О. С. Юрченко,  
О. В. Смачная, О. В. Лысенко, О. В. Седова

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

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

The RFNC–VNIITF results on chemical and mineral composition, average density, as well as the first data on shock compression of the «Chelyabinsk» meteorite are presented in addition to [1, 2]. These results were obtained

using new instruments with multi-channel laser-interferometric diagnostics.

## References

1. Olga P. Popova et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization, Science, 2013, v. 342, No. 6162, pp. 1069–1073.
2. Olga P. Popova et al., Supplementary Materials for Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization, [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1).

---

1-55

### ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ МИШЕНЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ МНОЖЕСТВЕННОМ УДАРЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ СКОРОСТЯХ ДО 1300 м/с

З. В. Танаков, Е. В. Ботов, К. В. Лизунов, Э. Э. Лин,  
Е. А. Степанов, В. Н. Хворостин, А. А. Аушев,  
Н. Ю. Илюшкина, Н. Н. Попов

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

E-mail: zahartanakov@mail.ru

В данной работе представлено обобщение экспериментальных данных по прониканию одиночного ударника и групп макроскопических твердых частиц в мишени из различных сплавов алюминия при скоростях соударения от 250 м/с до 1300 м/с.

При квазисинхронном, ограниченно асинхронном и заданно асинхронном множественных воздействиях стальных шариков и вольфрамовых цилиндров на однородные мишени из сплавов алюминия со скоростями соударений  $U = 900\text{--}1300$  м/с глубины проникания ударников в мишени больше, чем при одиночном ударе; при квазисинхронном воздействии отношение средних глубин проникания при множественном соударении  $\langle z_m \rangle$  к глубине проникания при одиночном ударе  $z_s$  лежит в диапазоне  $\langle z_m \rangle / z_s = 1,20\text{--}1,36$ , а при ограниченно асинхронном ударе с разновременностью порядка  $10^{-5}\text{--}10^{-4}$  с и при соударении с заданной разновременностью 5 мкс это отношение лежит в диапазоне  $\langle z_m \rangle / z_s = 1,43\text{--}1,66$ .

Металлографический анализ сохраненных образцов мишеней показал, что как на стенках кратеров, так и под ними происходит заметное увеличение микротвердости материала на расстояниях до 2 мм, связанное со сдвиговым упрочнением (зафиксированы полосы сдвига), далее происходит постепенное уменьшение микротвердости до величины, характерной для основного, не подвергнутого нагрузке, материала. На стенках кратеров видны следы отрыва материала и микротрещины. В случае удара со скоростью  $U \geq 800$  м/с в образцах на стенках кратера видны следы плавления и участки с перекристаллизованной структурой, что не наблюдается при скорости соударения  $U \approx 250$  м/с.

Результаты постопытного электронно-микроскопического анализа микроструктуры образцов мишеней из алюминиевых сплавов АМГ6 и Д16, подвергнутых

множественному воздействию ударников из вольфрама и стали при скоростях 800 и 1300 м/с, позволили определить размеры зерен вблизи стенок кратеров и на удалении от них и установить характер соответствия между размерами зерен и величиной микротвердости материала мишени после множественного удара.

Определены закономерности и механизмы множественного воздействия стальных и вольфрамовых ударников на мишени из алюминиевых сплавов при умеренных скоростях соударений.

### FRACTURE MODE OF ALUMINUM ALLOYS TARGET BY MULTIPLE SOLIDS IMPACT BY VELOCITIES TO 1300 m/s

Z. V. Tanakov, E. V. Botov, K. V. Lizunov, E. E. Lin,  
E. A. Stepanov, V. N. Hvorostin, A. A. Aushev,  
N. Yu. Ilyushkina, N. N. Popov

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

E-mail: zahartanakov@mail.ru

In report represented generalization of experimental data by single impactor and macroscopic solid particle groups in aluminum alloys targets penetrations when velocities from 250 to 1300 m/s.

At quasi-synchronous, limited-anisochronous and given anisochronous multiple steel spheres and tungsten cylinders influence on aluminum alloys uniform targets by impact velocities  $U = 900\text{--}1300$  m/s impactors penetration depths in target more then at single impact; at quasi-synchronous influence average relationship penetration depths  $\langle z_m \rangle$  by multiple impact to penetration depth by single impact  $z_s$  cover in the range  $\langle z_m \rangle / z_s = 1,43\text{--}1,66$ , and limited-anisochronous impact with diversity about  $10^{-5}\text{--}10^{-4}$  s and at given anisochronous impact with given diversity 5 ms this relationship cover in the range  $\langle z_m \rangle / z_s = 1,43\text{--}1,66$ .

Metallographic analyses of target demonstrated that as on craters walls such and under it incise microhardness material happened by distance to 2 mm. It depends on shearing strengthening (shear zone fixed). Then microhardness gradual decrease observed and it is becoming typical for aluminum alloys. On crater walls break tracks material and microcracks observed. On craters walls, in case of impact by velocities at  $U \geq 800$  m/s in target, melting tracks and recrystallization zone observed that not observed by impact velocities at  $U \approx 250$  m/s.

Of microstructure aluminum alloys target at multiple influences by steel and tungsten impactors by 800 m/s and 1300 m/s velocities has been electro-microscopic analysis. Cores size near by crater walls and some away from they defined and equivalence character between core sizes and target microhardness value after multiple impact determined.

Mechanisms and regularities by multiple influences of steel and tungsten impactors on aluminum alloys targets by moderate impact velocities determined.

---



1-56

## ИНЕРЦИОННОЕ ДВИЖЕНИЕ И ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ ВО ВСЕЛЕННОЙ

П. М. Гаврилов

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Горно-химический комбинат», Железногорск, Россия

E-mail: gln@mcc.krasnoyarsk.su

Рассмотрено инерционное движение и гравитационное взаимодействие двух тел во Вселенной. На основе анализа уравнения движения получено выражение в безразмерном виде, которое объясняет известное «противоречие»: почему сначала происходит замедление, а затем ускорение движения одного тела относительно другого.

Изучение эволюции Вселенной показывает, что от момента «большого взрыва» до настоящего времени прошло примерно 13,7 млрд лет [1]. При этом возникли различные формообразования в виде планет и небесных тел из газопылевых скоплений [2], которые составляют часть Вселенной. Очевидно, что энергия «большого взрыва» вызвала мощный импульс максимальных динамических давлений [3], который обеспечивает инерцию движения всех небесных формообразований в космическом вакууме.

Около 10 лет назад было обнаружено, что Вселенная расширяется с ускорением. На этом основании выдвинуто предположение о том, что, «по-видимому, Вселенную расталкивает какая-то неизвестная сила с отрицательным давлением – темная энергия» [4]. Вместе с тем было обнаружено [5], что процессу ускорения предшествовало замедление Вселенной, однако этот факт противоречит предположению о расталкивающем с ускорением действии темной энергии.

Так как поведение Вселенной как системы формообразований оценивается по динамике движения ее отдельных частей, например ведется наблюдение с Земли или со спутника за поведением звезд, метеоритов, планет и других небесных тел, то рассмотрим движение (удаление) тела 1 массой  $m_1$  относительно другого тела 2 массой  $m_2$ . При этом предполагается, что тела находятся на достаточно удаленном расстоянии от других формообразований (планет, звезд и т.д.) настолько, что можно пренебречь влиянием гравитации остальной Вселенной. Тогда уравнение движения имеет вид [6]:

$$m_1 \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}} - m_1 \mathbf{W} + m_1 [\mathbf{r}\dot{\Omega}] + 2m_1 [\mathbf{v}\Omega] + m_1 [\Omega[\mathbf{r}\Omega]]. \quad (1)$$

Первый вектор, стоящий в правой части уравнения (1), который называется силой, приложенной к телу 1, – сила гравитации (в данном случае это сила взаимного притяжения тел)

$$-\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}} = \mathbf{F} = -\frac{Gm_1 m_2}{\mathbf{r}^2}.$$

Предположим, в отличие от [4], темной энергии не существует и, соответственно, отсутствует ее действие

с отрицательным давлением. Тогда второй вектор в правой части уравнения (1), который «эквивалентен появлению однородного силового поля» [6], – это  $m_1 \mathbf{W} = 0$ .

Три оставшихся вектора в правой части уравнения (1) – это «силы инерции». Пренебрегая неравномерностью вращения тела 1 относительно тела 2, получим  $m_1 [\mathbf{r}\dot{\Omega}] = 0$ .

Для угловой скорости  $\Omega = \mathbf{v} / \mathbf{r}$  сумма двух оставшихся в уравнении (1) «сил инерции» – Кориолиса и центробежной – составит  $3m_1 \mathbf{v}^2 / \mathbf{r}$ .

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{3\mathbf{v}^2}{\mathbf{r}} - \frac{Gm_2}{\mathbf{r}^2}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{a}$  – ускорение движения;  $G$  – гравитационная постоянная Ньютона – Эйнштейна;  $\mathbf{r}$  – расстояние [6] до центра тела 1 от оси вращения, в данном случае от центра тела 2.

В состоянии равновесия сил  $\mathbf{a} = 0$ , тогда из уравнения (2) можно определить расстояние  $\mathbf{r}_e$ , при котором наступает равновесие сил:

$$\mathbf{r}_e = \frac{Gm_2}{3\mathbf{v}^2}. \quad (3)$$

Умножив уравнение (2) на  $\mathbf{r}_e^2$ , получим следующее уравнение в безразмерной форме:

$$\tilde{\mathbf{a}} = \frac{1}{\tilde{\mathbf{r}}} - \frac{1}{\tilde{\mathbf{r}}^2}, \quad (4)$$

где  $\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{a} / (3\mathbf{v}^2 / \mathbf{r}_e)$ ,  $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r} / \mathbf{r}_e$ .

Из уравнения (4) следует, что при  $\tilde{\mathbf{r}} < 1$  (расстояние  $\mathbf{r} < \mathbf{r}_e$ ) ускорение  $\tilde{\mathbf{a}} < 0$  ( $\mathbf{a} < 0$ ), то есть сила гравитации вначале преобладает над силами инерции и, соответственно, идет замедление тела 1 относительно тела 2. Затем, преодолевая расстояние  $\tilde{\mathbf{r}} = 1$  за счет инерции, ускорение движения тела 1 меняет свой знак на противоположный  $\tilde{\mathbf{a}} > 0$ , то есть в системе двух тел тело 1 ускоряется относительно тела 2, а система расширяется.

Таким образом, из приведенного выше анализа системы взаимодействия двух тел следует, что если силы инерции способны преодолеть гравитацию (преодолеть расстояние  $\tilde{\mathbf{r}} = 1$ ), то одно тело начинает двигаться с ускорением относительно другого тела. При этом из постулата Ньютона–Эйнштейна о постоянстве гравитационной величины  $G$  следует по существу объяснение «противоречия» [4, 5]: почему сначала происходило замедление, а затем расширение Вселенной с ускорением, и для этого никакой дополнительной энергии (темной энергии) для придания ускорения телу не требуется.

Безусловно, Вселенная является значительно более сложной системой, чем система взаимодействия двух тел, однако выводы о поведении Вселенной во многом строятся на анализе поведения ее отдельных составляющих.

### Литература

1. Кайзер Д. // ВМН. – 2007. – № 9, 41.
2. Лиин Д. // ВМН. – 2008. – № 8, 22.
3. Фортов В. Е., Илькаев Р. И., Шарков Б. Ю. Ориентированные фундаментальные исследования в обеспечение инновационных ядерных технологий // Сб. докладов на расширенном заседании ИТС 28 сентября 2007. – М.: ЦНИИАтоминформ, 2007. – С. 10.
4. Эппел Д. // ВМН. – 2008. – № 8, 14.

5. Конселис К. // ВМН. 2007. – № 6, 23.

6. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика, механика. – М. 1988. – Т. 1.

## INERTIAL MOVEMENT AND GRAVITATIONAL INTERACTION OF OBJECTS IN THE UNIVERSE

P. M. Gavrilov

Federal State Unitary Enterprise «Mining and Chemical Combine», Zheleznogorsk, Russia

E-mail: gln@mcc.krasnoyarsk.su

Inertial movement and gravitational interaction of two objects in the Universe are studied. According to motion equation analysis dimensionless form of expression is obtained explaining the well-known “contradiction”: why one object first slows down and then accelerates relatively to another object.

Study of the Universe shows approximately 13.7 billion years have passed from the “Big Bang”. [1]. Besides, different forms appeared as planets and celestial bodies of gas-and-dust clusters [2] to become parts of the Universe. Obviously, the “Big Bang” energy gave rise to the powerful impulse of maximum dynamic pressures [3] to support all celestial bodies’ movement inertia in space vacuum.

About 10 years ago the Universe was discovered to widen with acceleration. Upon these grounds assumption has been made that “the Universe apparently is being expanded with some kind of unknown power with negative pressure – the dark energy” [4]. Besides, the Universe slow-down was discovered to have preceded acceleration process [5], but that fact contradicts the assumption about the accelerated expansion due to dark energy influence.

As far as the behavior of the Universe being the system of different forms is evaluated according to the dynamics of its separate parts movement; for instance, the stars, planets, meteorites and other celestial bodies are being watched from the Earth or satellites; thus let us consider the moving-away of the body 1 with mass  $m_1$  relative to body 2 with mass  $m_2$ . Besides it is assumed that the bodies are at sufficient distance from other objects (planets, stars etc.) so that one can disregard gravity influence of the rest Universe. Then the movement equation has the following appearance [6]:

$$m_1 \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}} - m_1 \mathbf{W} + m_1 [\mathbf{r}\dot{\Omega}] + 2m_1 [\mathbf{v}\Omega] + m_1 [\Omega[\mathbf{r}\Omega]]. \quad (1)$$

The first vector located in the right part of the equation (1), which is called the power applied to body 1,

$$-\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}} = \mathbf{F} = -\frac{Gm_1 m_2}{r^2}$$

is gravitational force (in this particular case – the force of bodies mutual attraction).

Let us assume, as opposed to [4], the dark energy does not exist and, correspondingly, its action with negative pressure misses. Then the second vector in the right part of equation (1), which is “...equivalent to appearance of homogeneous field of force” [6], is  $m_1 \mathbf{W} = 0$ .

The rest three vectors in the right part of equation (1) are “inertia forces”. Disregarding nonuniformity of body 1 rotation relative to body 2 we obtain  $m_1 [\mathbf{r}\dot{\Omega}] = 0$ .

For the angular velocity  $\Omega = \mathbf{v}/\mathbf{r}$  the total sum of the rest two “inertia forces” left in equation (1), the Coriolis’s one and centrifugal one, is  $3m_1 v^2/\mathbf{r}$ .

Then equation (1) will have the following appearance:

$$\mathbf{a} = \frac{dv}{dt} = \frac{3v^2}{\mathbf{r}} - \frac{Gm_2}{\mathbf{r}^2}, \quad (2)$$

where  $\mathbf{a}$  – movement acceleration,  $G$  – gravitation constant of Newton–Einstein,  $\mathbf{r}$  – distance [6] to body 1 center from rotation axis, in this case, from body 2 center.

In equilibrium state of forces  $\mathbf{a} = 0$ , then due to equation (2) one can identify the distance  $r_e$ , due to which equilibrium of forces appears:

$$\mathbf{r}_e = \frac{Gm_2}{3v^2}. \quad (3)$$

Having multiplied equation (2) by  $\mathbf{r}_e^2$ , we obtain the following equation in dimensionless form:

$$\tilde{\mathbf{a}} = \frac{1}{\tilde{\mathbf{r}}} - \frac{1}{\tilde{\mathbf{r}}^2}, \quad (4)$$

where

$$\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{a}/(3v^2/r_e), \quad \tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/r_e.$$

It follows from equation (4) that by  $\tilde{\mathbf{r}} < 1$  (distance  $\mathbf{r} < r_e$ ) acceleration  $\tilde{\mathbf{a}} < 0$  ( $\mathbf{a} < 0$ ), i.e. gravitational force first prevails over inertia forces and, correspondingly, body 1 is slowing down relative to body 2. Then, overcoming distance  $\tilde{\mathbf{r}} = 1$  due to inertia the movement acceleration of body 1 reverses its sign  $\tilde{\mathbf{a}} > 0$ , i.e. in two bodies system body 1 accelerates relative to body 2 and the system expands.

Thus it follows from the abovementioned two bodies interaction system that if inertia forces are able to overcome gravity (i.e. to overcome distance  $\tilde{\mathbf{r}} = 1$ ), then one body begins to move with acceleration relative to another one. Besides in accordance with Newton–Einstein’s postulate about constancy of gravitational quantity  $G$  one can see explanation to the point for the “contradiction” [4, 5]: why the Universe first had had deceleration and then expanded with acceleration, and no any additional energy (dark energy) is needed for that to accelerate the body.

Undoubtedly, the Universe is much more complex system than two bodies’ interaction system; but conclusions about the behavior of the Universe are being made according to the behavior analysis of its separate components in many respects.

## References

1. Keiser D. VMN, 2007. – #9, 41.
2. Liin D. VMN. – 2008. – #8, 22.
3. Fortov V. E., Ilkaev R. I., Sharkov B. Y., Directed basic research to provide innovative nuclear technologies, Collected reports at the enlarged meeting of STC, 28 September 2007. – M.: CNIIA-TOMINFORM 2007. – P. 10.
4. Eppel D. VMN. – 2008. – #8, 14.
5. Conselis K. VMN. – 2007. – #6, 23.
6. Landau L. D., Lifschitz I.M. Theoretical Physics, Mechanics, M. – 1988. – Vol. 1.

1-57

**ОПАСНОСТЬ СТОЛКНОВЕНИЙ  
КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ С ЗЕМЛЕЙ  
И ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ  
ТАКИХ СОБЫТИЙ**

В. А. Симоненко

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

Представлен обзор основных достижений за 20 лет, полученных с первой конференции по космической защите Земли, состоявшейся 26–30.09.1994 г. В общей проблематике центральным является вопрос: так ли велика опасность, что следует заниматься вопросами предотвращения ее? В 1994 г. при положительном ответе на него основным аргументом было Тунгусское падение. В настоящее время появились существенные дополнительные аргументы, обусловленные прогрессом в астрономических наблюдениях и результатами анализа Челябинского падения. Частота таких падений на порядок выше, а возможные разрушения и потери при современной энергонапряженной среде обитания могут стать катастрофическими.

Возрастает научная обоснованность положений о проявлении столкновений с объектами, пришедших извне Солнечной системы. Указывается частота периодических столкновений с периодом около 30 млн. лет (в основном геологические данные), а также последствия возможных взрывных событий звезд в окрестности Солнечной системы. С одним из таких событий связывают быстрое протекание завершающей стадии последнего оледенения 12 тыс. лет назад. Однако в этом круге проблем пока преобладают фундаментальные научные вопросы.

Основные усилия были направлены на изучение опасных космических объектов Солнечной системы (ОКО) – астероидов, комет и их фрагментов. Работы можно систематизировать следующим образом: (1) расширение возможностей наблюдений и базы данных по опасным объектам; (2) изучение свойств ОКО – в целом и слагающих материалов (в астрономических наблюдениях, в космических миссиях, по образцам, доставленным из космоса и из метеоритов); (3) изучение разрушающих воздействий столкновений при разных типах ОКО и разных сценариях; (4) исследования способов и средств предотвращения опасных столкновений; (5) развитие средств доставки, нацеливания и контроля эффективности применения средств воздействия. Отмечаются наиболее яркие достижения по каждому из направлений. В совокупности новые наблюдательные данные, научно-технические возможности и выводы об опасности малых тел типа Челябинского приводят не только к необходимости, но могут обеспечить реальную научно-техническую базу для создания систем предотвращения малых тел с Землей.

**HAZARDS DUE TO SPACE OBJECT  
IMPACTS THE EARTH AND OPPORTUNITIES  
TO PREVENT THEM**

V. F. Simonenko

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

It is presented achievements for 20 years obtained since the first Space Protection of the Earth conference was hold at 1994.09.26-30. The central point in the general problem sounds as “Does the threat so big that the society should spent the resources to prevent it?” For positive answering on this question in 1994 the main argument was Tunguska phenomenon. The additional arguments currently are new data of astronomic observation and results of Chelyabinsk impact analysis. The frequency of similar is of the order higher and possible destruction and loss could be catastrophic in currant energy stressed habitat.

Scientific substantiation increased also for impacts the objects from outside the Solar system. There are arguments (mainly geological) on periodic impacts with frequency of about 30 million years and occasional ones caused by star explosions in the vicinity of the Solar system. There are some arguments that fast final stage of the last glaciation period caused similar impacts.

The main efforts were directed on study small space threaten space objects (TSO) of Solar system origin – asteroids, comets and their fragments. The works can be combined as following: (1) extension of observation and systematization of data base on hazardous objects; (2) TSO properties study as a whole and material they are composed (in astronomic observations, in space missions, and with species delivered or meteorites); (3) study of destructions caused by various types objects and impact scenarios; (4) studios methods and means of action to prevent the impacts; (5) developments of means of delivery, targeting and control of efficiency action. There are showed the most important achievements for each of the groups. New observation data, scientific and technology opportunities and date on hazards small objects of Chelyabinsk type show both the need and the opportunity to create the scientific and technological basis to prevent the small bodies impact the Earth.

1-58

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ  
КУМУЛЯЦИИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ  
КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ**

Р. И. Нигматулин

Институт океанологии им П. П. Ширшова РАН, Россия  
E-mail: nb@geotar.ru

Значительное внимание Е. И. Забабахин уделял проблеме кумуляции при фокусировке сферических ударных и детонационных волн. Для коллапса сферической пустой области им рассмотрены влияние вязкости и сжимаемости внешней жидкости и показано, что они не предотвращают бесконечно большой скорости,

плотности и давления при стремлении к нулю радиуса полости.

В пузырьке всегда имеется газ, который предотвращает полное схлопывание из-за растущего давления газа, и степень остроты кумуляции определяется процессами внутри пузырька и процессами роста несферических возмущений движения.

При достаточно большом перепаде давления  $\Delta p$  между жидкостью и газом в пузырьке жидкость может разогнаться к центру пузырька до скорости  $\sim 10^3$  м/с, что может вызвать образование сходящейся центра ударной волны структуры в газе. Для образования ударной волны необходимо, чтобы она успела образоваться внутри пузырька на расстоянии от межфазной поверхности  $\Delta r$ , меньшем радиуса пузырька  $R$ :

$$\Delta r \sim C^2 / |\ddot{R}| < R, \quad |\ddot{R}| \sim \Delta p / \rho_L R, \quad (1)$$

где  $\ddot{R}$  – ускорение скорости сжатия пузырька,  $\rho_L$  – плотность жидкости,  $C$  – скорость звука в газе. Последняя, пока плотность газа  $\rho$  много меньше плотности жидкости, равна

$$C^2 = \gamma(R/M)T, \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $M$  – молекулярный вес,  $\gamma$  – показатель адиабаты газа.

При отражении указанной волновой структуры от центра создается острейший (длительностью  $\sim 1$  пс) пик плотности  $\sim 10^4$  кг/м<sup>3</sup> и температуры  $\sim 10^8$  К в экстремальном ядре размером  $\sim 10^{-7}$  м. Как видно из (1) и (2), образованию такой ударной волны способствует высокая молекулярная масса газа, определяющая достаточно малую скорость звука в нем.

При этом значительная часть энергии тратится на диссоциацию молекул газа и ионизация атомов, что ограничивает максимальные значения параметров в экстремальном ядре.

Рост несферических возмущений течения и ударной волны предотвращает полную фокусировку энергии и снижает максимальные значения параметров. Но этот рост существенно тормозится газом. Чем больше плотность газа, тем этот рост меньше, и тем больше ресурс кумуляции энергии. Поверхностное натяжение влияет в стадии кавитационного роста пузырька тем, что может существенно уменьшить возмущение сферичности его поверхности в момент его максимального размера, а вязкость жидкости может существенно задержать развитие этой несферичности. Конденсация пара способствует кумуляции.

Кумулятивный ресурс увеличивается, если удастся сфокусировать энергию в сферическом кластере кавитационных пузырьков. В нем, двухфазная сжимаемость с локальной деформационной инерцией фокусирует энергию в центральной зоне кластера. Пузырьки в центральной зоне подвергаются большему перепаду давления  $\Delta p$ , что вызывает их более сильное сжатие.

## PHYSICAL MECHANISMS AND CUMULATIVE LIMITATIONS IN THE CAVITATION BUBBLES COLLAPSE

R. I. Nigmatulin

P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy  
of Sciences, Russia

E-mail: nb@geotar.ru

E. I. Zababakhin paid much attention to the cumulation problem in the focusing of spherical shock and detonation waves. For the collapse of an empty spherical region he examined the influence of viscosity and compressibility of outer liquid and showed that they do not prevent infinitely great velocity, density and pressure while density radius tends to zero.

The bubble always contains gas which prevents complete collapse owing to growing gas pressure, and cumulation acuity is determined by processes inside the bubble and by the growth of non-spherical perturbations of motion.

At a sufficiently great liquid-gas pressure drop  $\Delta p$  in the bubble the liquid may accelerate to a high velocity of  $\sim 10^3$  m/s which may cause the formation of a shockwave structure in gas. For the formation of a shock wave it is necessary that it had time to be formed inside the bubble at a distance from the interphase surface  $\Delta r$  smaller than the bubble radius  $R$ :

$$\Delta r \sim C^2 / |\ddot{R}| < R, \quad |\ddot{R}| \sim \Delta p / \rho_L R, \quad (1)$$

where  $\ddot{R}$  is the acceleration velocity of the bubble compression,  $\rho_L$  is the liquid density,  $C$  is the sound velocity in gas. The latter one, as long as gas density is much smaller than liquid density, is

$$C^2 = \gamma(R/M)T, \quad (2)$$

Where  $R$  is the universal gas constant,  $M$  is the molecular weight,  $\gamma$  is the adiabatic coefficient of gas.

When this wave structure is reflected from the center, an extremely acute ( $\sim 1$  ps duration) density peak  $\sim 10^4$  kg/m<sup>3</sup> and temperature peak  $\sim 10^8$  K are created in an extreme kernel sized  $\sim 10^{-7}$  m. As seen from (1) and (2), the formation of such shockwave structure is facilitated by a high molecular mass of gas which determines a sufficiently low sound velocity in it.

At the same time a considerable part of energy is spent on dissociation of gas molecules and ionization of atoms which delimits the maximum values of the parameters in the extreme kernel.

Growth of non-spherical perturbations of currents and shock waves prevents a complete focusing of energy and lowers the maximum values of the parameters. But this growth is essentially retarded by gas. The denser gas the smaller the growth and the greater the cumulative resource of energy. The surface tension exerts influence at the cavitation bubble growth stage in that it can essentially lower the perturbation of its surface sphericity at the moment of its maximum size and liquid viscosity may considerably retard the development of the nonsphericity. Vapor condensation favors cumulation.

Cumulative resource increases if it becomes possible to focus energy in a spherical cluster of cavitation bubbles. In that cluster, a two-phase compressibility with local defor-

mation inertia is focusing energy in the cluster central zone. The bubbles in the central zone are subjected to a greater pressure drop which results in their stronger compression.

---

1-59

### ЯВЛЕНИЯ С КУМУЛЯЦИЕЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ

В. А. Симоненко

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

Рассматриваются явления, в которых осуществляются процессы, ведущие к значительному (на многие порядки) кумуляции (увеличению) плотности энергии (КПЭ) в части области, охваченной движением. В отечественной научной традиции их принято называть кумулятивными. Количественно процесс КПЭ можно характеризовать двумя параметрами: отношением плотностей энергии в момент достижения максимальных значений в области фокусировки и начальной плотности энергии у внешней границы области, охваченной процессом; и отношением массы всей системы к массе области фокусировки. В силу больших значений этих величин удобно пользоваться их десятичными логарифмами, которые будем называть, соответственно, степенью кумуляции плотности энергии (СКПЭ) и степенью фокусировки кумуляции энергии.

С общих позиций обсуждаются проявления КПЭ в системах разных типов: (1) системы с гидро-газодинамическими течениями, (2) системы, в которых гидро-газодинамические течения дополнены магнитными полями как для улучшения передачи энергии, так и для повышения интенсивности процессов, (3) системы с подачей энергии извне (лазерным излучением, ионным пучком) как для организации КПЭ процесса с коротким импульсом, так и профилированием импульса; (4) необычно проявляются кумулятивные процессы в кильватерной волне при воздействии фемтосекундного лазерного импульса с мишенью; (5) микрокумулятивные процессы в резонансных акустических полях в жидкости (однопузырьковая сонолюминесценция и коллапс искусственно созданного кластера пузырьков); (6) мегакумулятивные процессы планетарного масштаба (фокусировка на поверхности планеты волны Релея столкновительного происхождения в антиподе, явления цунами), а также астрофизического масштаба – процессы коллапса при взрывах разных типов сверхновых. Характеризуются общие теоретические аспекты этих проблем, вопросы экспериментальных исследований и применений, некоторые особенности проявлений в природе. Подчеркивается теоретическая ценность сравнительного анализа разных проявлений кумулятивных течений.

### PHENOMENA OF ENERGY DENSITY CUMULATION

V. A. Simonenko

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

The phenomena observed are include the processes which have an essential (of many orders) cumulation (increase) of energy density (CED) in part of the region involved in a movement. According to domestic scientific tradition we'll call them as cumulative ones. Cumulative process could be characterized with help of two parameters: the ratio of energy densities at the moment of maximum value in the focus region and the initial value near external boundary of movement; and the ratio of the whole system mass to the mass of the focus region. On the reason of great magnitudes of these values it is better to use their decimal logarithms, and we'll call them as grade of energy density cumulation (GED-C) and grade of focusing of energy cumulation (GEF-C) respectively.

It is discussed on general basis how the CED phenomena occur in various types of systems such as: (1) systems with hydro-gas dynamics flows, (2) systems with hydro-gas dynamics flows enhanced by pulsed magnetic fields to improve energy transfer or to increase the process intensity, (3) systems with external energy supply (like lasers or particle beams) to organize CED process including short and tailored pulses, (4) CED phenomena occurred unusually in a wake wave created by interaction of a femtosecond pulse with a target, (5) impressive type of micro-cumulation occurs in resonant acoustic fields in fluids (single-bubble sonoluminescence and collapse of artificial cluster of bubbles), (6) mega-cumulative processes take place of planetary scale (convergence in antipode of impact origin Relay wave on the surface of planet, tsunami phenomena), and astrophysical scale – cumulative collapse phenomena for various types of supernova explosions. Presented theoretical features common for similar problems, experimental peculiarities and possible applications, some features of their display in nature. The value of cooperative theoretical study is emphasized.

---

1-60

### АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ ЭКСПЕДИЦИИ КА К АСТЕРОИДУ АПОФИС С ВОЗВРАЩЕНИЕМ К ЗЕМЛЕ

В. В. Ивашкин<sup>1,2</sup>, И. В. Крылов<sup>2</sup>, А. Лан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша  
РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: Ivashkin@keldysh.ru, krylov\_i\_v@mail.ru,  
seatu\_angel@126.com

Последние наблюдения астероида Апофис существенно снизили вероятность его столкновения с Землей. Тем не менее, резонансных характер его орбиты

оставляет принципиальную возможность столкновений в текущем столетии. Поэтому Апофис остается опасным небесным телом, изучение его свойств и характеристик весьма актуально. В работе исследованы оптимальные траектории для экспедиции космического аппарата (КА) от Земли к опасному астероиду Апофис, с пребыванием КА в течение некоторого времени у астероида и возвращением к Земле. Рассмотрены две группы траекторий.

Одну группу составляют траектории перелета КА с комбинированной двигательной установкой с большой и малой тягой. Здесь выведение КА на орбиту спутника Земли и разгон с нее на орбиту полета к астероиду осуществляется ракетой «Союз-ФГ» и разгонным блоком «Фрегат» с жидкостным ракетным двигателем большой тяги. Дальнейший полет к астероиду и затем к Земле осуществляется с помощью электроактивной двигательной установки малой тяги. Оптимальные траектории с максимальной конечной массой находятся с помощью нового алгоритма, сочетающего прямые методы оптимизации Беллмана, Моисеева, Черноусько и принцип максимума Понтрягина. Используется также метод продолжения решения по параметру.

Другую группу составляют траектории перелета КА при использовании только обычных двигательных установок с большой тягой на основе ракет Союз-ФГ, Союз-2, Зенит и блока «Фрегат». В этом случае траектории перелета между орбитами Земли и Апофиса находятся на базе двукратного решения задачи Эйлера-Ламберта и последующего их уточнения.

Определены оптимальные траектории и их характеристики, в частности, начальное и конечное время экспедиции, конечная и полезная масса КА, для полетов в 2019–2022 гг. Сделан сравнительный анализ обеих групп перелетов. Показано, что в обоих случаях имеется принципиальная возможность осуществить экспедицию к астероиду. Использование малой тяги позволяет существенно улучшить характеристики экспедиции.

Приведены также результаты анализа орбитального движения КА вокруг астероида.

Ключевые слова: астероиды, сближающиеся с Землей; астероид Апофис; экспедиция к астероиду Апофис; оптимальные траектории полета к астероиду; движение КА вокруг астероида

#### AN ANALYSIS OF TRAJECTORY CHARACTERISTICS FOR SPACE MISSION TO ASTEROID APOPHIS WITH RETURN TO EARTH

V. V. Ivashkin<sup>1,2</sup>, I. V. Krylov<sup>2</sup>, A. Lang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>N. E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: Ivashkin@keldysh.ru, krylov\_i\_v@mail.ru, seatu\_angel@126.com

Recent observations of asteroid Apophis essentially decreased the probability of its collision with Earth. Nevertheless, resonance character of its orbit results in possibility of the approaches and collision during this century. So,

Apophis is a dangerous celestial body and its researches are actual. Energy optimal trajectories for the space mission including a flight to dangerous asteroid Apophis, staying there during some time and following return to Earth are found and investigated. Two groups of the flights are studied.

One group is composed by the SC flights that use combined jet engines with a high thrust chemical engine and a low thrust electric-jet engine. Rocket Soyuz-FG and block "Fregat" with a high thrust are proposed to be used for SC launch and escape. Following interplanetary flight to asteroid and then to Earth is realized with a low thrust. Optimal trajectories with maximal final mass are determined here using a developed hybrid method of optimization. This method combines Bellman, Chernous'ko and Moiseev direct methods as well as Pontryagin maximum method. Parametric continuation of solution is used, too.

Another group is formed by the space flights that use only usual high thrust chemical engines on the base of rockets Soyuz-FG, Soyuz-2, Zenith and block "Fregat". The trajectories for flights between Earth and Apophis orbits are determined here using the double Euler-Lambert problem solution and following correction.

For the mission during 2019–2022 years, optimal trajectories and their characteristics, initial and final times, final and payload masses, in particular, are determined. Comparative analysis of two variants of flights is performed. It is shown that, in both cases, the mission can be realized in principle, but the use of the electric jet engine allows essential improving of the mission characteristics.

Some results in an analysis of the SC motion around Apophis are given, too.

Key words: Near-Earth Asteroids; Asteroid Apophis; Mission to Asteroid Apophis; Optimal Trajectories for Flight to Asteroid; Spacecraft Motion Around Asteroid.

1-61

#### КРИТИЧЕСКИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ ГИПЕРЗВУКОВЫХ КОНИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В. Г. Дегтярь, В. Ю. Савичев

Открытое акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева», Миасс, Россия

Опытный характер движения гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) относительно центра масс отличается от движения дозвуковых аппаратов тем, что на определенных участках полета колебания угла атаки с ростом плотности атмосферы не затухают.

Явление увеличения амплитуды колебаний ГЛА обычно называется «антидемпфированием». Для описания нестационарного характеру обтекания ГЛА В. М. Правдин, А. П. Шанин (1) предлагают физическую модель, в соответствии с которой унос теплозащитного покрытия приводит к изменению локальных характеристик пограничного слоя. Изменение «жидкой границы» тела является причиной появления дополнительного давления и, как следствие, обуславливает дополнительные силу и момент.

Рассмотрена другая причина раскочки ГЛА – переход режима течения в пограничном слое. Как только течение воздушного потока становится турбулентным, на главное течение по образующей конуса накладываются поперечные движения, которые приводят к перемешиванию потока газа. В результате такого перемешивающего движения происходит обмен импульсами в поперечном направлении на корпус ГЛА.

Определен критерий проявления турбулентности через возмущения, вносимые в поперечную угловую скорость. Метод основан на оценке восстанавливающего момента с использованием гиперзвуковой линейной теории Ньютона-Буземана (2). С учетом возможного уровня турбулентных возмущений (3) определено положение области перехода.

Показано, что для ГЛА конца 20 века, имеющих коническую форму, переход течения в пограничном слое наблюдался при критических числах превышающих верхнюю границу чисел  $Re_{кр} = 2,8 \cdot 10^6$  для плоских пластин.

Качество ГЛА XXI века должно обеспечивать ламинарный режим течения с повышением критических чисел Рейнольдса до уровня  $Re_{кр} = 10^8$ .

Благодаря этому уменьшается коэффициент сопротивления и прогрев боковой поверхности ГЛА.

#### Литература

1. Правдин В. М., Шанин А. П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999.
2. Миеле А. Теория оптимальных аэродинамических форм. [перев.] Под ред. А.Л. Гонора. М.: Мир, 1960. – С. 507.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

### CRITICAL REYNOLDS NUMBERS FOR HYPERSONIC CONIC FLYING VEHICLES

V. G. Degtyar, V. Yu. Savichev

JSC "Makeev State Rocket Center", Miass, Russia

The character of hypersonic flying vehicles (HFV) motion relatively to the mass center differs from the motion of subsonic flying vehicles by the fact that at certain sections of a flight, oscillations of the attack angle do not fade with the growth of atmosphere density.

Usually the phenomenon of increasing HFV oscillation amplitude is called "antidumping". In order to describe non-stationary character of HFV flow-around, V.M. Pravdin and A.P. Shanin (1) suggest physical model, according to which, removal of heat protective coating leads to the change of local characteristics of the boundary layer. The change of body "liquid boundary" generates additional pressure and hence additional force and momentum.

The work considers another reason of HFV sining, i.e. transition of flow regime in a boundary layer. As soon as the stream of air flow becomes turbulent, the main stream over cone generator is overlapped by transverse motions, which leads to gas flow mixing. As the result of such mixing, there is an exchange of pulses in transverse direction on HFV airframe.

We determined a criterion of appearing turbulence via perturbations brought in a transverse angle velocity. This method is based on the assessment of restoring moment us-

ing Newton-Busemann theory (2). With regard for possible level of turbulent perturbations (3), the position of transition region was determined.

It was shown that for conic HFVs of the end of the 20-th century, the flow transition in the boundary layer is observed with critical Reynolds numbers exceeding the upper limit of numbers  $Re_{cr} = 2,8 \cdot 10^6$  for flat plates.

The quality of HFVs of the 21-th century is to provide laminar regime of flow with increasing critical Reynolds numbers up to the level  $Re_{cr} = 10^8$ .

Due to this, resistance coefficient and heating of HFV lateral surface are decreased.

#### References

1. Pravdin V. M., Shanin A. P. Ballistics of unpiloted flying objects. Snezhinsk: RFNC-VNIITF edition, 1999.
2. Miele A. Theory of optimal aerodynamic forms. [translation] edited by A.L. Gonora. Moscow: Mir, 1960. – P. 507.
3. Shlikhting G. Theory of boundary layer. M.: Nauka, 1974.

1-62

### КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ НА УСТАНОВКЕ CQ-4

Б. Ло, Г. Ван, Ф. Тань, Т. Чжун, С. Чжан,  
Ц. Чжао, Ч. Сунь

Институт физики жидкостей Китайской академии инженерной физики Миньян, Сычуань, Китайская Народная Республика

Установка CQ-4 представляет собой компактный импульсный генератор, который находится в Институте физики жидкостей и предназначен для изучения свойств материалов при ударно-волновом нагружении. На установке CQ-4 были проведены физические эксперименты по изучению изэнтропического сжатия, фазовых переходов и динамической прочности поликристаллических металлов. В данной работе представлены некоторые экспериментальные результаты проведенных экспериментов. Учитывая недостатки обратного интегрирования и метода характеристик, мы совершенствуем метод Лангранжева анализа для изучения нелинейных материалов. При этом анализируется, каким образом ошибки эксперимента влияют на окончательный результат, и на основании этого мы ставим своей целью понять физическую природу материалов в условиях динамического нагружения.

### QUASI-ISENTROPIC COMPRESSION OF POLYCRYSTALLINE METALS ON CQ-4 DEVICE

B. Luo, G. Wang, F. Tan, T. Zhong,  
X. Zhang, J. Zhao, C. Sun

Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, Sichuan, P. R. China

CQ-4 device is a compact pulsed power generator established in IFP for characterizing material behaviors under ramp wave loading. Physical experiments such

as the isentropic, phase transition, and dynamic strength of polycrystalline metals have been conducted on CQ-4 device. In this paper, we report some of experimental results on the issues mentioned above. Due to the shortage of backward integration and characteristic method, we are developing forward Lagrangian analysis method for nonlinear materials. Meanwhile, how the experiment error transfers to final results is analyzed, and based on this, we aim at to give insight into the physical nature of materials under dynamic loadings.

1-63

### О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БАФТИНГА

А. Н. Богданов

Научно исследовательский институт механики МГУ  
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Нелинейные околорезонансные колебания газа в каналах различного устройства – интересное газодинамическое явление – возникает при близости частоты внешних возмущений, падающих на открытый конец канала или вызываемых колеблющимся у конца канала поршнем, к частоте возможных собственных колебаний газа в канале и проявляется как распространяющиеся по газу периодические скачки сжатия – ударные волны. К настоящему времени явление не только обстоятельно изучено теоретически (см. [1, 2] и имеющийся там обзор литературы), но и нашло практические применения (большой цикл работ по исследованию приложений выполнен коллективом под руководством М. А. Ильганова).

По мнению автора настоящей работы, возникновение таких колебаний может являться одной из причин бафтинга – нестационарных колебаний ударных волн у поверхности летательных аппаратов при их движении в трансзвуковом диапазоне скоростей [2].

Анализ особенностей существования околорезонансных колебаний показал [3], что в каналах, открытых с обеих концов, такие колебания возможны. Аналогичной такому каналу является область у поверхности летательного аппарата, концами такого канала могут быть геометрические границы тела, а также особенности течения.

При движении летательных аппаратов с околосзвуковыми скоростями у выпуклых участков их поверхностей могут образовываться местные сверхзвуковые зоны. Как правило, такие зоны оканчиваются скачком уплотнения (режим безударного обтекания является исключительным). В этой связи областью развития околорезонансных колебаний могли бы выступить области течения над участками поверхности летательного аппарата между скачком уплотнения, замыкающим местную сверхзвуковую зону, и конечной точкой поверхности летательного аппарата (при непрерывном обтекании звуковая линия не отражает слабые возмущения и они проходят далее вверх по течению).

Определение величин коэффициентов отражения малых возмущений от поверхности ударной волны, имеющей различный угол наклона к направлению тече-

ния, показывает [4], что эти коэффициенты в условиях рассматриваемого околосзвукового течения (когда ударные волны имеют невысокую интенсивность) малы, т. е. малые возмущения эффективно поглощаются скачком, и такой вариант развития бафтинга маловероятен.

Более вероятным представляется вариант, когда развитие околорезонансных колебаний происходит на всей длине поверхности летательного аппарата, а указанная область от задней границы местной сверхзвуковой зоны до конечной точки поверхности летательного аппарата лишь часть общей картины течения.

Коэффициенты отражения на входном конце открытого канала  $K$  и выходном его конце  $N$  определяются из условия  $p + \rho u^2/2 = \text{const}$ . Можно получить [5]

$$K = \frac{1 + M + M^2/2}{1 - M + M^2/2}, \quad N = \frac{1 - M + M^2/2}{1 + M + M^2/2},$$

Легко видеть, что  $KN = 1$ , т. е. независимо от числа Маха  $M$  околосзвукового течения малые возмущения сохраняют свою амплитуду при последовательном отражении от концов канала. Это свойство определяется условием постоянства расхода через канал.

Возможно, что околорезонансные колебания развиваются в окрестности местной сверхзвуковой зоны и независимо от нее. Роль местной сверхзвуковой зоны в том, что в ней возникает ударная волна, которая подвергается воздействию периодических нелинейных возмущений.

#### Литература

1. Егорушкин С. А. Околорезонансные колебания газа, движущегося в канале переменного сечения // Изв. АН СССР. МЖТ. 1984. № 4, с. 107–115.
2. Molden T. H. Fundamentals of transonic flow. N Y, Chichester, Brsbane, Toronto, Singapore. 1984. 332 s.
3. Богданов А. Н. Моделирование вынужденных релаксационных колебаний газа в канале переменного сечения // Мат. моделирование. 1994, Т. 6, № 1. С. 69–85.
4. Черный Г. Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматгиз. 1959. 220 с.
5. Шипов Р. А. О граничных условиях при нестационарных процессах в газовых системах // Инженерный журнал. 1962. Т. 2, Вып. 4.

### ON POSSIBLE MECHANISM OF BUFFETING OCCURRENCE

А. N. Bogdanov

Research Institute of mechanics of Moscow state University,  
Moscow, Russia

Nonlinear near-resonant oscillations of a gas in different-structure channels is an interesting gas-dynamic phenomenon that occurs when frequency of external perturbations – incident onto the open end of a channel or caused by a piston oscillating at the channel end – is close to the frequency of possible eigen-oscillations of the gas in the channel. This phenomenon manifests itself as periodical compression shocks propagating in the gas, i.e. shock waves. As for today, the phenomenon is not only well studied theoretically (see [1, 2] with references) but was applied in practice (large series of research works concerning its



application was done by the team of scientists under the leadership of M. A. Ilgamov).

The author of this work believes that these oscillations can be a possible reason of buffeting, i.e. unsteady oscillations of shock waves near the surface of aircrafts during their movement in transonic range of speeds [2].

Analysis of features in near-resonant oscillations showed [3] that these oscillations are possible in channels with both ends open. The area near the surface of an aircraft can be considered similar to such a channel. Geometrical boundaries of the body as well as flow peculiarities can be treated as the ends of such channel.

Local supersonic areas can occur near the convex parts of surfaces on aircrafts when they move with the near-sonic speed. Usually, these areas terminate with a compression shock (shock-free flow mode is exceptional). Thus, flow areas above aircraft surfaces between the compression shock at the end of the local supersonic area and the end point of the aircraft surface can be considered as the area of near-resonant oscillations development (in the continuous flow, Mach line does not reflect weak perturbations and these perturbations propagate further upstream).

Determining coefficients of small perturbations reflection from the surface of a shock wave having different inclination to the flow direction shows [4] that these coefficients for the considered near-sonic flow (when shock waves have low intensity) are small, i.e. small perturbations are effectively absorbed by a shock and this variant of buffeting is hardly probable.

A more probable variant is when near-resonant oscillations develop full length along the aircraft surface and the considered area from the rear boundary of the local supersonic area to the final point of the aircraft surface is just a fragment of the general pattern of the flow.

Reflection coefficients at the inlet end of the open channel  $K$  and at its outlet end  $N$  are determined from the condition  $p + \rho u^2/2 = \text{const}$ . We can have [5].

$$K = \frac{1 + M + M^2/2}{1 - M + M^2/2}, \quad N = \frac{1 - M + M^2/2}{1 + M + M^2/2},$$

We can easily see that  $KN = 1$ , i.e. independently of the Mach number  $M$  of the near-sonic flow, small perturbations retain their amplitude in the case of sequential reflection from the channel ends. This condition is determined by the uniformity of flow through the channel.

Possibly, the near-resonant oscillations develop near the local super sonic area and independently of it. The local super sonic area has the following role: it is the location of the occurring shock wave that is subjected to periodic nonlinear perturbations.

## References

1. S. A. Egorushkin. Near-resonant oscillations of gas, moving in the channel with varying cross-sectional area // ASUSSR. 1984. #4, pp. 107–115.
2. Molden T. H. Fundamentals of transonic flow. N Y, Chichester, Brsbane, Toronto, Singapore. 1984. 332 p.
3. A. N. Bogdanov. Modeling of the forced relaxation oscillations of gas in the channel with varying cross-sectional area // Matem. Mod. 1994, V. 6, #1. pp. 69–85.
4. G. G. Chorny. Gas flow with high supersonic speed. Moscow. Phizmatgiz. 1959. 220 p.

5. R. A. Shipov. Boundary conditions for unsteady processes in gas systems // Engineering Journal. 1962. V. 2, issue 4.

---

1-64

## РАЗРУШИТЕЛЬНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ВИХРИ: ТЕОРЕМЫ, РАСЧЕТЫ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С. П. Баутин<sup>1</sup>, И. Ю. Крутова<sup>2</sup>,  
А. Г. Обухов<sup>3</sup>, К. В. Баутин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет путей сообщения,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Снежинский физико-технический институт,  
Снежинск, Россия

<sup>3</sup>Тюменский государственный нефтегазовый университет,  
Тюмень, Россия

E-mail: SBautin@math.usurt.ru, IYKrutova@mephi.ru,  
aobukhov@tsogu.ru

В докладе приведены результаты теоретических [1–3] и экспериментальных исследований [3, 4] разрушительных атмосферных вихрей, таких как смерчи, торнадо и тропические циклоны.

Изложена предложенная в книге [1] схема возникновения и устойчивого функционирования восходящих закрученных потоков.

Для конкретных начально-краевых задач для системы уравнений газовой динамики и для полной системы уравнений Навье-Стокса доказаны теоремы о существовании и единственности решений, которые, в частности устанавливают, при каких условиях возникают и в какую сторону вращаются смерчи, торнадо и тропические циклоны.

Приведены результаты численных расчетов решений различных начально-краевых задач, которые моделируют течения газа от самых простых плоских спиральных течений в придонных частях исследуемых потоков до трехмерных стационарных и нестационарных течений в целом. При численном моделировании установлено время от начала функционирования природного атмосферного вихря до его выхода на стационарный режим. Результаты вычислений согласуются как с данными натуральных наблюдений за различными торнадо и тропическими циклонами, так и с результатами лабораторных экспериментов [3, 4].

Описаны результаты экспериментов группы А. Ю. Варакина (Москва) [4] по созданию и уничтожению в лабораторных условиях свободных восходящих закрученных потоков, а также экспериментов группы С. П. Баутина (Екатеринбург) [3] по созданию вихревых течений в придонной части при вертикальном стоке воздуха вверх по трубе. Эти эксперименты со свободными вихрями подтвердили возникновение закрутки потока в соответствующую сторону при наличии вертикального движения воздуха вверх.

Приведенные результаты теоретических и экспериментальных исследований подтверждают предложенную в книге [1] схему возникновения и устойчивого функционирования восходящих закрученных потоков.

Исследование поддержано РФФИ, проект 11-01-00198 и Министерством образования и науки РФ, проект 1.8490.2013.

### Литература

1. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008. 80 с.
2. Баутин С. П., Обухов А. Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. Новосибирск: Наука, 2012. 160 с.
3. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г., Баутин К. В. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. Новосибирск: Наука, 2013. 216 с.
4. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. Торнадо. М.: Физматлит, 2011 344 с.

### THE DESTRUCTIVE ATMOSPHERIC VORTICES: THEOREMS, CALCULATIONS, EXPERIMENTS

S. P. Bautin<sup>1</sup>, I. Yu. Krutova<sup>2</sup>,  
A. G. Obukhov<sup>3</sup>, K. V. Bautin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Snezinskiy Physical-Technical Institute, Snezhinsk, Russia

<sup>3</sup>Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia

E-mail: SBautin@math.usurt.ru, IYKrutova@mephi.ru, aobukhov@tsogu.ru

There are the results of theoretical [1–3] and experimental researches [3, 4] of the destructive atmospheric vortices, such as tornadoes and tropical cyclones.

There are the scheme of the emergence and sustainability of the upward vortices [1].

The theorems are proved about the existence and uniqueness of solutions for the concrete initial-boundary problems at the system equations of gas dynamics and at the complete systems of Navier-Stokes equations. In particular, this theorems establish the conditions for the rise such flows and the direction of its rotation.

There are the results of the numerical calculations the some initial-boundary problems. This results modeling the different gas flows: at the simple one-dimensional plane spiral flows to the three non-stationary flows. The times is determine from the beginning of the functioning the natural atmospheric vortices to the beginning of stationary regime. The results of the calculation agreement as the data of natural investigations of the tornado with the different parameters and the data of the laboratory experiments [3, 4].

There are the descriptions of the experimental results group A. Y. Varaksin (Moscow) [4] and group S. P. Bautin (Ekaterinburg) [3]. The Varaksin's group creates and destructions the free rising swirling flows. The Bautin's group creates a bottom swirling flows, when a gas moves upwards in a vertical pipe. The experiments of both groups confirm a rise twisting and its direction when a gas moves upwards.

The results of the theoretical and experimental researches verify the scheme of the emergence and sustainability of the upward vortices [1].

The study was supported by RFBR, project 11-01-00198 and by Ministry of Education and Sciences RF, project 1.8490.2013.

### References

1. Bautin S. P. Tornadoes and the Coriolis force. Novosibirsk: Nauka, 2008. 80 p.
2. Bautin S. P., Obukhov A. G. Mathematical modeling of the destructive atmospheric vortices. Novosibirsk: Nauka, 2012. 160 p.
3. Bautin S. P., Krutova I. Yu., Obukhov A. G., Bautin K. V. The destructive atmospheric vortices: theorems, calculations, experiments. Novosibirsk: Nauka, 2013. 216 p.
4. Varaksin A. Y., Romashev M. E., Kopeytsev V. N. Tornado. M.: Fizmatlit, 2010. 344 p.

1–65

### КРУПНЕЙШИЕ ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ В ГОЛОЦЕНЕ И ИХ СВЯЗЬ С КОМЕТНО-АСТЕРОИДНЫМИ УДАРАМИ

Д. Абботт<sup>1</sup>, Е. Брянт<sup>2</sup>, В. К. Гусяков<sup>3</sup>, В. Массе<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Геологическая обсерватория Ламонт-Дохерти, Колумбийский университет, США

<sup>2</sup>Факультет геонаук, университет Воллонгонга, Австралия

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СОРАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Лос-Аламосская национальная лаборатория, Лос-Аламос, США

В докладе рассматриваются физические и климатические последствия, которые могут быть результатом падения в океан комет и астероидов, а также оценки реальности и частоты таких событий на современном этапе геологической истории Земли. В частности, рассматриваются два возможных эпизода в недавней истории, связанных с океаническими импактными событиями, которые произошли в течение последних 5000 лет, один в Индийском океане около 2400 г. до н.э., а другой в заливе Карпентария (северная Австралия) в 536 году нашей эры. По своим энергетическим масштабам, это были самые крупные природные катастрофы, происшедшие во второй половине голоцена с крупномасштабными экологическими и историческими последствиями для современной цивилизации. Геологические доказательства, свидетельствующие в пользу реальности этих двух импактных воздействий состоят из нескольких наборов данных: (1) следы гигантских заплесков (высотой до 150-200 м) в форме шевронных дюн, найденных на южном побережье Мадагаскара и вдоль побережья залива Карпентария, (2) наличие вероятного подводного кратера диаметром 29 км (кратер Буркле) примерно в 1500 км к юго-востоку от Мадагаскара, возраст которого оценивается величиной порядка 6000 лет, и наличие двух кратеров (Канмаре диаметром 18 км и Таббан диаметром 12 км) возрастом  $572 \pm 86$  г. н.э. в юго-восточной части залива Карпентария, (3) наличие частиц с высокой магнитной восприимчивостью, текстурированных магнетных сферул и сферул из почти чистого углерода, каплевидных тектитов со следами абляции, других признаков ударных воздействий (импактный кварц и полевой шпат со следами планарных деформаций), а также металлических капель с высоким содержанием Fe, Cr, Ni, найденных в результате лабораторных анализов проб из

самой верхней части образцов керна, взятых в донных скважинах, наиболее близких к этим кратерам.

Ключевой проблемой в системе доказательств реальности импактных воздействий является проблема происхождения шевронных дюн, которые широко развиты на многих участках побережья Индийского океана и в заливе Карпентария. Хотя некоторые геоморфологи считают их ветровыми образованиями, у нашей группы есть доказательства, говорящие в пользу их формирования импактными мега-цунами. Состав песка и наличие в теле дюн обломочного материала свидетельствуют о их водном происхождении, что может быть результатом заплеска на берег гигантских волн цунами, образовавшихся в результате предполагаемых океанических импактных событий.

Результаты нашего исследования говорят о том, что столкновения Земли с кометами могли происходить гораздо чаще, чем это постулируется астрофизиками, и что результатом таких столкновений могли быть глубокие изменения климатической системы планеты, затрагивавшие все природные системы Земли, влиявшие на климат и историю развития человеческого общества.

### LARGEST NATURAL CATASTROPHES IN HOLOCENE AND THEIR POSSIBLE CONNECTION WITH COMET-ASTEROID IMPACTS ON THE EARTH

D. H. Abbott<sup>1</sup>, E. Bryant<sup>2</sup>, V. K. Gusiakov<sup>3</sup>, W. B. Masse<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, USA

<sup>2</sup> School of Geoscience, University of Wollongong, Wollongong, N.S.W, 2522, Australia

<sup>3</sup> Tsunami Laboratory, ICMMG SD RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup> Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA

Email: gvk@sscc.ru

The paper deals with physical and environmental effects resulting from impacts into the ocean by sizable comets, and the rates and risk associated with such cosmic impacts. Specifically, we investigate two sets of probable oceanic impact events that occurred within the last 5000 years, one in the Indian Ocean about 2400 BC, and the other in the Gulf of Carpentaria (Australia) about 536 AD. If validated, they would be the most energetic natural catastrophes occurring during the late Holocene with large-scale environmental and historic human effects and consequences. The physical evidence for the reality of these two impacts consists of several sets of data: (1) remarkable depositional traces of large water flooding (chevron dunes) found in southern Madagascar and along the coast of the Gulf of Carpentaria, (2) presence of crater candidates (29-km Burckle crater about 1500 km southeast of Madagascar which dates to within the last 6000 years and 18-km Kanmare and 12-km Tabban craters with an estimated age of 572±86 A.D. in the southeast corner of the Gulf of Carpentaria), (3) presence of high magnetic susceptibility, quench textured magnetite spherules and nearly pure carbon spherules, teardrop-shaped tektites with trail of ablation, other impact-indicators (quartz with 3 to 5 directions of straight, parallel fractures, conchoidal fractured feldspar) and metallic drops with Fe > Cr >

Ni and >1%Ni found by cutting-edge laboratory analytical techniques in the upper-most layer of core samples close to the crater candidates.

The allied problem to these climate affecting impacts is the problem of origin of chevron dunes that are V-shaped dunes widely developed in many parts of Indian Ocean coastline and in the Gulf of Carpentaria. Although some propose a wind-blown origin we have evidence in favor of their mega-tsunami formation. In southern Madagascar we have documented evidence for oceanic water run-up reaching 205 m with in-land penetration up to 45 km that is far beyond the run-ups of any historical tsunami. In the field study of these chevrons we found a number of features that are inconsistent with their wind-blown genesis, but well explained by flooding resulted from mega-tsunami waves coming from the areas with proposed crater candidates.

The results of our study show that substantive oceanic comet impacts not only have occurred more recently than modeled by astrophysicists, but that they profoundly affected Earth's natural systems, climate, and human societies. If validated, they could potentially lead to a major paradigm shift in environmental science by recognizing the role of oceanic impacts in major climate downturns during the late Holocene that are well documented by different techniques (tree-ring anomalies, ice-shield and lake-bottom drilling and peat bog cores).

1-66

### АНАЛИЗ ПРОБИТИЯ ПРЕГРАД УДАРНИКАМИ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия

E-mail: orloff\_m@mail.ru

В настоящей работе численно решается задача о пробитии ледовыми и гранитными ударниками преград из алюминиевого сплава и асботекстолита. Актуальность исследований обусловлена широким использованием рассматриваемых материалов преград при создании новых образцов авиационной и ракетно-космической техники. Поведение материалов описывается основной системой уравнений механики сплошных сред, т. е. уравнениями неразрывности, движения и энергии, записанными в лагранжевых координатах. Тензор напряжений разбивается на девиаторную и шаровую составляющие. Для определения гидростатического давления используется уравнение состояния в форме Уолша. Компоненты девиатора тензора напряжений находятся по модели упругопластического течения, основанной на уравнениях Прандтля – Рейса, ассоциированных с условием текучести Мизеса.

Система уравнений решается лагранжевым методом Джонсона, дополненным алгоритмами разрушения расчетных элементов и расщепления расчетных узлов, позволяющими моделировать разрушение тел на фрагменты при высокоскоростном деформировании. Задача решается в осесимметричной постановке для двумерного случая [1].

Постановка задачи формулируется как ударное взаимодействие сферических тел с преградами трех типов, эквивалентными по массе. Начальная скорость ударников направлена по оси симметрии нормально к плоскости преграды и задавалась равной 500 м/с, 1000 м/с и 1500 м/с. Рассматривались преграды трех типов. Преграда первого типа состоит из алюминиевого сплава АМГ-6, толщиной 0,5 см. Преграда второго типа – асботекстолит, толщиной 0,875 см. Преграда третьего типа двухслойная. Первый слой – асботекстолит, толщиной 0,438 см. Второй слой – сплав АМГ-6, толщиной 0,25 см. Для проверки адекватности результатов расчетов проведены вычислительные эксперименты по моделированию физических экспериментов, в которых в качестве ударников использованы стальные шарики и ледовые цилиндры. В первом случае скорость удара задавалась в диапазоне от 300 м/с до 1000 м/с. Во втором случае скорость удара была равной 62,4 м/с и 125,9 м/с.

При помощи разработанного программного комплекса получены текущие конфигурации ударник-мишень и скорости лидирующих осколков при пробитии преград.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00509а.

#### Литература

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

#### ANALYSIS PERFORATION BARIERS STRIKERS FROM NATURAL MATERIALS

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

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

E-mail: orloff\_m@mail.ru

In this paper we numerically solve the problem of perforation ice and granite strikers barriers of aluminum alloy and asbotekstolita. Relevance of research due to the extensive use of the materials when creating new barriers sam-

ples of aviation and space rocket technology. The behavior of materials is presented by the basic set of equations of a mechanics of continua, i.e. continuity equations, traffics and the energies, recorded in Lagrangian coordinates. The stress tensor is dissected on deviator and spherical components. For definition of hydrostatical pressure the equation of state in the form of the Walsh will be used. Components of the deviator of a stress tensor are on the model of the elastic-plastic flow which has been set up on equations Prandtl - Reises associate with a condition of yield of von Mises.

The system of equations is solved by the method of Lagrange Johnson supplemented destruction algorithms and computational elements calculated splitting nodes to simulate the destruction of bodies into fragments with high-speed deformation. The problem is solved in an axisymmetric formulation for the two-dimensional case [1].

Statement of the problem is formulated as a shock interaction of spherical bodies with three types of barriers, equivalent in mass. Initial velocity projectiles directed at the axis of symmetry normal to the plane of the barrier and set equal to 500 m/s to 1000 m/s and 1500 m/s. We considered three types of barriers. Barrier of the first type consists of an aluminum alloy AMG- 6, thickness of 0.5 cm. Barrier of the second type – asbotekstolit, thickness of 0.875 cm. Barrier third type bilayer. The first layer – asbotekstolit, thickness of 0.438 cm. The second layer – alloy AMG-6, thickness of 0.25 cm. To check the adequacy of the results of calculations carried out computational experiments to simulate physical experiments in which projectiles used as steel balls and ice cylinders. In the first case the impact velocity was set in a range from 300 m/s to 1000 m/s. In the second case the impact velocity was equal to 62.4 m/s and 125.9 m/s.

Using developed software configuration obtained current “striker – target” speed and leading debris breaking through barriers.

This work was supported by RFBR grant №13-08-00509а.

#### References

1. Orlov Yu. N. et al., Certificate on State registration of computer programs No 2010610911 of 28 January 2010, Impact-OS1. Shock wave loading designs. Axisymmetric task.

**Секция 2**

**ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ  
ЯВЛЕНИЯ**

---

**Section 2**

**EXPLOSION AND DETONATION  
PHENOMENA**



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ РЕАКЦИИ ДЕТОНАЦИИ ВВ

И. Хан<sup>1,2</sup>, С. П. Лун<sup>2</sup>, И. С. Вен<sup>1,2</sup>  
Ф. Д. Ни<sup>1,2</sup>, С. Л. Го<sup>1,2</sup>, К. И. Тан<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт химических материалов, Маньян, Китай

<sup>2</sup>Китайская академия инженерной физики, Маньян, Китай

E-mail: y\_han76@126.com

Зона реакции детонации (ЗРД) ВВ, определяемая как расстояние/время от ударного фронта до геометрического места точек со звуковой скоростью потока/точки Чепмена–Жуге, является важным вопросом в области исследования детонации. Энергия, выделенная перед точкой Чепмена–Жуге со звуковой скоростью потока, будет положительно влиять на такие параметры детонации, как скорость детонации, давление детонации и др. В то же время энергия, выделенная позади точки Чепмена–Жуге со звуковой скоростью потока, не способствует увеличению параметров детонации, которые могут влиять на мощность ВВ. В данной статье мы представляем экспериментальный метод получения зоны реакции детонации ТНТ и пластифицированных ВВ на основе ТАТБ. Для измерения по времени скорости алюминиевой фольги, расположенной между детонирующим ВВ и окном из PMMA, мы использовали систему интерферометра перемещения для отражателя (DISAR) с временным разрешением менее наносекунды. Сигналы частоты на осциллографе были проанализированы методом, основанным на алгоритмах быстрых преобразований Фурье и преобразований элементарных волн. Результаты показывают наличие явной точки перегиба в измерении по времени скорости граничной поверхности для ТНТ, при этом в случае пластифицированных ВВ на основе ТАТБ это явление не наблюдалось. Используя термохимический код VLW, мы рассчитали энтропии продуктов детонации ТНТ и пластифицированных ВВ на основе ТАТБ. Применив вместе с тем метод согласованных импедансов, получаем, что время реакции равно приблизительно 119 нс в зоне реакции ТНТ и 235 нс для ВВ на основе ТАТБ. По сравнению с исследуемыми ВВ окно из PMMA имеет более низкий импеданс, что дает более медленное протекание реакции по сравнению с устойчивой детонацией или окном с более высоким импедансом.

## STUDY ON THE DETONATION REACTION ZONE OF EXPLOSIVES

Y. Han<sup>1,2</sup>, X. P. Long<sup>2</sup>, Y. S. Wen<sup>1</sup>,  
F. D. Nie<sup>1</sup>, X. L. Guo<sup>1</sup>, K. Y. Tan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Chemical Materials, Miangyang, China

<sup>2</sup>CAEP, Miangyang, China

E-mail: y\_han76@126.com

Detonation reaction zone (DRZ) of explosive, defined as distance/time from the shock front to the sonic locus/CJ point, is an important issue in detonation research field. Energy released in front of CJ sonic point will contribute to

detonation parameters, like detonation velocity, detonation pressure, et al. While energy released behind CJ sonic point has no contribution for detonation parameters, which may influence the working capacity of explosives. In this paper, we introduce the experiment method to obtain the detonation reaction zone of TNT and TATB-based PBX explosive. We employed a displacement interferometer system for any reflector (DISAR) with sub-nanosecond time resolution to measure the velocity history of Al foil located between detonated explosive and PMMA window. The frequency sign in oscillograph was analyzed by the method based on short time Fourier transform and wavelet transform algorithms. The results reveal that there is obvious inflection point in the history of interface velocity for TNT, where no for TATB-based PBX explosive. According to the thermo-chemical code VLW, we calculate the iso-entropy curves of detonation products of TNT and TATB-based PBX explosive. Combined impedance matching method, we can get that the reaction time is about 118 ns in the reaction zone of TNT, and 235 ns in TATB-based explosive. Compared to measured explosives, the PMMA window has a lower impedance, which will result in a slower reaction than does in a stable detonation or a higher impedance window.

## МЕТОД КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ УДАРА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ПОРОШКУ: КОМБИНИРОВАННОЕ ИСПЫТАНИЕ НА ТРЕНИЕ И УДАР

З. Дж. Лю<sup>1,2</sup>, Ф. Д. Ни<sup>1,2</sup>, И. С. Вен<sup>1,2</sup>,  
С. П. Лун<sup>2</sup>, И. Хан<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт химических материалов, Маньян, Китай

<sup>2</sup>Китайская академия инженерной физики, Маньян, Китай

E-mail: 122395432@qq.com

Ударные испытания с падением представляют собой ударные испытания наклонной поверхностью по энергетическому порошку – испытания, включающие явления трения и удара. Угол наклона ударной поверхности составляет 30°, 45° и 60°, что дает возможность регулировать соотношение импульсов трения и удара. В рамках этого теста с падением при высоте 25 см и ударником весом 25 кг мы исследовали кристаллический порошок октогена 15–25 мкм. Температура составляла 17°C, относительная влажность – 60%. Как для 60°, так и для 30° мы выполнили пять экспериментов в серии ударных испытаний наклонной поверхностью, используя образец весом 50 мг, и пять экспериментов, используя образец весом 30 мг. Для угла 45° мы выполнили 10 экспериментов в серии ударных испытаний наклонной поверхностью, используя образец 30 мг. Мы сравнили полученную частотную характеристику с результатами испытаний на удар и трение. Во-первых, чем меньше угол наклона ударяющей поверхности, тем ниже частотность взрыва, однако частотность взрыва всегда находится в диапазоне между скоростями в ударных испытаниях и испытаниях на трение. Во-вторых,

что касается испытаний с углом  $45^\circ$ , мы обнаружили, что масса образца оказывает существенное влияние на частотность взрыва. Полученная нами частотная характеристика может помочь в разработке метода контроля чувствительности. Разработанный метод дает новые возможности для определения безопасных ударных воздействий на взрывчатые составы.

### SAFETY METHOD OF TILTED IMPACT ON ENERGETIC POWDER: A TEST COMBINING FRICTION AND IMPACT

Z. J. Lv<sup>1,2</sup>, F. D. Nie<sup>1,2</sup>, Y. S. Wen<sup>1,2</sup>, X. P. Long<sup>2</sup>, Y. Han<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Chemical Materials, Miangyang, China

<sup>2</sup>CAEP, Miangyang, China

E-mail: 122395432@qq.com

Drop weight test was designed into a tilted impact test on energetic powder, a test combining friction and impact. The degrees of the tilted impacting surface include  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$  to regulate the proportions of the stimuli of friction and impact. 15–25  $\mu\text{m}$  HMX crystal powder were tested by this tilted impact test under the drop height of 25 cm with a 10 kg hammer. The temperature is  $17^\circ$  and the relative humidity is 60%. For  $60^\circ$  and  $30^\circ$  we both carried out 5 tries of tilted impact test using 50 mg sample and 5 tries using 30 mg sample. For  $45^\circ$  we carried out 10 tries of tilted impact test using 50 mg sample and 10 tries using 30 mg sample. The response characteristic was obtained and compared to the results of impact tests and friction tests. Firstly, the smaller the degrees of the tilted impacting surface, the lower the explosion rates, but the explosion rate is always between those of impact tests and friction tests. Secondly, for  $45^\circ$  tests, we found that the mass of sample has remarkable influence on the explosion rate. The response characteristic obtained here can help to design the sensitivity test. The method established provides a new way to distinguish the impact safety of explosive formulations.

порошков пластифицированных ВВ было осуществлено искровым импульсом, при этом инициирование ВВ в балк-форме оказалось невозможным даже с искровым импульсом 200 кВ. Для того, чтобы объяснить этот феномен и исследовать влияние тепла и электрического воздействия на инициирование, мы измеряли колебания электростатического разряда цепи. Результаты показывают, что нагружение тепловым и электрическим полями происходит не одновременно. После того, как спадает пиковое значение электрической волны, постепенно нарастает значение тепловой волны. Расхождение между этими двумя пиками составляет примерно 10 нс – больше, чем периоды молекулярных колебаний (порядка величины 10 пс), согласно теории молекулярных колебаний. Существование внешнего электрического поля приводит к поляризации молекул ВВ. Однако их первоначальная структура может быть восстановлена за короткий промежуток времени, а именно 10 пс. Как тепловое, так и электрическое поля могут распространяться на порошки пластифицированных ВВ, но, с другой стороны, только электрическое поле может распространяться на ВВ в балк-форме. Следовательно, можно сказать, что электрическое поле, по сравнению с тепловым полем, оказывает менее значительное влияние на инициирование при ЭСР, иными словами, именно тепловой эффект играет основную роль в процессе инициирования. Наши экспериментальные выводы находятся в удовлетворительном согласии с выполненными недавно расчетными исследованиями в области теории функционала плотности.

### RESPONSE CHARACTERISTICS OF HMX-BASED AND PETN-BASED PBX UNDER ULTRA-HIGH VOLTAGE ELECTROSTATIC DISCHARGE

Y. S. Wen<sup>1,2</sup>, X. P. Long<sup>2</sup>, F. D. Nie<sup>1,2</sup>, Z. J. Lv<sup>1,2</sup>, Y. Han<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Chemical Materials, Miangyang, China

<sup>2</sup> CAEP, Miangyang, China

E-mail: fudenie@gmail.com

2-3

### ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА И ТЭН К ВОЗДЕЙСТВИЮ УЛЬТРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

И. С. Вен<sup>1,2</sup>, С. П. Лун<sup>2</sup>, Ф. Д. Ни<sup>1,2</sup>,

З. Дж. Лю<sup>1,2</sup>, И. Хан<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт химических материалов, Маньян, Китай

<sup>2</sup>Китайская академия инженерной физики, Маньян, Китай

E-mail: fudenie@gmail.com

Пластифицированные ВВ на основе ТАТБ и ТЭН в балк-форме и форме порошков были подвергнуты воздействию ультра высоковольтного электростатического разряда (ЭСР) в 2 кВ и 200 кВ. Результаты показывают наличие строгой корреляции между параметрами искры и состоянием ВВ. Иницирование всех

2 kV and 200 kV ultra-high voltage electrostatic discharge(ESD) were employed to bulks and powders of a TATB-based and PETN-based PBX. The results showed that there are strong correlations between the spark sensitivities and the states of explosive. PBX powers were all ignited by 5 kV spark stimuli while the bulks can not be ignited even by 200 kV sparks. In order to explain this phenomenon and study the contributions of heat and electric stimulation to ignition, we measured the electrostatic discharge waveforms of the circuit. Results show that the loading of heat and electric fields are not synchronized. After the peak value of electric wave past, the heat work then gradually presented itself. There's a discrepancy of about 10 ns between two peaks, greater than the molecular vibration periods (10 ps order of magnitude) according to the molecular vibration theory. The molecular of explosive were polarization during the existence of outer electric field. But they can be restored to their original structure in a short time such as 10 ps. Both heat and electric field can transmit into the PBX powers, on the other hand only the electric field can transmit into bulk. Thus we can say that the



electric field has smaller contribution while heat has larger contribution to the ignition during an EDS, which is, the thermal effect plays a main role on the ignition process. Our conclusion of experiment is in good agreement with recent DFT calculation studies.

2-4

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕЖАТЫХ СОСТОЯНИЙ В СИСТЕМЕ ВВ/МЕТАЕМАЯ ПЛАСТИНА

Янг Яо

Институт физики жидкостей, Китайская академия  
технической физики, Mianyang, Сычуань, Китай

Способность к возбуждению пережатой детонации в системе взрывчатое вещество/метаемая пластина, была исследована как численно, так и экспериментально. Двухмерный код по методу конечных элементов был адаптирован для расчета одномерного пережатого состояния, созданного ударом пластины по взрывчатому веществу JO 9159. Сравнение взрывчатого вещества близко к PBX 9501. Стандартное уравнение состояния (УС) Джонса–Уилкинса–Ли (ДУЛ) в данном коде было заменено на УС ДУЛ (Tang), которое было принято для моделирования экспериментов с данными Гюгно и пережатого выхода для таких ВВ, как PBX9501, PBX9502, LX-17, ультрадисперсного TATB, и т. д. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов. Было проверено уравнение состояния с коррекцией и адаптированный код.

### MODELING TWO STAGES EXPLOSIVE/FLYER SYSTEM ON OVERDRIVEN STATES

Yang Yao

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering  
Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

The driving ability of strong detonation in two stages explosive/flyer system were numerically and experimentally studied. A 2-D finite element code was adopted to compute one-dimensional overdriven shock state of flyer plates impacting on JO 9159 explosive. The comparison of the explosive is close to PBX 9501. The standard Jones–Wilkins–Lee (JWL) equation of state (EOS) in the code was replaced with the JWL (Tang) EOS, which was validated to model both the Hugoniot data and the overdriven release experiments for explosives such as PBX9501, PBX9502, LX-17, and ultra Fine TATB, etc. The results of numerical simulation agreed well with experimental results. The equation of state with correction and the adapted code were verified.

2-5

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЭНА И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ МЕТАЛЛОВ

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Н. В. Нелюбина,  
И. Ю. Лисков, А. П. Никитин

Институт углеродной и химического материаловедения  
СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

В работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований инициирования композитов на основе тэна и ультрадисперсных материалов (Al, Ni, NiC, AlC) при воздействии лазерных импульсов наносекундной длительности ( $\lambda = 1064$  нм,  $\tau = 14$  нс). Измерены пороги взрывчатого разложения тэна в зависимости от плотности энергии лазера для образцов, содержащих различные концентрации включений, и определена оптимальная концентрация, при которой порог взрывного разложения минимален. Результаты интерпретируются в рамках тепловой теории лазерного зажигания. В рамках теории мы рассчитали  $Q_{abs} = \sigma/\sigma_{геом}$ , где  $\sigma$  – сечение поглощения света;  $\sigma_{геом}$  – геометрическое сечение для различных металлов в зависимости от размеров включений. Экспериментальные результаты дают удовлетворительное совпадение с теоретическими расчетами. Оптико-акустическим методом измерены показатели поглощения образцов с включениями Al. Установлен линейный рост коэффициента поглощения и амплитуды акустического сигнала с возрастанием концентрации включений в образце (до 0,1% по массе). При дальнейшем росте концентрации включений, амплитуда акустического сигнала падает. Эти результаты позволяют интерпретировать возрастание порога взрывчатого разложения при концентрации включений выше оптимальной при увеличении  $k > 200$  см<sup>-1</sup>. Время акустической релаксации становится сравнимым с временем акустической релаксации в поверхностном слое поглощения максимальной энергии ( $\leq 80$  мкм). В этих условиях происходит квазистатическое расширение слоя и уменьшение ударного давления, возникающего в результате поглощения энергии лазера и нагрева слоя, что приводит к возрастанию порога взрывчатого разложения. Дальнейшее развитие процесса происходит по ударно-волновому механизму. В докладе приведены также экспериментально измеренные скорости разлета продуктов взрыва.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-03-98032 p\_сибирь\_a.

## REGULARITIES OF LASER INITIATION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON PETN AND ULTRAFINE METAL INCLUSIONS

B. P. Aduiev, D. R. Nurmukhametov, N. V. Neljubina,  
I. Yu. Liskov, A. P. Nikitin

Institute of Coal Chemistry, Chemical and Materials Science,  
Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the initiation of the composites based on PETN and ultrafine materials (Al, Ni, NiC, AlC) when exposed to nanosecond laser pulses ( $\lambda = 1064$  nm,  $\tau = 14$  ns). Measured thresholds of PETN explosive decomposition, depending on the laser energy density for samples containing different concentrations of the inclusions and determined the optimum concentration at which the threshold of explosive decomposition is minimal. The results are interpreted in terms of the thermal theory of laser ignition. In the framework of the theory we have calculated  $Q_{abs} = \sigma/\sigma_{geom}$  where  $\sigma$  – absorption cross section of light;  $\sigma_{geom}$  – geometrical cross section for different metals depending on the size of the inclusions. Experimental results give a satisfactory agreement with theoretical calculations. Opto-acoustic method measured absorption coefficients of samples with inclusions of Al. The linear absorption coefficient, and increase the amplitude of the acoustic signal with increasing concentration of impurities in the sample (up to 0.1% by weight). Upon further increase in the concentration of impurities, acoustic signal amplitude decreases. These results allow us to interpret the increase in the threshold of an explosive decomposition at higher than optimal concentration of impurities by increasing the  $k > 200$  cm<sup>-1</sup>. Acoustic relaxation time becomes comparable to the relaxation time in the surface acoustic absorption maximum energy layer ( $\leq 80$  microns). Under these conditions, a quasi-static layer and the expansion pressure reducing shock occurring due to absorption of the laser energy and the heating layer, which leads to an increase in the threshold of the explosive expansion. Further development of the process occurs on a shock-wave mechanism. The report also shows the experimentally measured the expansion velocity of the explosion products.

The work was partially supported by Russian Foundation for Basic Research (13-03-98032\_r\_sibir\_a).

---

2-6

## АНАЛИЗ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ВО ВЗРЫВ В БРИЗАНТНЫХ ВВ

И. А. Ахлюстин, Е. Б. Смирнов, В. Н. Щербаков,  
Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Ю. А. Беленовский

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

В работе приведены экспериментальные результаты зависимости скорости горения от давления для ряда бризантных ВВ. Предложена аналитическая модель

перехода дефлаграционного горения во взрывчатый режим. Модель, построенная на основе метода характеристик, позволяет спрогнозировать возможность образования ударно-волнового скачка давления внутри ВВ в зависимости от скорости его горения. На основе предложенной модели определено влияние физических свойств ВВ, а также скорости горения на место и время образования ударной волны в ВВ. В работе показана определяющая роль ударно-волнового скачка давления в процессе перехода горения во взрыв. Полученные результаты позволяют сформулировать критерий перехода дефлаграционного горения во взрывчатый режим.

## ANALYSIS OF DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION IN HIGH EXPLOSIVES

I. A. Akhlyustin, E. B. Smirnov, V. N. Scherbakov,  
B. G. Loboiko, O. V. Kostitsyn, Yu. A. Belenovskiy

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

The paper presents the experimental results on the “deflagration rate – pressure” dependence for a number of high explosives. An analytical model of deflagration-to-detonation transition is proposed. The model is developed based on the method of characteristics and enables prediction of potential generation of a shock-wave pressure jump inside HE depending on its deflagration rate. The proposed model was used to determine the effect of HE physical properties and deflagration rate upon location and time of shock wave generation in HE. The paper demonstrates the defining role of the shock-wave pressure jump during deflagration-to-detonation transition. The obtained results make it possible to state a criterion for deflagration-to-detonation transition.

---

2-7

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ФТДО И СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

Р. Г. Ахметшин, А. В. Разин, В. Е. Зарко,  
В. П. Ципилев, П. И. Калмыков

Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: kvant@tpu.ru

В настоящее время разрабатываются новые высокоэнергетические материалы и составы на их основе, высокочувствительные к лазерному излучению и обладающих низкой чувствительностью к другим видам импульсных воздействий [1].

Одним из таких высокоэнергетических материалов является ФТДО (фуразано-1,2,3,4-тетразин-1,3-диоксид) – эндотермическое вещество, теплота образования которого составляет 1000 кал/г. Чистый ФТДО имеет высокую чувствительность к механическим воздействиям [2], поэтому для понижения взрывчатых свойств ФТДО проводится его совместная кристаллизация с линейным нитрамином 2,4-динитро-2,4-диазапентаном

(ДНП) в различных концентрациях, при этом обеспечиваются достаточно высокие энергетические характеристики такой смеси. По данным [3] энергетический порог взрывного разложения Н на первой гармонике Nd-лазера ( $\lambda = 1064$  нм) составил  $400 \pm 70$  мДж/см<sup>2</sup> чистого ФТДО, это достаточно высокая чувствительность для энергетических материалов обладающих признаками вторичного ВВ.

В данной работе исследованы зависимости энергетического порога инициирования лазерным одиночным импульсом прессованного ФТДО (фуразано-1,2,3,4-тетразин-1,3-диоксид) и смесевых составов на его основе от размера облучаемой зоны. Обращает на себя внимание тот факт, что размерные зависимости качественно отличаются от полученных в работах [5] и [6], а именно тем, что размерный эффект при инициировании ФТДО и смесевых составов ФТДО/ДНП (75/25) менее выражен чем у прессованных порошков азидов тяжелых металлов [5] и тетранитрата пентаэритрита [6]. Полученные результаты обсуждаются с учетом возможного вклада процессов светорассеяния в объеме образцов теплопроводностной и газодинамической разгрузки из очага взрывного разложения. Показано что основанием для такого подхода являются результаты работ [4–6].

#### Литература

1. М. А. Илюшин, И. В. Целинский // Известия СПбГТИ (ТУ), 2010, № 9 (35), с. 44.
2. В. А. Тесёлкин // ФГВ, 2009, Т. 45, № 5, с. 140.
3. V. Oleshko, V. Tsipilev, V. Lysyk, A. Razin, V. Zarko, P. Kalmykov, J. Rus. Phys., no. 11/3, p. 158 (2012).
4. Е. И. Александров, В. П. Ципилев // ФГВ, 1981.
5. В. И. Таржанов, А. Д. Зинченко // ФГВ, 1996.
6. Е. И. Александров, В. П. Ципилев // ФГВ, 1989.

#### BEAM SIZE EFFECT AT LASER INITIATION OF FTDO AND ITS MIXTURES

R. G. Akhmetshin, A. V. Razin, V. E. Zarko,  
V. P. Tsipilev, P. I. Kalmykov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia  
E-mail: kvant@tpu.ru

Currently, new energetic materials and its mixtures are being developed to be highly sensitive to laser radiation and insensitive to other actions [1].

One of those energetic materials is furazan-1,2,3,4-tetrazin-1,3-dioxide (FTDO). It is endothermic material with enthalpy of 1,000 cal/g. Pure FTDO is highly sensitive to impact [2]. Therefore, it cocrystallizes with linear nitramine 2,4-dinitro-2,4-diazopentane (DNP) to reduce its impact sensitivity and to keep its energetic characteristics. According to [3] energy thresholds of explosive decomposition of pure FTDO at 1064 nm of laser radiation comprised  $400 \pm 70$  mJ/cm<sup>2</sup>. That means that sensitivity of FTDO which possesses features of secondary explosives is rather high.

In this paper the dependencies of energy threshold initiation of pressed powders of FTDO and its mixtures on laser beam diameter are presented. Note that those dependencies are qualitatively different from those for heavy metal azides [5] and PETN [6]. In particular, beam size effect for pure FTDO and FTDO:DNP (75/25) is less expressed as it was

for azides and PETN. The obtained results are discussed with taking into account the radiation diffusion within the samples, conductive and gas dynamic energy drain from the initiation centers. Papers [4–6] are the result of this approach.

#### References

1. M. Ilyushin, I. Tselinski, Bull. StPSIT, vol. 35, no. 9, p. 44 (2010).
2. V. Teselkin, Comb. Explos. Shock Waves, vol. 45, i. 5, p. 632 (2009).
3. V. Oleshko, V. Tsipilev et al., J. Rus. Phys., vol 55, no. 11/3, p. 158 (2012).
4. Ye. Aleksandrov, V. Tsipilev, Comb. Explos. Shock Waves, vol. 17, i. 5, p. 550 (1981).
5. V. Tarzhanov, A. Zinchenko et al., Comb. Explos. Shock Waves, vol. 32, i. 4, p. 454 (1996).
6. Ye. Aleksandrov, V. Tsipilev, A. Voznyuk, Comb. Explos. Shock Waves, vol. 24, i. 6, p. 730 (1989).

2-8

#### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ГОРЮЧЕ-ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Л. Х. Бадретдинова, И. Ф. Садыков

Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, Казань, Россия  
E-mail: salamandra\_1985@mail.ru

Существующая технология применения ГОС для обработки скважин на сегодняшний день имеет ряд недостатков. Во-первых, необходимость закачки ГОС в область призабойной зоны пласта с устья скважины через насосно-компрессорные трубы, что приводит к увеличению продолжительности работ и затрат с использованием дорогостоящего насосного оборудования.

Во-вторых, для инициирования ГОС используют заряд баллистического пороха, который располагают в области середины столба ГОС, при этом происходит объемный взрыв и это часто приводит к последующему разрушению цементирующего кольца обсадной колонны.

В данной работе для обработки скважин предлагается доставка ГОС в забой по высокопроизводительной кабельной технологии с помощью известной автоматической желонки, а сгорание ГОС осуществляется послойно путем воспламенения ее в области верхнего торца, что приводит к устойчивому нарастанию давления газообразных продуктов сгорания и исключает возможность объемного взрыва. В качестве воспламенителя в этом случае может быть использован высокотемпературный железоалюминиевый термитный состав.

## IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY USE COMBUSTIBLE-OXIDATION SYSTEMS

L. Kh. Badretdinova, I. F. Sadikov

Kazan National Research Technological University, Kazan,  
Russia

E-mail: salamandra\_1985@mail.ru

Existing technology application combustible-oxidation systems (COS), used for well treatment the present time, have a number of disadvantages. First, the need to upload the COS in bottom-hole formation zones through oil well tubing, it is leads to an increase in the duration of the work and costs using expensive pumping equipment.

Second, this technology is explosive technology initiating COS using gunpowder charges ballistite, located in the middle column of the COS, it often leads to the volumetric explosion and destruction of the cementing ring of the perforated zone.

In the given study, conventional automatic bailer is suggested to be used as a high slaughtering cable technology for oil well treatment, the COS combustion carried layer by layer by means of igniting it in the area the upper end face. It is leads to a stable rise of pressure of the gaseous combustion products and eliminates the possibility of explosion of the bulk. In this case, high-temperature iron-aluminum thermite composition is used as a igniter.

входящих в состав кристалла, и описывается приближением Дебая. Ввиду того, что область статических экспериментов не выходит за области низких и умеренных температур (до 1000 К), в данной работе ограничивались рассмотрением фононной составляющей тепловой энергии давления. Зависимость коэффициента Грюнайзена  $\Gamma(V)$  от удельного объема, являющаяся связующей между тепловой и потенциальной составляющими уравнения состояния, описывается в приближении Ландау-Слейтера.

Получено полуэмпирическое уравнение состояния взрывчатого вещества 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензол (ТАТБ), представляющего интерес из-за уникально низкой чувствительности к внешним тепловым и механическим воздействиям. Высокая стойкость по сравнению с большинством известных взрывчатых материалов позволяет расширить диапазон изменения термодинамических параметров (давления, температуры и т. д.) при проведении экспериментальных исследований, необходимых для построения уравнения состояния. Вместе с тем ВВ ТАТБ чрезвычайно привлекательно для научных исследований благодаря своей сложной кристаллической структуре. Обладая триклинной сингонией, кристаллы ТАТБ характеризуются высокой анизотропией и низкой симметрией, представляющей значительные трудности для рентгеноструктурного анализа.

Параметры уравнения состояния определялись на основании рентгеноструктурных исследований ТАТБ в изотермических и изобарических условиях. Корректность уравнения состояния подтверждена хорошим описанием экспериментов по ударному сжатию, термическому расширению и теплоемкости, полученным для макроструктурных прессованных деталей из ВВ ТАТБ. Можно ожидать, что использование предложенного уравнения состояния позволит повысить точность описания термодинамических параметров непрореагировавшего ВВ ТАТБ при численном моделировании ударно-волновых и детонационных процессов.

2-9

## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ 1,3,5-ТРИАМИНО-2,4,6-ТРИНИТРОБЕНЗОЛА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СТАТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Е. Б. Смирнов<sup>1</sup>, О. В. Костицын<sup>1</sup>, А. В. Станкевич<sup>1</sup>,  
Л. Х. Бадретдинова<sup>2</sup>, К. А. Тен<sup>3</sup>,  
Б. П. Толочко<sup>4</sup>, И. Х. Шакиров<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, Казань, Россия

<sup>3</sup> Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,  
Новосибирск, Россия

Предложена простая калорическая модель уравнения состояния в форме Ми-Грюнайзена для описания термодинамических свойств взрывчатых материалов без учета фазовых переходов. При построении уравнения состояния исходили из определения свободной энергии Гельмгольца  $F(V, T)$ , которая наиболее простым образом связана с моделью строения вещества в предположении, что давление и энергия могут быть представлены в виде тепловой и потенциальной (упругой) составляющих. Вид потенциальной составляющей зависит от типа твердого тела. Тепловая составляющая определяется колебательным движением молекул,

## EQUATION OF STATE

### FOR 1,3,5-TRIAMINO-2,4,6-TRINITROBENZOL BASED ON THE RESULTS OF STATIC EXPERIMENTS

E. B. Smirnov<sup>1</sup>, O. V. Kostitsyn<sup>1</sup>, A. V. Stankevich<sup>1</sup>,  
L. Kh. Badretdinova<sup>2</sup>, K. A. Ten<sup>3</sup>,  
B. P. Tolochko<sup>4</sup>, I. Kh. Shakirov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kazan National Research Technological University, Kazan,  
Russia

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

<sup>3</sup> Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, RAS Siberian Branch,  
Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup> Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry,  
RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

A simple caloric model of the Mie-Grunheisen equation of state is proposed to describe thermodynamic properties of HE without the regard for phase transitions. The equation of state (EOS) was constructed proceeding from the determination of  $F(V, T)$  Helmholtz free energy that is in

the most simple way related to the matter structure model in the assumption that pressure and energy can be presented as thermal and potential (elastic) components. The form of the potential component depends on the solid body type.

The thermal component depends on the oscillating motion of molecules found in a crystal and is described by the Debye approximation. As the area of static experiments doesn't go beyond low and moderate temperatures (up to 1000 K), this paper is focused on a phonon component of the thermal pressure energy. The Landau-Slater approximation describes the  $\Gamma(V)$  Grunheisen coefficient versus specific volume relationship being a connective element between thermal and potential components of the equation of state.

The semi-empirical equation of state is obtained for 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzol (TATB) being of interest due to its uniquely low sensitivity to the external thermal and mechanical stimuli. High stability, as compared to most known explosive materials, expands the range of varying thermodynamic parameters (pressure, temperature, etc.) in experimental investigations necessary for EOS construction. Moreover, TATB is extremely attractive for scientific research due to its complicated crystalline structure. Having the triclinic system, TATB crystals are characterized by high anisotropy and low symmetry that poses serious difficulties for the X-ray diffraction analysis.

EOS parameters were determined in the X-ray diffraction study of TATB under isothermal and isobaric conditions. Good description of experiments on shock compression, thermal expansion, and thermal capacity, which were attained for the macrostructural pressed TATB members, confirms EOS correctness. The proposed EOS is expected to improve accuracy in describing thermodynamic parameters of unreacted TATB in numerical simulation of shock-wave and detonation processes.

---

2-10

### ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

Д. А. Баранник, С. А. Душенюк, А. А. Котомин

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: BarannikDA@yandex.ru

Одной из важнейших характеристик при обращении изделий с взрывчатыми составами (ВС) является их ударно-волновая чувствительность (УВЧ). При проведении исследований ВС изготавливаются модельные взрывчатые композиции (ВК) с целью получения экспериментальных зависимостей их характеристик от различных факторов. Авторами была использована известная методика определения УВЧ, аналогичная Гар-тесту. Критерием УВЧ являлось критическое давление инициирования детонации модельных ВК.

В работе исследовалось влияние на УВЧ ВК вида инертного пластификатора, соотношения взрывчатого наполнителя (ВВ) и связующего, а также дисперсности, формы и качества кристаллов ВВ.

Модельные ВК содержали октоген, полимер (полиуретановый каучук УК-1, бутадиен-стирольный термоэластопласт ДСТ-30) и пластификатор (дибутилфталат, ди (2-этилгексил) -себацат, ди (2-этилгексил) адипат, промышленное масло ИС-12). Составы изготавливались водно-суспензионным способом; шашки из ВК массой 10 грамм – прессованием. Содержание октогена варьировалось от 88 до 96% мас., связующего – от 4 до 12% мас. Соотношение полимер / пластификатор в связующем составляло 1/1. Пористость зарядов различных серий составляла от 0,4 до 2,8%.

Октоген использовался различной дисперсности и формы кристаллов:

- штатный;
- сферический, полученный из штатного методом окатывания;
- перекристаллизованный из штатного из пропиленкарбоната;
- сферический, полученный из перекристаллизованного из пропиленкарбоната с дальнейшим окатыванием.

В результате исследования УВЧ модельных ВК установлено:

- вид инертного пластификатора практически не влияет на величину УВЧ ВК;
- увеличение количества инертного связующего с 4 до 12% мас. приводит к повышению критического давления инициирования ВК ~ в 2 раза (с 16,7 до 31,6 кбар);
- регулирование дисперсности, формы и качества кристаллов октогена позволяет эффективно влиять на УВЧ ВК (с 26,3 кбар для штатного октогена до 39,0 кбар для октогена, имеющего форму кристаллов, близкую к изометрической).

### STUDY SHOCK WAVE SENSITIVITY MODEL EXPLOSIVE COMPOSITION

D. A. Barannik, S. A. Dushenok, A. A. Kotomin

Special Design and Technology Bureau "Tehnolog",  
St. Petersburg, Russia

E-mail: BarannikDA@yandex.ru

One of the most important characteristics when handling products with explosive composition is shock wave sensitivity (SWS). The models of explosive compositions (MEC) are made for during research in order to obtain the experimental dependences of their characteristics on various factors. The authors have used a known method of determining the SWS similar to Gap-test. SWS are a critical criterion for initiation of detonation pressure MEC.

In this paper, the influence inert plasticizer type, the ratio of explosive filler to binder and dispersion, shape and quality of the crystals on SWS of MEC have been investigated. MEC consisted of HMX, polymer (polyurethane rubber UK-1, butadiene-styrene thermoplastic elastomer DST-30), plasticizer (dibutyl phthalate, di (2-ethylhexyl) sebacate, di (2-ethylhexyl) adipate, industrial oil IS-12).

Formulations were made by water-suspension process; checkers of MEC weighing 10 grams were made by compression. The content of HMX ranged from 88 to 96% wt., binder ranged from 4 to 12% wt. The ratio of polymer /

plasticizer in the binder was 1/1. The porosity of the various series of charges ranged from 0.4 to 2.8%.

HMX was used with different particle sizes and shapes of crystals:

- Conventional;
- Spherical, resulting from the conventional by spheroidization method;
- Recrystallized from conventional from propylene carbonate;
- Spherical, obtained from propylene carbonate and recrystallized from a further spheroidization.

As the result of the study SWS of MEC it was established:

- Type of inert plasticizer virtually has no effect on the SWS of MEC;
- Increase the amount of inert binder with 4 to 12 % wt. leads to two times increase a critical pressure of initiating of MEC (from 16.7 to 31.6 kbar);
- Regulation of dispersion, shape and quality of the crystals of HMX allowed effectively influence on SWS of MEC (from 26.3 kbar for conventional HMX to 39.0 kbar for HMX with the crystals shape, close to isometric).

---

2-11

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА  
ОСКОЛОЧНЫХ СПЕКТРОВ RSFC  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ОДИНЦОВА-ГРЭДИ**

А. В. Бармин<sup>1</sup>, В. Г. Кожевников<sup>1</sup>,  
Ю. Г. Печенев<sup>1</sup>, Н. А. Имховик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ГосНИИ «Кристалл», Россия, Дзержинск Нижегородской обл., Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: kristall@niikristall.ru, imkhovik-n@mail.ru

В работе продолжены комплексные экспериментально-теоретические исследования по разработке и изучению свойств новых взрывчатых составов (ВС), отвечающих современным требованиям по технологичности и эксплуатационной безопасности, оптимизированных для получения высококачественного дробления корпусов макетов. Результаты ранних исследований опубликованы в [1–7]. В настоящей работе представлены результаты статистической обработки осколочных спектров СОЦ № 12, снаряженных как прессовыми ВС (ГАСС-8, ГАСС-12, ТАСС-12 и Гекфал-12 КМ), так и литьевыми ВС (ОЛД-20, ОЛА-8, ОЛА-15 и ГЛА-15). Использовались стандартные осколочные цилиндры (СОЦ или RSFC – Russian Standard Fragmenting Cylinder) закрытого типа № 12 [1, 2], изготовленные как механической обработкой, так и штамповкой из сталей С60 и 80Г2С. Данный экспериментальный метод является наиболее обоснованным и доступным для сравнительного определения бризантных свойств штатных (ТНТ, А-IX-2, окфол) и перспективных ВС.

Дальнейшие исследования предполагается проводить с использованием математического аппарата пред-

ставления осколочных спектров. В настоящее время для описания спектров широко используется распределение Вейбулла. Рассмотренное в докладе авторами распределение предложено В. А. Одинцовым в 1982 г. и опубликовано в работах [2, 8–10]. Аналогичное распределение было предложено Д. Грэди в монографии [11]. Д. Грэди для иллюстрации бимодальных спектров так же использовал данные по СОЦ № 12. Авторы доклада предлагают описывать осколочные спектры СОЦ № 12 с помощью гиперэкспоненциальной модели распределения – модели Одинцова–Грэди. Сравнительная оценка адекватности представления спектров показала, что среднее значение критерия Романовского по модели Одинцова–Грэди примерно в 1,8 раза меньше соответствующего значения для модели Вейбулла, что свидетельствует о существенно большей точности использованной в работе гиперэкспоненциальной статистической модели.

**Литература**

1. В. А. Одинцов. Моделирование процессов фрагментации с помощью унифицированных цилиндров. М.: Изд-во МГТУ, 1991, 60 с.
2. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, в 2 т. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002, т. 2, 656 с.
3. В. А. Одинцов, И. О. Шкалябин. Дробящее действие смесевых ВВ в унифицированных цилиндрах // Физика горения и взрыва. 1994. № 3. С. 147–150.
4. А. В. Бармин, М. Е. Евстифеев, В. П. Ильин, В. Г. Кожевников, В. А. Одинцов, Н. А. Имховик. Осколочный спектр стандартного цилиндра № 12 RSFC, снаряженного пластизольным взрывчатым составом // Оборонная техника. 2010. № 1–2.
5. В. Г. Кожевников, А. В. Бармин, М. Е. Евстифеев, А. Г. Карачёв, Е. В. Колганов, В. А. Одинцов, Н. А. Имховик. Дробящее действие состава ОЛА-8 в стандартном осколочном цилиндре № 12 // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2010. № 1. С. 38–42.
6. А. В. Бармин, А. Г. Карачев, В. Г. Кожевников, Е. В. Колганов, Ю. Г. Печенев, В. А. Одинцов, Н. А. Имховик. Осколочки корпусов естественного дробления как фактор риска при оценке противоосколочной стойкости средств индивидуальной защиты // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2011. Вып. 1–2. С. 27–35.
7. А. В. Бармин, Ю. Г. Печенев, А. Г. Карачёв, В. Г. Кожевников, И. О. Шкалябин, В. П. Ильин, Е. В. Колганов, В. А. Одинцов, Н. А. Имховик. Испытание стандартного осколочного цилиндра RSFC № 12, снаряженного составом ГАСС-8 // Оборонная техника. 2011. № 2–3. С. 15–20.
8. В. А. Одинцов. Бимодальное распределение фрагментов цилиндров // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 5. С. 118–122.
9. В. А. Одинцов. Двумерное распределение осколков цилиндров по массе и характеристике формы // Физика горения и взрыва. 1993. № 1. С. 129–133.
10. В. А. Одинцов. Двухкомпонентная модель спектра разрушения цилиндров // Труды МВТУ № 387 «Механика импульсных процессов». М.: МВТУ им. Баумана, 1982.
11. Dennis Grady. Fragmentation of Rings and Shells: The Legacy of N. F. Mott Publisher: Springer; 1st Edition. (November 23, 2006).

## STATISTICAL TREATMENT OF RSFC FRAGMENTATION RANGES USING ODINTSOV-GRADY DISTRIBUTION

A. V. Barmin<sup>1</sup>, V. G. Kozhevnikov<sup>1</sup>,  
Yu. G. Pechenev<sup>1</sup>, N. A. Imkhovik<sup>2</sup>

1JSC «GosNII «Kristall»», Dzerzhinsk, Nizhegorodskaya oblast,  
Russia

2BMSTU, Moscow

E-mail: kristall@niikristall.ru, imkovik-n@mail.ru

The paper presents the results of complex experimental and theoretic investigations on the development and research of properties of new explosive compositions consistent with modern requirements for producibility and operational safety, optimized for high quality fragmentation of model constructions. The results of earlier investigations were presented in [1–7]. This paper describes the results of statistical treatment of fragmentation ranges of RSFC No.12 charged with pressed explosive compositions (GASS-8, GASS-12, TASS-12 and Gekfal-12 KM) and castable explosives (OLD-20, OLA-8, OLA-15, GLA-15). There were used standard fragmentation cylinders (RSFC – Russian Standard Fragmenting Cylinder) of closed type No.12 [1, 2] made by mechanical operation and by stamping using S60 and 80G2S steels. This experimental method is the most reasonable and accessible for comparable determination of standard explosives brisance (TNT, A-IX-2, ocfol) and of promising explosive compositions.

Further evaluation is supposed to carry out using an apparatus for presentation of fragmentation ranges. At present Weibull distribution is widely used for description of fragmentation ranges. The distribution reviewed by the authors was offered by V.A. Odintsov in 1982 and published in works [2, 8–10]. D.Grady offered similar distribution in his monograph [11]. D.Grady also used the results achieved with RSFC No.12 for illustration of bimodal ranges. The authors of the paper suggest to describe fragmentation ranges of RSFC No.12 using a new hyperexponential model of distribution – Odintsov-Grady model. Comparative evaluation of adequacy of distribution ranges presentation showed, that mean value of Romanovsky criterion according Odintsov-Grady model was 1,8 time less than corresponding value for Weibull model. This indicates that there was used more substantial accuracy in the work of hyperexponential statistical model.

### References

1. В. А. Одинцов. Моделирование процессов фрагментации с помощью унифицированных цилиндров. М.: Изд-во МГТУ, 1991, 60 с.
2. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, в 2 т. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002, т. 2, 656 с.
3. В. А. Одинцов, И. О. Шкалябин. Дробящее действие смесевых ВВ в унифицированных цилиндрах // Физика горения и взрыва. 1994. № 3. С. 147–150.
4. А. В. Бармин, М. Е. Евстифеев, В. П. Ильин, В. Г. Кожевников, В. А. Одинцов, Н. А. Имховик. Осколочный спектр стандартного цилиндра № 12 RSFC, снаряженного пластизольным взрывчатый составом // Оборонная техника. 2010. № 1–2.
5. В. Г. Кожевников, А. В. Бармин, М. Е. Евстифеев, А. Г. Карачёв, Е. В. Колганов, В. А. Одинцов, Н. А. Имховик. Дробящее

действие состава ОЛА-8 в стандартном осколочном цилиндре № 12 // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2010. № 1. С. 38–42.

6. А. В. Бармин, А. Г. Карачев, В. Г. Кожевников, Е. В. Колганов, Ю. Г. Печенев, В. А. Одинцов, Н. А. Имховик. Осколочки корпусов естественного дробления как фактор риска при оценке противоосколочной стойкости средств индивидуальной защиты // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2011. Вып. 1–2. С. 27–35.
7. А. В. Бармин, Ю. Г. Печенев, А. Г. Карачёв, В. Г. Кожевников, И. О. Шкалябин, В. П. Ильин, Е. В. Колганов, В. А. Одинцов, Н. А. Имховик. Испытание стандартного осколочного цилиндра RSFC № 12, снаряженного составом ГАСС-8 // Оборонная техника. 2011. № 2–3. С. 15–20.
8. В. А. Одинцов. Бимодальное распределение фрагментов цилиндров // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 5. С. 118–122.
9. В. А. Одинцов. Двумерное распределение осколков цилиндров по массе и характеристике формы // Физика горения и взрыва. 1993. № 1. С. 129–133.
10. В. А. Одинцов. Двухкомпонентная модель спектра разрушения цилиндров // Труды МВТУ № 387 «Механика импульсных процессов». М.: МВТУ им. Баумана, 1982.
11. Dennis Grady. Fragmentation of Rings and Shells: The Legacy of N. F. Mott Publisher: Springer; 1st Edition. (November 23, 2006).

2-12

## ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СОКРИСТАЛЛИЗАТА CL-20 И DNP

А. А. Васильева<sup>1</sup>, Д. В. Дашко<sup>1</sup>, С. А. Душенок<sup>1</sup>,  
А. А. Котомин<sup>1</sup>, С. М. Алдошин<sup>2</sup>, З. Г. Алиев<sup>2</sup>,  
Т. К. Гончаров<sup>2</sup>, Ю. М. Милёхин<sup>3</sup>, Н. И. Шишов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Специальное конструкторско-технологическое бюро  
«Технолог», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,  
Россия

<sup>3</sup>Федеральный центр двойных технологий «Союз»,  
Дзержинский Московской области, Россия

E-mail: a\_kazak83@bk.ru (A. Vasileva)

Методом совместной кристаллизации  $\alpha$ -CL-20 и DNP по испарительной технологии впервые получен высокоэнергетический сокристаллизат 2:1 2,4,6,8,10,12-гексанитро-2,4,6,8,10,12-гексаазаизовюрцитана (CL-20) и 2,4-динитро-2,4-диазапентана (DNP), далее CLD.

Исследованы структура, термическая стабильность, энергетические и детонационные характеристики CLD, определен нижний предел чувствительности к трению. Морфология кристаллов изучалась оптической микроскопией. Структура сокристаллизата доказывалась рентгеноструктурным анализом.

Оптическая микроскопия показала, что кристаллы CLD представляют собой бесцветные хорошо сформированные призмы с гладкой поверхностью.

Рентгеноструктурный анализ показал, что кристаллы CLD принадлежат к моноклинной сингонии, построены из двух молекул CL-20 и одной молекулы DNP, расположенных в общей кристаллографической

позиции. В кристалле CLD обе молекулы CL-20 находятся в  $\gamma$ -конформации. Экспериментально установленная плотность CLD составляет  $1,928 \text{ г/см}^3$ .

Чувствительность к трению ударного характера (нижний предел), определенная по стандартному методу на копке К-44-III, для CLD составляет 240 МПа ( $2400 \text{ кгс/см}^2$ ).

Исследование термической стабильности показало, что разложение CLD имеет двухстадийный характер с максимумами при температурах  $213^\circ\text{C}$  и  $235^\circ\text{C}$ . Энергия активации, полученная из уравнения Аррениуса в области температур  $140\text{--}180^\circ\text{C}$  на линейных участках скоростей разложения для каждой температуры, составляет  $36,7 \pm 0,9 \text{ ккал/моль}$ , предэкспоненциальный множитель  $18,5 \pm 2,09$ .

Скорость детонации прессованных зарядов из CLD определяли экспериментально методом ионизационных датчиков и рассчитывали также при помощи термодинамической программы с уравнением состояния Беккера-Кистяковского-Вильсона (БКВ). При плотности  $1,890 \text{ г/см}^3$  скорость детонации CLD, полученная экспериментально, составляет  $9000 \text{ м/с}$ , полученная расчетным путем –  $9058 \text{ м/с}$ .

Расчетная скорость детонации механической смеси CL-20 и DNP, с учетом нахождения CL-20 в виде  $\gamma$ -полиморфа, при максимальной расчетной плотности ( $\rho = 1,84 \text{ г/см}^3$ ) составляет  $8700 \text{ м/с}$ .

#### OBTAINING, STRUCTURE AND PROPERTIES OF CL-20 AND DNP ENERGETIC COCRYSTAL

A. A. Vasileva<sup>1</sup>, D. V. Dashko<sup>1</sup>, S. A. Dushenok<sup>1</sup>,  
A. A. Kotomin<sup>1</sup>, S. M. Aldoshin<sup>2</sup>, Z. G. Aliev<sup>2</sup>,  
T. K. Goncharov<sup>2</sup>, Yu. M. Milehin<sup>3</sup>, N. I. Shishov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Special Design and Technology Bureau "Tehnolog",  
St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka,  
Russia

<sup>3</sup>The Federal Centre for Dual-use Technologies «Soyuz»,  
Dzerzhinsky, Russia

E-mail: a\_kazak83@bk.ru (A. Vasileva)

A novel cocrystal explosive composed of 2,4,6,8,10,12-hexanitro-2,4,6,8,10,12-hexaazaisowurtzetan (CL-20) in  $\alpha$ -conformation and 2,4-dinitro-2,4-diasapentan (DNP) in a 2:1 molar ratio (hereinafter referred to as CLD) was effectively prepared by evaporation cocrystallization.

The structure, thermal behavior, sensitivity to friction and detonation properties of CLD were studied. The morphology and structure of cocrystal were characterized by optical microscopy (OM) and single crystal X-ray diffraction (SXRD).

OM images showed that the CLD has a colorless prism crystals with smooth surface.

SXRD has revealed that the cocrystal has monoclinic system and consists of two CL-20 molecules and one DNP molecule. Both of CL-20 molecules in cocrystal have  $\gamma$ -conformation. The crystallographic density of cocrystal is  $1,928 \text{ г/см}^3$ .

The cocrystal sensitivity to friction (lower limit), is  $240 \text{ МПа}$  ( $2400 \text{ кгф/см}^2$ ).

DSC and TG tests have indicated that cocrystal decomposition occurs in two stage and are characterized by two maximums in  $213^\circ\text{C}$  and  $235^\circ\text{C}$ . The activation energy, determinate by Arrhenius' equation in temperature range  $140\text{--}180^\circ\text{C}$  in linear section of decomposition rate of each several temperature, is  $37,7 \pm 0,9 \text{ ккал/моль}$ , preexponential factor –  $18,5 \pm 2,09$ .

The detonation velocity of CLD was determined by ionic detectors method and was calculated by BKW code. The detonation velocity of CLD, determinated by experiment is  $9000 \text{ cm/s}$ , the calculation detonation velocity is  $9058 \text{ cm/s}$ . The calculated detonation velocity of mechanical mixture of CL-20 and DNP, assuming CL-20 is  $\gamma$ -conformation and maximum calculation density of mixture  $1,84 \text{ g/cm}^3$ , is  $8700 \text{ cm/s}$ .

2-13

#### СВЯЗЬ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С КРИВИЗНОЙ ФРОНТА НА УЧАСТКЕ РАЗВИТИЯ ДЕТОНАЦИИ

И. Г. Галиуллин, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын,  
Ю. А. Беленовский, Е. Б. Смирнов, В. Н. Дунаев

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

E-mail: galiullin-igor@mail.ru

Существование однозначной связи скорости детонационной волны с кривизной фронта для стационарных режимов распространения детонации подтверждено экспериментально для целого ряда взрывчатых веществ (ВВ), в том числе обладающих низкой чувствительностью.

В данной работе приведены результаты исследования процесса установления фронта детонационной волны на участке развития при одноточечном инициировании. Исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром  $\varnothing 60 \text{ мм}$  из низкочувствительного ВВ. В экспериментах регистрировалась форма и скорость детонационного фронта. Исследование скорости детонации ВВ проводилось с использованием электроконтактной методики в диапазоне изменения длины образцов  $5\text{--}240 \text{ мм}$ . С помощью высокоскоростного фоторегистратора с линейной щелевой разверткой регистрировались временные профили выхода детонационной волны на торцевую поверхность исследуемых образцов, которые пересчитывались в форму детонационного фронта с учетом зарегистрированных величин скорости детонации.

Показано, что участок установления скорости детонации заканчивается на расстоянии  $\sim 3d$  ( $d$  – диаметр заряда) образцов. Полученные данные демонстрируют однозначную связь скорости детонации с кривизной фронта детонационной волны на участке развития детонации для исследуемого ВВ.



## DETONATION WAVE VELOCITY VERSUS CURVATURE AT DETONATION DEVELOPMENT AREA

I. G. Galiullin, B. G. Loboiko, O. V. Kostitsyn,  
Yu. A. Belenovskiy, E. B. Smirnov, V. N. Dunaev

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

E-mail: galiullin-igor@mail.ru

Clear relationship between the detonation wave velocity and the front curvature for steady conditions of detonation propagation is experimentally confirmed for a whole number of explosives (HE) including those of low sensitivity.

The process of detonation wave front formation at the detonation development area in the case of single-point initiation is investigated and results of this study are presented. Investigations were performed with  $\varnothing 60$  mm cylindrical samples of low-sensitive explosive material. The experiments registered shape and velocity of the detonation front. The electrical contact technique was used to study HE detonation velocity of samples having 5–240 mm length. A streak camera recorded time profiles of the detonation wave arrival at the end surface of test samples and then these profiles were recalculated into the detonation front shape with the regard for the recorded detonation velocities.

It is shown that the detonation velocity development area terminates at the distance of  $\sim 3d$  of samples ( $d$  – a charge diameter). The obtained data demonstrated clear relationship between the detonation velocity and the front curvature at the detonation development area for the test explosive material.

---

2-14

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ВЗРЫВНОЕ ДЕЙСТВИЕ НОВЫХ МОЩНЫХ ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ТКХ-50, MAD-X1 И APX

В. К. Голубев, Т. М. Клапётке

Мюнхенский университет Людвига-Максимилиана, Мюнхен,  
Германия

Широкие исследования по синтезу и изучению свойств новых высокоазотистых энергетических материалов различного назначения проводятся в настоящее время на химическом факультете Мюнхенского университета Людвига-Максимилиана. Среди этих материалов и такие мощные, низкочувствительные взрывчатые вещества (ВВ), которые по ряду свойств превосходят основные наиболее часто используемые в военных приложениях ВВ, такие как гексоген (RDX), октоген (HMX) и некоторые другие. В работе приводятся результаты, полученные для трех таких перспективных высокоазотистых ВВ. Это бисгидроксиламмоний 5,5'-бис(тетразолат-1N-оксид) (TKX-50), дигидроксиламмоний 3,3'-динитро-5,5'-бис-1,2,4-триазол-1,1-диолат (MAD-X1) и 1,7-диамино-1,7-динитримино-2,4,6-тринитро-2,4,6-триазагептан (APX). Все эти ВВ характе-

ризуются относительно простой технологией изготовления, являются чрезвычайно мощными и в то же время обладают необходимой термической стойкостью, низкой токсичностью и высокой безопасностью при обращении с ними. Различные физико-химические свойства определены с использованием методов рентгеновской дифракции, ядерного магнитного резонанса, инфракрасной спектроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии. Определены чувствительности к удару, трению и электростатическому разряду. Аналогичные результаты приведены также для RDX и HMX.

Расчетные результаты по определению детонационных свойств и уравнений состояния продуктов взрыва в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL) получены по программе EXPLO5 V.6.02. Расчеты выполнены как для имеющих кристаллическую плотность, так и для пористых и имеющих небольшие добавки полимерного связующего ВВ. Значения стандартных энтальпий образования определены по программе Gaussian 09 на уровне теории CBS-4M. Сопоставительные расчеты по определению взрывного действия рассмотренных ВВ на преграду из меди проведены по программе ANSYS Autodyn. В первой серии одномерных расчетов в плоской, цилиндрической и сферической постановке получены результаты по распространению в преградах ударных волн, вызванных выходом детонационных волн на границу раздела ВВ-преграда. Во второй серии подобных расчетов получены результаты по разгону пластин, цилиндрических и сферических оболочек. В третьей серии двумерных расчетов в осесимметричной постановке получены результаты по кратерообразованию при взрыве на толстой преграде цилиндрического заряда ВВ. В четвертой серии подобных расчетов получены результаты по пробиванию тонких преград. В результате проведенных расчетов в целом получено, что во всех рассмотренных условиях взрывного нагружения характеристики взрывного действия трех новых ВВ существенно превышают таковые для RDX и находятся на уровне HMX. Отмечен ряд более тонких эффектов сходства и различия взрывного действия рассмотренных ВВ.

## PHYSICAL, CHEMICAL AND DETONATION PROPERTIES AND EXPLOSIVE ACTION OF NEW POWERFUL HIGH-NITROGEN EXPLOSIVES TKX-50, MAD-X1 AND APX

V. K. Golubev, T. M. Klapyotke

Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), Munich,  
Germany

Currently, large-scale research in synthesis and properties of new high-nitrogen energetic materials are in progress at Department of Chemistry of Ludwig-Maximilians-Universität München. These materials also include powerful low-sensitive explosives (HE) that overpass by some of their properties the basic explosives such as RDX, HMX, etc. that are the most often used in military applications. The paper gives the results obtained for these three high-nitrogen advanced explosives that are bishydroxylammonium 5,5'-bis(tetrazolate-1N-oxide) (TKX-50), dihydroxylammonium 3,3'-dinitro-5,5'-bis-1,2,4-triazol-1,1-diolate

(MAD-X1) and 1,7-diamin-1,7-dinitrimin-2,4,6-trinitro-2,4,6-triazahexptane (APX). All these HE are easy to generate, they are extremely powerful but at the same time they show the required thermal strength, low toxicity level and high handling safety. Various physical and chemical properties are evaluated using X-ray diffraction, nuclear magnetic resonance, infrared spectroscopy, and differential scanning calorimetry methods. Sensitivities to impact, friction, and electrostatic charge are also determined. The same results are cited for RDX and HMX.

The calculation results on evaluating detonation properties and equation states for explosive products in Jones-Wilkins-Leigh (JWL) form are obtained using EXPLO5 code, V.6.02. The calculations are performed both for the substances with crystalline density and porous materials doped with small amounts of polymer binding HE. The values of typical formation enthalpies are determined using Gaussian 09 code at CBS-4M theory level. Comparative calculations on evaluating explosive action of the HE under consideration on copper barrier are conducted using ANSYS Autodyn code. The first series of one-dimensional calculations for plane, cylindrical, and spherical sets includes the results obtained for shock wave propagation in barriers induced by detonation waves out on HE-barrier boundary interface. The second series of these calculations provides the results obtained on acceleration of plates, cylindrical and spherical shells. The third series of two-dimensional calculations in axially symmetric set gives the results on breaking through thin barriers. The results of all calculations performed show that explosive action parameters of these three newly developed HE in all explosive loading conditions under consideration significantly overpass those of RDX and are at the same level as those of HMX. Some more fine distinctions and similarities in explosive action of the above HE are also noted.

---

2-15

**МЕХАНИЗМЫ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ  
РЕАКЦИИ РАЗЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЫ  
ТРИАМИНОТРИНITРОБЕНЗОЛА  
В РАЗЛИЧНЫХ ИСХОДНЫХ СОСТОЯНИЯХ**

В. К. Голубев

Мюнхенский университет Людвига-Максимилиана, Мюнхен,  
Германия

2,4,6-триамино-1,3,5-тринитробензол (ТАТБ) является наиболее выдающимся представителем класса низкочувствительных взрывчатых веществ (ВВ). Он обладает чрезвычайно низкой чувствительностью к тепловому воздействию, механическому удару, ударно-волновому нагружению и в связи с этим широко используется в наиболее ответственных системах современной военной техники. Считается, что низкая чувствительность ТАТБ в целом и высокий уровень сопротивления возбуждению детонации в частности в значительной степени обусловлены наличием пространственной сетки N-O и N-H связей, которые обеспечивают сильное внутримолекулярное и межмолекулярное водородное связывание в пределах плоскостей кристаллической

решетки. В настоящее время продолжается дальнейшее изучение физико-химических свойств ТАТБ с использованием экспериментальных и расчетных методов исследования. Одним из основных направлений здесь является изучение явления разложения ВВ, а именно его механизмов, кинетики и энергетики в условиях различных внешних воздействий. Несколько возможных первичных механизмов разложения ТАТБ из его основного состояния рассматривались ранее в ряде работ. Это наиболее простой механизм, обусловленный отрывом нитрогруппы, нитро-нитритная (CONO) изомеризация с последующим отрывом нитритной группы, внутримолекулярный перенос водорода от аминогруппы к нитрогруппе (HONO изомеризация) с несколькими последующими каналами реакции разложения, такими как отрыв HONO или OH групп, образование молекул бензофураза или производной бензофураксана с отделением молекулы воды.

Все эти механизмы изучены в работе не только для основного состояния молекулы ТАТБ, но и для ее низшего возбужденного триплетного состояния, а также для положительно и отрицательно заряженных состояний. Электронная структура молекул ТАТБ и молекул промежуточных продуктов рассмотренных реакций в различных исходных состояниях рассчитывалась с помощью метода теории функционала плотности с гибридным функционалом B3LYP. В качестве основного базисного набора электронных функций использовался базисный набор 6-31+G (d). Для всех стационарных и переходных состояний молекул учитывались поправки на энергию нулевых колебаний. В процессе определения кривых потенциальной энергии при отрыве различных групп и при перестройке структуры молекул длины характерных связей фиксировались на определенном значении, а для остальных параметров молекул проводилась полная оптимизация. В результате расчетов для всех исходных состояний молекулы ТАТБ определены структуры и энергии всех исходных и образующихся в процессе протекания реакций разложения продуктов, определены энергетические барьеры этих реакций. Отмечено существенное влияние исходного состояния молекул на пути реакции разложения и на реализуемые энергетические барьеры.

**MECHANISMS AND ENERGETIC BARRIERS  
OF DECOMPOSITION REACTION OF TATB  
MOLECULE IN VARIOUS INITIAL STATES**

V. K. Golubev

Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), Munich,  
Germany

2,4,6-triamin-1,3,5-trinitrobenzene (TATB) is the most outstanding substance among low-sensitive high-explosives (HE). It shows extremely low sensitivity to thermal effect, mechanical impact, and shock-wave loading therefore it is widely used in most critical systems of up-to-date weapon and military equipment. They believe that low sensitivity of TATB in general and its high resistance to shock initiation in particular are conditioned mainly by the presence of spatial grid of N-O and N-H bonds providing strong intramolecular and intermolecular hydrogen bond-

ing within the planes of crystal lattice. Currently, they continue studying physical and chemical properties of TATB using experimental and computational research methods. One of the main research areas includes investigating process of HE decomposition, namely its mechanism, kinetics and energy parameters under various external effects. Several possible primary mechanisms of TATB decomposition were considered in earlier works. This is the most simple mechanism induced by detachment of nitrite group which consists in nitro-nitrite (CONO) isomerization followed by detachment of nitrite group, intramolecular hydrogen transfer from aminogroup to nitrogroup (HONO isomerization) with several subsequent channels of decomposition reaction such as detachment of HONO- or OH-groups, formation of benzofurazan molecules or benzofurazan derivative with dissociation of aqua molecule.

All these mechanisms are investigated in the paper not only in terms of the basic state of TATB molecule but also in terms of its inferior excited triplet state as well as of positively and negatively charged states. Electronic structure of TATB molecules and molecules of intermediary products of the given reactions in different initial states were calculated using DFT method with B3LYP hybrid functional. 6-31+G (d) basis set was used as the main basis set of electronic functions. Allowances for zero-point oscillation energies are made for all steady and transition states of molecules. When determining potential energy curves at detachment of different groups and rearrangement of molecule structure the length of typical bonds was held at a fixed value while other molecule parameters being optimized in full scope. Calculations were performed for all initial states of TATB molecule to determine the structure and energies of all initial products and products yielded in the course of decomposition reactions, as well as to define energetic barriers of these reactions. The initial state of molecule was noted to significantly influence the ways of decomposition reaction and energetic barriers implemented.

ном спектральном диапазоне не превышало временного разрешения оптического тракта. Спектр люминесценции представляет собой широкую бесструктурную полосу, на фоне которой выделяется интенсивная и чрезвычайно узкая полоса при  $\lambda = 380$  нм.

Если кристалл подвергнуть предварительной радиационной обработке  $\sim 150$  импульсов и провести изменение спектра люминесценции, то наблюдается снижение интенсивности свечения в области 400–500 нм, что связано с реабсорбцией свечения радиационными дефектами (по-видимому,  $\text{NO}_2$ -радикалам, максимум полосы поглощения которых  $\sim 440$  нм). Интенсивность люминесценции бесструктурной полосы не зависит от температуры в интервале 80–300 К.

Выше описанное свойство позволяет связать эту полосу свечения с внутризонной люминесценцией, возникающей при излучательных переходах электронов зоны проводимости и дырок валентной зоны [1]. Узкая полоса, напротив, проявляет температурную зависимость, типичную для внутрицентрального свечения. Измерения, проведенные при  $T = 30$  К, позволило установить, что полоса смещается в положение  $\lambda = 370$  нм и имеет полуширину 0,015 эВ.

В интервале температур 80–250 К интенсивность свечения спадает с энергией активации  $E = 0,017$  эВ. Предположительно, эта полоса свечения связана с подвижными экситонами большого радиуса. В пользу этого предположения говорит отсутствие полосы при проведении экспериментов на поликристалле, который имеет множество стоков для подвижных экситонов (дислокации, границы зерен).

#### Литература

1. Высокэнергетическая электроника твердого тела / Под ред. Д. И. Вайсбурда, Новосибирск, изд. «Наука», 1982. 237 с.

### RADIATION-INDUCED LUMINESCENCE OF HEXOGEN MONOCRYSTALS IN THE PRE-EXPLOSIVE REGIM UNDER THE INFLUENCE OF PULSED ELECTRON BEAMS

B. P. Aduев, S. S. Grechin, I. Yu. Liskov

Institute of Coal Chemistry and Material Science SB RAS,  
Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Radiation-induced luminescence of hexogen monocrystals under influence of electron accelerator pulses (200 keV, 50 ps) was investigated. Luminescence spectra in spectral interval 350–650 ns (300 K) were registered by using of monochromator MDR-3, photomultiplier ELU-FM and 7404 Tektronix oscilloscope. Temporal resolution of the optical path was 2 ns.

Absorbed dose per pulse was  $5 \cdot 10^{-3}$  J/sm<sup>2</sup> to avoid the accumulation effect. Luminescence pulse duration over the entire spectral range does not exceed the time resolution of the optical path. Luminescence spectrum is a broad structureless band against which stands extremely intense and narrow band at  $\lambda=380$  nm.

If the crystal is subjected to pre-radiation treatment  $\sim 150$  pulses and measure the luminescence spectrum then there is a decrease in the emission intensity in 400–500 nm,

2-16

### РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ СВЕЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕКСОГЕНА В ДОВЗРЫВНОМ РЕЖИМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Б. П. Адуев, С. С. Гречин, И. Ю. Лисков

Институт углерода и химического материаловедения  
СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

В работе исследовано радиационно-индуцированное свечение монокристаллов гексогена при воздействии импульсами ускорителя электронов (200 кэВ, 50 пс). Регистрировались спектры люминесценции в спектральном интервале 350–650 нс при 300 К с использованием монохроматора МДР-3, фотомножителя ЭЛУ-ФМ и осциллографа Tektronix 7404. Временное разрешение оптического тракта составляло 2 нс.

Поглощенная доза в импульсе составляла величину  $5 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup>, чтобы избежать эффекта накопления. Длительность импульсов свечения во всем исследован-

that is connected with the reabsorption of luminescence radiation defects (apparently,  $\text{NO}_2$ -radicals whose absorption band maximum is  $\sim 440$  nm). Structureless band luminescence intensity does not depend on temperature in the range 80–300 K.

Above described property to associate the band with the intraband luminescence emission arising in radiative transitions of conduction band electrons and valence-band holes [1]. A narrow strip, in contrast, shows the temperature dependence, typical for intracenter luminescence. Measurements carried out at  $T = 30$  K, revealed that the band is shifted to a position  $\lambda = 370$  nm and has a half width of 0.015 eV

In the temperature range 80–250 K, the luminescence intensity decreases with an activation energy  $E = 0,017$  eV. Presumably, this luminescence band is connected with moving excitons with large radius. This assumption is supported by the absence of bands in experiments on the polycrystal, which has plenty of sinks for mobile excitons (dislocations, grain boundaries)

### References

1. The high-energy solid-state electronics / Ed. DI Vaysburd, Novosibirsk, ed. «Science», 1982. 237 p.

---

2-17

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ДЕТОНАЦИИ В НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ВВ ТАТБ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ЕГО ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ СТОЛБИКОМ ИЗ БРИЗАНТНОГО ВВ

В. В. Атрошкин, А. Г. Глущенко, Д. А. Грибанов,  
А. К. Музыря, П. А. Насонов, В. И. Сдобнов,  
Н. А. Смирнов, С. Д. Стринадкин

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

Рассматривается развитие детонации в диске из низкочувствительного взрывчатого вещества ТАТБ при его нагружении цилиндрическим столбиком из бризантного ВВ.

С помощью скоростного фотохронографа регистрировалась форма детонационного фронта при выходе на противоположный инициированию торец диска из ТАТБ. С помощью волоконно-оптических датчиков регистрировались времена прихода детонационной волны в заданные точки на поверхности диска из ТАТБ.

Опыты проведены при различной температуре и пористости ТАТБ. Требуемая пористость ТАТБ обеспечивалась изменением режима прессования дисков. В опытах изменялись параметры нагружения ТАТБ путем введения преграды в виде алюминиевого диска различной толщины между столбиком и диском из ТАТБ, а также путем изменения диаметра столбика из бризантного ВВ.

### STUDYING THE DETONATION DEVELOPMENT IN LOW-SENSITIVE TATB-BASED EXPLOSIVE LOADED BY CYLINDER-SHAPED HE

V. V. Atroshkin, A. G. Gluschenko, D. A. Gribanov,  
A. K. Muzyrya, P. A. Nasonov, V. I. Sdobnov,  
N. A. Smirnov, S. D. Strinadkin

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

The paper studies how detonation develops in the low-sensitive TATB pellet loaded by the cylinder-shaped high explosive (HE).

Streak camera was used to record the shape of detonation front at the moment of its arrival at the opposite face of TATB pellet. Fiber-optic sensors were used to register the instants of detonation wave arrival into the target points at the TATB pellet surface.

Experiments were carried out at various temperatures and involved TATB of different porosity. Required porosity was ensured by different modes of TATB pressing. In the experiments, TATB loading parameters were changed by means of introducing the different-thickness Al circular barrier between the HE cylinder and TATB pellet, as well as by varying the diameter of HE cylinder.

---

2-18

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ С БОЛЬШИМ КРИТИЧЕСКИМ ДИАМЕТРОМ

Г. С. Григорьев<sup>1</sup>, В. И. Колпаков<sup>2</sup>, А. В. Старшинов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Красноармейский НИИ механизации, Красноармейск,  
Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>3</sup>Группа компаний «НТ-СВК-МОНМАГ»

E-mail: kniim21@yandex.ru, info@kniim.ru

Практическая значимость и применимость взрывчатых веществ (ВВ) определяется совокупностью свойств физико-химических, эксплуатационных, включая вопросы безопасности, стоимостных и, естественно, целевых – взрывчатых. Некоторые из взрывчатых характеристик ВВ, например, скорость ( $D$ ) и критический диаметр ( $d_k$ ) детонации, определяются достаточно достоверно с применением отработанных методик. Для определения других характеристик, к числу которых относятся давление детонации, температура взрыва и др., требуются сложные измерительные схемы с использованием специальных датчиков и аппаратов.

Наиболее важные с практической точки зрения параметры эффективности действия взрыва на окружающую среду – взрывная эффективность или работоспособность оцениваются, как правило, по косвенным методам сравнения с базовым ВВ, в частности, с тротилом (TNT) с введением понятия – тротиловый эквивалент.

Одним из способов оценки эффективности взрывного действия смесевых систем на основе аммиачной селитры (АС) представляется метод обжатия свинцового столбика от взрыва заряда ВВ заданной массы, расположенного на определенном расстоянии от массивной «наковальни».

Для проведения опыта необходим свинцовый столбик стандартных размеров (столбик, используемый при определении бризантности по методу Гесса, диаметр столбика – 40, высота – 60 мм) и стальной блок – «наковальня» заданных размеров и массы (25 кг). Эффективность действия взрыва заряда ВВ определяется величиной обжатия столбика при заданных параметрах заряда испытуемого ВВ (масса, диаметр), дополнительного детонатора (тип ВВ, масса, конструкция) и воздушного промежутка – зазора ( $Z$ ) между нижним срезом (дном) заряда и наковальней

Для получения воспроизводимых результатов при выполнении их на различных полигонах (экспериментальных базах) должны быть заданы постоянными диаметр (площадь воспринимающей поверхности) и масса наковальни, а так же масса заряда испытуемого ВВ и его диаметр ( $d_3$ ). Естественно, что в зависимости от задач эксперимента масса, форма и размеры заряда испытуемого ВВ могут задаваться исследователем по своему усмотрению, но с детальной фиксацией всех параметров. В экспериментах могут так же использоваться заряды готовой товарной формы, например, патроны.

Для проверки предположений о характере и степени влияния различных факторов, в частности, концентрации энергии УВ и догорания ПВ в трубе-подставке численными методами механики сплошной среды в двумерной постановке проведены расчеты поведения сборки при взрыве и действии на наковальню только ударных волн. В качестве ВВ для расчета выбран аммонит 6ЖВ, для которого принят режим детонации – ( $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$ ,  $D = 4,6 \text{ км/с}$ ,  $Q = 1000 \text{ ккал/кг}$ ,  $k = 1,84$ ,  $P_{CJ} = 7,45$ ). В обоих вариантах столбик – свинец ( $\rho_0 = 11,34 \text{ г/см}^3$ ,  $K = 53,3 \text{ ГПа}$ ,  $G = 11,0 \text{ ГПа}$ ,  $Y = 0,3 \text{ ГПа}$ ,  $\nu = 0,45$ ,  $P_{\min} = 0,92 \text{ ГПа}$ ,  $C_0 = 2,092 \text{ км/с}$ ,  $X = 1,452$ ).

Для получения более сопоставимых данных целесообразно выполнить эксперименты для всех сравниваемых ВВ в идентичных условиях и уточнить исходные условия для расчетов.

На основании результатов установочных опытов показано, что наибольшей работоспособностью по данной методике обладает аммонит 6ЖВ.

Полученные результаты подтверждают существенность влияния структуры заряда и равномерности распределения компонентов в смесевых ВВ на взрывчатые характеристики системы.

## INDUSTRIAL EXPLOSIVES EFFICIENCY DETERMINATION DEMAND ON CHANGE OF THE SIZES OF THE LEAD COLUMN THROUGH THE AIR INTERVAL

G. S. Grigoriev<sup>1</sup>, V. I. Kolpakov<sup>2</sup>, A. V. Starshinov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Krasnoarmeysky Institute of Mekhanization, Krasnoarmeysk, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Association of companies NT-SVK-MONMAG

E-mail: kniim21@yandex.ru, info@kniim.ru

Results of determination of explosive efficiency various types of explosives on change of the sizes of a lead column through an air interval and a massive anvil are presented. It is shown that the result of experiment has high sensitivity to change of type and characteristics of explosives. Result as strongly depends on parameters of test assemblage. Comparison settlement and experimental data characterizing behavior of system is presented. Calculations are carried out by means of numerical methods of mechanics of the continuous environment.

Keywords: industrial explosives, explosive efficiency, test methods, numerical calculations.

---

2-19

## ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ ДОЗВУКОВОМ И СВЕРХЗВУКОВОМ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

Е. Ф. Грязнов<sup>1</sup>, М. М. Бойко<sup>1</sup>, В. И. Колпаков<sup>1</sup>,  
Е. В. Никитина<sup>1</sup>, А. В. Уткин<sup>2</sup>, В. М. Мочалова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

E-mail: gryaznov-2000@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию волновой стадии взрывного нагружения стальных цилиндрических оболочек. При проведении экспериментов проводилась регистрация скорости свободной поверхности оболочек  $V(t)$  с применением лазерного интерферометра VISAR.

Нагружение оболочек проводилось по нескольким схемам – контактными скользящим и падающим детонационными фронтами при головном, центральном и осевом инициировании зарядов ВВ. Для сравнительного анализа проводилось также взрывное нагружение плоских образцов, выполненных из тех же сталей.

Исследования проводились в широком диапазоне параметров взрывного нагружения: скорость детонации взрывчатых составов менялась в диапазоне 2500–8100 м/с, и начальное давление на нагружаемой поверхности образцов составляло 2–40 ГПа. Это позволило исследовать характерные особенности профилей скорости  $V(t)$  в до- и сверхзвуковом режимах нагружения.

При нагружении плоских образцов и оболочек падающим детонационным фронтом на всех зарегистрированных профилях  $V(t)$  прослеживается двух- или трехволновая конфигурация ударных фронтов с четким выделением упругого предвестника. Амплитуды профилей  $V(t)$  в оболочках существенно ниже, чем в плоских образцах.

При нагружении оболочки скользящим детонационным фронтом вид профиля  $V(t)$  существенным образом зависит от соотношения скорости детонации  $D$  и объемной скорости звука  $c_0$  в стали: при  $D > c_0$  наблюдается привычная двухволновая конфигурация ударного фронта, а при  $D < c_0$  ударные фронты явно вырождаются в звуковые. При этом прослеживается связь между амплитудой упругого предвестника и детонационными характеристиками ВВ: с уменьшением скорости детонации амплитуда упругого предвестника падает.

При нагружении плоских образцов для всех ВВ зафиксировано образование отколов и определены величины откольной прочности стали.

В эксперименте с использованием гексогена ( $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$ ,  $D = 5600 \text{ м/с}$ ) зафиксирован профиль  $V(t)$ , свидетельствующий о двух последовательных отколах.

Численное моделирование, выполненное в двухмерной постановке, позволило объяснить особенности экспериментально полученных профилей  $V(t)$ .

В оболочках при нагружении как скользящим, так и падающим детонационными фронтами, отколы наблюдались только в случае  $D > c_0$ .

#### WAVE EFFECTS IN A STEEL CYLINDRICAL SHELLS BY SUPERSONIC AND SUBSONIC LOADING MODES

E. F. Gryaznov<sup>1</sup>, M. M. Boiko<sup>1</sup>, V. I. Kolpakov<sup>1</sup>,  
E. V. Nikitina<sup>1</sup>, A. V. Utkin<sup>2</sup>, V. M. Mochalova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>The Institute of problems of Chemical Physics RAS,  
Chernogolovka, Russia

E-mail: gryaznov-2000@mail.ru

This work is dedicated to experimental and theoretical research of the wave stage under explosive loading in the steel cylindrical shells. While experiments free-surface velocity was registered use of Laser Interferometer VISAR.

Shells loading had several schemes – contact sliding detonation front and falling detonation front in the main, central and axial initiating charges. Flat samples was making from the same steel and have been loaded by High Explosive for comparative analysis carried out.

Research was conducted in a wide range of parameters for explosive loading: detonation velocity of explosive compositions have been varied in the range of 2500–8100 m/s, whereby the initial pressure at the sample surface was 2–40 GPa. This gave an option to explore the speed profiles  $V(t)$  characteristics under supersonic and subsonic loading.

When flat samples and shells loaded by falling detonation front, there were a two- or three-waves shock front configuration with an exact allocation of elastic precursor in all registered profiles. The amplitudes of the shells velocity profiles are considerably lower than in the flat test pieces.

When shells loaded by sliding detonation front, the view of  $V(t)$  profile substantially depended on the ratio of detonation velocity ( $D$ ) and the volumetric sound speed ( $c_0$ ) in steel: with condition ( $D > c_0$ ) there is the familiar two-waves configuration of the shock front, and with condition ( $D < c_0$ ) there is shock front degenerating into sound front. Whereby there is a relationship between the amplitude of elastic precursor and detonation characteristics of the HE: with speed detonation decreasing elastic precursor amplitude falls.

For flat samples loading by all HE we can fix on appearance of spall and specify numeric value of steel spallation strength was defined.

In experiments using RDX ( $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$ ,  $D = 5600 \text{ м/с}$ ) we recorded a  $V(t)$  profile, which shows two consecutive spall.

Numerical simulation in a two-dimensional setting, allowed to explain features of the experimentally derived profiles  $V(t)$ .

In the shells with loading both sliding and falling detonation fronts, spalls occurred only in case ( $D > c_0$ ).

2-20

#### «ЭФФЕКТ ДОГОРАНИЯ» ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ В ЗАВИСИМОСТЯХ МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА

В. Ю. Давыдов, А. С. Губин, Ф. С. Загрядцкий,  
А. Д. Никитин, И. В. Потапов

Научно-исследовательский машиностроительный институт,  
Москва, Россия

E-mail: vitadavidov@yandex.ru

В публикации [1] было показано, что догорание продуктов детонации (ПД) в воздухе оказывает существенное влияние на метательное действие и скорость расширения ПД. При этом с увеличением скорости движения ПД в воздухе при двустороннем инициировании заряда, эффект догорания проявлялся сильнее. Очевидно, что с увеличением времени контакта ПД с воздухом (то есть времени и расстояния  $x$  ускорения метаемого тела) эффект также должен возрастать.

Другим способом варьирования скоростью движения ПД в воздухе является изменение плотности заряда ВВ. Зависимости скоростей метания пластин  $W$  от плотности заряда  $\rho$  для Окфола-3,5, БТНЭНА, а также их смесей с 15% алюминиевого порошка АСД-4 исследовали по методике М-40.

Эксперименты показали, что для Окфола-3,5, имеющего недостаток кислорода (~33%), при возрастании расстояния ускорения пластины  $x$  с 20 до 30 и 40 мм происходит возрастание  $\partial(W^2)/\partial\rho$  на 12 и 26%, соответственно. В то же время, для БТНЭНА, имеющего 40% избыточного кислорода, такое же возрастание  $x$  практически не оказало влияния на величину  $\partial(W^2)/\partial\rho$ . Ее изменение для различных значений  $x$  не превышало 3,5%. При этом среднее значение  $\partial(W^2)/\partial\rho$  для БТНЭНА в 1,6 раза меньше, чем для Окфола-3,5. Что

касается алюминизированных смесей, то значение  $\partial(W^2)/\partial\rho$  возрастает для смеси с Окфолом-3,5 на 23 и 38%, а для смеси с БТНЭНА на 25 и 55% при повышении расстояния ускорения пластины  $x$  с 20 мм до 30 и 40 мм, соответственно.

Таким образом, на основании анализа зависимости  $W^2(\rho)$  получено подтверждение реакции ПД с окружающим воздухом как для ВВ без добавки Al, имеющих отрицательный кислородный баланс, так и для ВВ, содержащих добавку алюминия, для которых эффект проявляется сильнее.

### Литература

1. Давыдов В. Ю., Губин А. С., Загрядцкий Ф. С., Потопов И. В. // Труды межд. конференции «Ударные волны в конденсированных средах», Киев, 2012. С. 334–338.

### DETONATION PRODUCTS “AFTERBURNING EFFECT” IN DEPENDENCIES OF ACCELERATION ABILITY ON CHARGE DENSITY

V. Yu. Davydov, A. S. Goubin, F. S. Zagryadtskiy,  
A. D. Nikitin, I. V. Potapov

Research Institute of Mechanical Engineering, Moscow, Russia  
E-mail: vitadavidov@yandex.ru

It was shown in publication [1] that afterburning of detonation products (DP) in air have an essential influence on acceleration ability and DP expansion velocity. At the same time, it was shown that the higher DP velocity in the air, the higher “afterburning effect”. Obviously, that when the time of DP contact with air (that is the time and the distance of plate acceleration) increases, the “afterburning effect” also should increase.

Another way to vary DP velocity in the air is to change the charge density. The plate velocity  $W$  dependencies on charge density  $\rho$  for Okfol-3,5, BTNENA and its mixtures with 15% of Al powder ASD-4 were investigated by M-40 method.

Experiments showed, that for Okfol-3,5, having deficit of oxygen (~33 %), the growth of plate acceleration distance  $x$  from 20 mm to 30 and 40 mm led to increase  $\partial(W^2)/\partial\rho$  by 11 and 26% accordingly. However for BTNENA, having 40% excess of oxygen this growth practically didn't influence on  $\partial(W^2)/\partial\rho$ . Its change didn't exceed 3,5%. At the same time average value  $\partial(W^2)/\partial\rho$  for BTNENA 1,6 times less, than for Okfol-3,5. As regards the aluminized mixtures,  $\partial(W^2)/\partial\rho$  value increases by 23 and 38% for mixture with Okfol-3,5 and by 25 and 55% for mixture with BTNENA when plate acceleration distance  $x$  rises from 20 mm to 30 and 40 mm accordingly.

Thus, analyzing  $W^2(\rho)$  dependencies we found confirmation of DP reaction with ambient air as for explosive without Al, having negative oxygen balance, so for Al-containing explosives, were effect becomes apparent stronger.

### References

1. Davydov V. Y., Goubin A. S., Zagryadtskiy F. S., Potapov I. V. // Proceedings of Int. Conf. SWCM, Kiev, Ukraine, 16–21 Sept. 2012, pp. 334–338.

2-21

### ДЕТОНАЦИЯ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ АЛЮМИНИЯ С ПЕРХЛОРАТОМ АММОНИЯ

А. Ю. Долгобородов, В. Г. Кириленко,  
М. А. Бражников, А. А. Шевченко, В. А. Теселкин

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

E-mail: aldol@ihed.ras.ru

В работе определены оптимальные условия механоактивации смесей перхлората аммония (ПХА) и Al, получены данные по параметрам детонации и механической чувствительности. Для приготовления смесей использовались штатный ПХА (20 мкм) и Al: – пудра ПП-2 и наноразмерный Al (8) ( $d \sim 280$  нм). Смешение и активация компонентов проводилась в планетарной мельнице «Активатор-2SL» со стальными шарами и барабанами при водяном охлаждении, время активации от 2 до 40 мин. Весовое соотношение Al/ПХА составляло от 10/90 до 35/65. Анализ методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии показал, что при выбранных условиях обработки происходит измельчение и перемешивание с увеличением удельной поверхности контакта без реакции компонентов. Для полученных композитов проведены исследования перехода горения в детонацию, определена зависимость скорости детонации ( $D$ ) от плотности для прессованных зарядов. Исследование перехода горения в детонацию проведено в стальных трубках диаметром 10 мм, при пористости зарядов 80%. Зажигание смеси проводилось нагревом нихромовой проволоки. Получена зависимость скорости процесса от времени активации  $t_a$ . В зависимости от  $t_a$  скорость изменялась от 120 м/с (конвективное горение,  $t_a = 2$  мин) до 2500 м/с (детонация,  $t_a = 10$  мин). С дальнейшим увеличением  $t_a$   $D$  снижалась до 2350–2400 м/с. Процесс формирования детонационного фронта исследован с помощью регистрации оптического излучения продуктов двухканальным пирометром. Результаты показали, что переход в детонацию в пористых зарядах проходит через стадию перешагнутой детонации. Результаты измерений  $D$  в зависимости от плотности показали, что по сравнению с обычными смесями Al/ПХА удается получить существенно более высокие  $D$  (более 1 км/с при относительной плотности 0,75), что связано с увеличением реакционной способности активированных смесей. По механической чувствительности активированные смеси Al/ПХА занимают промежуточное положение между таких чувствительных ВВ как бис (тринитроэтил) нитрамин и азид свинца.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-03-00651).

## DETONATION OF MECHANOACTIVATED MIXTURES OF ALUMINIUM AND AMMONIUM PERCHLORATE

A. Yu. Dolgoborodov, V. G. Kirilenko, M. A. Brazhnikov,  
A. A. Shevchenko, V. A. Teselkin

Semenov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow, Russia  
E-mail: aldol@ihed.ras.ru

The optimum conditions of mechanical activation of mixtures of ammonium perchlorate (AP) and Al were found so that the maximum homogenization of the mixture was provided in the absence of the reaction between reagents. Experimental data on the parameters of detonation and mechanical sensitivity were also obtained. For preparation of mixes regular AP (20 microns) and Al: powder PP-2 and nanoscale Al (8) ( $d \sim 280$  nm) were used. Mixing and activation of components was carried out in a planetary mill «Activator-2sl» with steel balls and drums with water cooling. The activation time ranged from 2 to 40 min. The weight ratio of Al/AP was from 10/90 to 35/65. Analysis by X-ray diffraction and electron microscopy showed that under selected processing conditions, grinding and mixing occurs without the chemical reaction. The results of research of deflagration to detonation transition in Al/AP loose-packed charges were received and also the dependence of the detonation velocity ( $D$ ) on the density of pressed charges was defined. Researches of deflagration to detonation transition were carried out in metal tubes in diameter of 10 mm at porosity of samples of 80%. Ignition of a mix was carried out by heating Ni-Cr wire. The dependence of burning rate on time of activation ( $t_a$ ) was received. Depending on  $t_a$  burning rate varied from 120 m/s (convective burning,  $t_a = 2$  min) up to 2500 m/s (detonation,  $t_a = 10$  min). With further increase of  $t_a$   $D$  decreased to 2350-2400 m/s. The process of detonation front formation was investigated by detecting the optical radiation of products by means of dual-channel pyrometer. The results showed that the transition to detonation in porous charges passes through a stage overdriven detonation. The results of  $D$  measurements depending on density have shown that in comparison with usual Al/AP mixes it is possible to receive essentially higher  $D$  (more than 1 km/s at relative density 0.75) that is connected with increase in reactionary ability of the activated mixtures. Mechanical sensitivity of activated Al/AP occupy an intermediate position between the such sensitive explosives as bis (trinitroethyl) nitramine and lead azide.

2-22

## ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ

А. П. Ершов

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

Внедрение в порошок ВВ потока горячих газов, созданного внешним источником, позволяет осуществить

весьма быстрый (за несколько мкс) переход горения в детонацию. При таком высокоэнтальпийном иницировании процесс начинается со стадии конвективного горения, причем начальная скорость волны около 1 км/с. Кинетика горения ВВ, известная из литературы, не обеспечивает наблюдаемого быстрого развития процесса. В данной работе рассмотрены различные механизмы интенсификации реакции. Результаты расчетов по двухфазной газодинамической модели сравнивались с данными синхротронной диагностики (набором распределений плотности в волне).

Оценки показывают, что имеется три возможных механизма, способных увеличить скорость брутто-реакции на порядок:

- Дробление частиц ВВ, как при компактировании порошка, так и при воздействии на зерна ВВ аэродинамической нагрузки фильтрующегося через поры потока. В отличие от последующих механизмов, эффект достигается благодаря росту поверхности контакта фаз, без ускорения реакции на поверхности.
- Форсирование горения ВВ за счет теплового потока из газовой фазы, который может заметно превышать поток при обычных условиях горения. Применительно к ракетным двигателям этот эффект называют эрозионным горением.
- Сдвиговая неустойчивость испаряющейся границы зерен ВВ, приводящая к отрыву и быстрому сгоранию микроскопических фрагментов. Этот механизм, по предложению Л. А. Лукьянчикова, будем называть абляционным.

Моделирование показало, что каждый отдельный механизм приводит к своей динамике процесса, которая отличается от экспериментальной. Учет дробления дает разумное время перехода, но плохо описывает кинематику фронта волны и данные синхротронного просвечивания. Форсированное горение позволило воспроизвести кинематику, но не профили плотности. Абляция в чистом виде не дает нужного темпа ускорения. Поэтому было рассмотрено совместное действие различных механизмов. Наилучшее совпадение с экспериментом получено при одновременном учете абляции и дробления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-03-00077).

## PHYSICAL MECHANISMS OF THE HIGH-ENTHALPY INITIATION

A. P. Ershov

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

Quite fast (several  $\mu$ s) deflagration to detonation transition may occur when the hot gas flow from the external source is injected into the powdered explosive. Such high-enthalpy initiation starts from convective combustion stage, with initial wave velocity of about 1 km/s. Explosive burning rate known from literature cannot provide such fast development. In this work several mechanisms capable to intensify the reaction are considered. Simulations results obtained with two-phase gas-dynamic model were com-



pared with the synchrotron diagnostic data, i.e. density distributions generated by the wave.

Estimates point to three plausible mechanisms which may increase the gross reaction rate for about an order of magnitude:

- Fracturing of the explosive grains, due to both direct powder compaction and dynamic head from the gas flow filtering through the pores. In contrast to the next two mechanisms, an effect is achieved because of increase of the contact surface, without the speed-up of surface burning itself.
- Explosive burning enforcing due to heat flux from the gas phase (which can noticeably exceed the flux under normal burning conditions). With reference to rocket motors this effect is called erosive burning.
- Shear instability of the evaporated layer at the grain surface, which leads to tearing and fast burn-out of microscopic portions of material. This mechanism, after L.A. Lukyanchikov, is referred to as ablation.

Simulations showed that each single mechanism produces its own dynamic of the process. The fracture alone gives the time of detonation buildup, but the wave kinematics and synchrotron radiography data are reproduced poorly. Forced burning reproduced the wave kinematics but not the density profiles. Ablation as such cannot provide the wave acceleration needed. Therefore joint action of different mechanisms was tested. The best agreement with the experiment was obtained when both ablation and fracturing were taken into account.

This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (grant 12-03-00077).

---

2-23

### МОДЕЛЬ МЕДЛЕННОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ВВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КИСЛОРОДНЫМ БАЛАНСОМ

Д. А. Варфоломеев, К. Ф. Гребенкин, А. Л. Жеребцов

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

Как известно, основной причиной неидеальности детонации высокоплотных взрывчатых составов (ВС) основе ТАТБ, тротила, октогена и гексогена в условиях далеких от критических является медленное энерговыделение, связанное с экзотермическим процессом роста ультрадисперсного алмаза (УДА) в продуктах взрыва [1, 2]. В плосковолновых опытах неидеальность проявляется как зависимость эффективного давления Жуге от пройденного детонационной волной расстояния [1, 3].

В наших предыдущих работах [4, 5] была предложена модель детонации ВС с отрицательным кислородным балансом, с использованием которой удалось удовлетворительно воспроизвести плосковолновые эксперименты [1, 3] для PBX 9404, PBX 9502, композиции В. В этой модели различные ВС отличались лишь долей теплоты детонации, выделяющейся в ПВ в медленной фазе, а характерное время процесса роста УДА было одинаковым.

Опыты по изучению динамики размеров наночастиц конденсированного углерода с помощью синхротронного излучения [6, 7] подтвердили, что рост УДА продолжается за пределами зоны химических реакций, при этом скорость роста УДА существенно различна. Так за время  $\sim 5$  мкс в ПВ ТАТБ УДА вырастают в среднем до  $\sim 4$  нм, а в ПВ БТФ – до  $\sim 60$ – $70$  нм. Наблюдается корреляция среднего размера частиц УДА от температуры синтеза [8, 9]: ПВ ТАТБ и БТФ имеют температуры 2500–3000 К и 4200–4500 К соответственно. Анализ современных фазовых диаграмм наноуглерода [10, 11] показывает, что чем выше температура ПВ, тем более крупные углеродные кластеры находятся в жидкой фазе и, соответственно, эффективно объединяются.

В настоящей работе предложена модель, в которой использовались термические уравнения состояния ПВ и эмпирическая зависимость характерного времени роста УДА от температуры ПВ. Для термодинамических свойств УДА использовались зависимости из работы [12].

Предлагаемая кинетическая модель позволяет с единых позиций рассматривать различные ВС. В рамках этой модели характерное время роста УДА при детонации конкретного ВС является функцией процесса и зависит от реализующихся режимов (нормальная либо пересжатая детонационная волна, отражение детонационной волны от преграды и т. д.).

### Литература

1. J. B. Bdzil, W. C. Davis // LASL Report LA-5926-MS, 1975.
2. J. A. Viecelli, F. H. Ree // J. Appl. Phys., vol.86, no.1, 1999, pp. 237–248.
3. W. C. Davis, J. B. Ramsay // Proc. of 7th Int. Det. Symp., Annapolis, Maryland, 1981, pp. 517–522.
4. K. F. Grebenkin, A. L. Zherebtsov, M. V. Taranik // Proc. Of 13th Int. Det., Norfolk, USA, 2006, pp. 496–505.
5. К. Ф. Гребенкин, А. Л. Жеребцов, М. В. Тараник // Сборник тезисов IX Харитоновских Тематических Научных Чтений, г. Саров, Россия, 2007, стр. 70–72.
6. А. Н. Алешаев, П. И. Зубков, Г. Н. Кулипанов, Л. А. Лукьянчиков, Н. З. Ляхов, С. И. Мишнев, К. А. Тен, В. М. Титов, Б. П. Толочко, М. Г. Федотов, М. А. Шеромов // Физика горения и взрыва, 2001, т. 37, № 5, стр. 104–113.
7. Тен К. А., Титов В. М., Толочко Б. П., Жогин И. Л., Лукьянчиков Л. А. // Труды коференции «Физика экстремальных состояний вещества», Черногловка, 2007, стр. 146–148.
8. И. Ю. Мальков, Л. И. Филатов, В. М. Титов, Б. В. Литвинов, А. Л. Чувилин, Т. С. Тесленко // Физика горения и взрыва, т. 29, № 4, 1993, стр. 131–134.
9. В. В. Даниленко. Синтез и спекание алмаза взрывом. Москва, Энергоатомиздат, 2003.
10. В. В. Даниленко // Физика горения и взрыва, т. 41, № 4, 2005, стр. 110–116.
11. J. A. Viecelli, S. Bastea, J. N. Glosli, F. H. Ree // J. Chem. Phys., vol. 115, 2002, pp. 2730–2736.
12. В. В. Даниленко. Взрыв: физика, техника, технология. Москва, Энергоатомиздат, 2010.

## SLOW ENERGY RELEASE MODEL FOR HE WITH NEGATIVE OXYGEN BALANCE

D. A. Varfolomeev, K. F. Grebyonkin, A. L. Zherebtsov

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

The main reason for non-ideal HE detonation (TNT, TATB, TNT/RDX, TATB/HMX) for far from critical conditions is the slow energy release, due to exothermal growth of ultra disperse diamonds (UDD) in DP [1, 2]. In the plane-wave experiments nonideality appeared through the dependence of effective Jouget pressure on detonation wave distance [1, 3].

Recently we presented the detonation model for HE with negative oxygen balance [4, 5]. Here the various HE differed only with the part of detonation heat, released in DP at slow phase, while the typical time of UDD growth was the same.

The experiments to study dynamics of carbon nanoparticles sizes with synchrotron radiation [6, 7] confirmed, that UDD growth goes on beyond chemical reacting zone, and UDD growth rate varies considerably for different HE. Thus, for ~5 mks UDD for TATB grow up to ~4 nm, and for BTF – up to ~60–70 nm. So, the correlation is observed between average size of UDD particles and temperature of synthesis [8, 9]: TATB and BTF have the DP temperatures 2500–3000 K and 4200–4500 K respectively. Analysis of recent phase diagrams for carbon nanoparticles [10, 11] show, that as DP temperature grows higher, so the larger carbon clusters are appeared in liquid phase, and effectively united.

The proposed model accounts DP thermal EOS and empirical dependence of clusters growth characteristic time on DP temperature. The dependencies from [12] were used for thermodynamic properties of UDD.

Proposed kinetic model enables to examine the different HE with unified approach. Within this model clusters growth characteristic time for the specified HE is a function of the process and depending on achieved detonation regimes (normal or overdriven detonation wave, reflection of detonation wave from barrier, etc.)

### References

1. J. B. Bdzil, W. C. Davis // LASL Report LA-5926-MS, 1975.
2. J. A. Viecelli, F. H. Ree // J. Appl. Phys., vol. 86, no. 1, 1999, pp. 237–248.
3. W. C. Davis, J. B. Ramsay // Proc. of 7th Int. Det. Symp., Annapolis, Maryland, 1981, pp. 517–522.
4. K. F. Grebenkin, A. L. Zherebtsov, M. V. Taranik // Proc. of 13th Int. Det. Symp., Norfolk, USA, 2006, pp. 496–505.
5. K. F. Grebenkin, A. L. Zherebtsov, M. V. Taranik // Abstracts of IX Khariton's Topical Scientific Readings, Sarov, Russia, 2007, pp. 70–72.
6. K. A. Ten, B. M. Titov et al. // Fizika gorenya i vzryva, 2001, vol. 37, no. 5, pp. 104–113.
7. K. A. Ten, B. M. Titov et al. // Proc. of Conf. "Physics of extreme states of substance", Chernogolovka, Russia, 2007, pp. 146–148.
8. I. Yu. Mal'kov, L. I. Filatov et al. // Fizika gorenya i vzryva, 1993, vol. 29, no. 4, pp. 131–134.
9. V. V. Danilenko // Synthesizing and sintering of diamond by explosion. Moscow, Energoatomizdat, 2003.
10. V. V. Danilenko // Fizika gorenya i vzryva, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 110–116.

11. J. A. Viecelli, S. Bastea, J. N. Glosli, F. H. Ree // J. Chem. Phys., 2002, vol. 115, pp. 2730–2736.

12. V. V. Danilenko // Explosion: physics, engineering, technology. Moscow, Energoatomizdat, 2010.

2-24

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛЕТА ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ И МЕТАНИЯ ПЛАСТИН ДЛЯ ФЛЕГМАТИЗИРОВАННЫХ ГЕКСОГЕНА И ОКТОГЕНА

В. Ю. Давыдов, Ф. С. Загрядцкий, А. Д. Никитин,  
И. В. Потапов, А. С. Губин

Научно-исследовательский машиностроительный институт,  
Москва, Россия

E-mail: vitadavidov@yandex.ru

Моделирование процессов радиального расширения продуктов детонации ПД и динамики набора скорости метаемой пластины для высокоплотных зарядов из флегматизированного гексогена и флегматизированного октогена, проводили с помощью программного комплекса ANSYS AUTODYN. Для расчетов использовали два набора параметров уравнения состояния в форме JWL, предоставленные В. И. Колпаковым (JWL1) и Е. И. Ермоловичем (JWL2). Результаты моделирования сопоставили с экспериментальными данными по скоростям расширения ПД, полученными методом оптической съемки [1] и данными по ускорению пластин, полученными по методике М-40.

Было показано, что расчетные данные по скорости расширения ПД как для JWL1, так и для JWL2 существенно (до 3,3 раз) занижены по сравнению с экспериментальными результатами. В то же время расчетные и экспериментальные данные по динамике набора скорости метаемой пластиной различаются существенно меньше (до 5% для JWL2), а для JWL1 практически совпали.

Предложена трактовка различия в соответствии полученных расчетных результатов данным экспериментов. При разлете ПД прессованных зарядов без оболочек образуются множественные кумулятивные струи [1], которые обеспечивают догорание ПД в воздухе. Выделяющаяся дополнительная энергия приводит к возрастанию скорости расширения ПД в экспериментах. В расчете эти процессы не учитываются, поэтому результаты по скорости расширения ПД занижены.

В то же время, образующиеся кумулятивные струи «гасятся» метаемой пластиной, вклад эффекта догорания снижается, поэтому сходимость расчетных данных с результатами методики М-40 существенно выше, чем для расширения ПД. Таким образом, для адекватного описания экспериментальных результатов требуется учет процессов, происходящих на контактной границе ПД-воздух.

### Литература

1. Давыдов. В. Ю. // Химическая физика. 2008. Т. 27, № 8. С. 57–60.

**NUMERICAL MODELING  
OF DETONATION PRODUCT'S EXPANSION  
AND PLATE'S ACCELERATION  
BY PHLEGMATIZED HMX AND RDX**

V. Yu. Davidov, F. S. Zagryadtskiy, A. D. Nikitin,  
I. V. Potapov, A. S. Goubin

Research Institute of Mechanical Engineering, Moscow, Russia  
E-mail: vitadavidov@yandex.ru

Modelling radial expansion of detonation products and throwing plate acceleration dynamics for charges of phlegmatized HMX and RDX was realized by ANSYS AUTODYN. In calculation were used 2 variants of JWL EOS coefficients presented by Kolpakov (JWL1) and Ermolovich (JWL2). Results of modelling were compared to experimental data for detonation products expansion velocities, received for charge without casing [1], obtained by optical method, and plate acceleration data, obtained using M-40 method.

It was shown that computation data for detonation products expansion, calculated with using JWL1 and JWL2, are lower than experimental results up to 3.3 times. Also computation and experimental data for throwing plate acceleration dynamics have grater less difference, and for JWL1 are same.

It was offered the explanation for these differences in results. The detonation products of pressed charges expansion is accompanied by appearance of cumulative jets on the surface of charges. This phenomenon gives detonation products possibility to be fully burned in the air. The release of additional energy results in growth of detonation products expansion speed registered in experiments. In calculation these processes didn't take into account and that's why detonation products expansion speed calculation data shown less value.

But cumulative jets can be extinguished by accelerated plate and addition by firing detonation products in the air go down that's why difference between experimental and calculation data for M-40 methodic is greater less than it for detonation products expansion. Thus for adequate description of experimental results one needs to take into account the processes taking place on DP-air boundary.

#### References

1. Davidov. V. Yu. // Chemical physics. 2008. В. 27, № 8. P. 57–60.

2-25

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООВОГО  
ФОТОИНИЦИИРОВАНИЯ ТЭНА  
ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ  
МИЛЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

А. С. Зверев, А. Г. Кречетов, А. Ю. Митрофанов,  
А. О. Терентьева, А. В. Тупицын, Ю. П. Сахарчук  
Кемеровский государственный университет, Кемерово,  
Россия

E-mail: lira@kemsu.ru

Предложен метод, позволяющий выделить термический механизм лазерного инициирования на фоне более эффективного фотохимического механизма инициирования. В основе предлагаемого подхода лежат следующие достаточно простые соображения. Для инициирования взрыва по фотохимическому механизму необходимо фотосоздание пороговой (минимальной) концентрации возбужденных состояний, обеспечивающих дальнейшее развитие цепной реакции. Если эти возбужденные состояние являются короткоживущими, то пороговая концентрация создается только в течение времени жизни этого состояния, и дальнейшее увеличение длительности инициирующего импульса оказывается «бесполезным».

Для случая ТЭНа и  $\lambda = 1060$  нм, судя по длительности предвзрывных процессов, время жизни, во всяком случае, не превышает нескольких микросекунд, т. е. увеличение длительности инициирующего импульса свыше 10 мкс не будет приводить к росту концентрации возбуждений, а, следовательно, и эффективности фотохимического инициирования.

Если характерная длительность актуальных тепловых процессов, определяющих эффективность термического инициирования, превышает время жизни возбуждений, то для этого механизма инициирования ситуация может оказаться обратной: увеличение длительности импульса будет увеличивать нагрев, а, следовательно, и эффективность термического механизма инициирования.

Указанное различие открывает принципиальную возможность управления вкладами фотохимического и термического механизмов в процесс инициирования путем изменения длительности и мощности инициирующего импульса.

Показано, что порог термохимического инициирования чистого тетранитропентаэритрита при освещенностях порядка  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> превышает 75 Дж/см<sup>2</sup>, порог же термохимического инициирования тетранитропентаэритрита со светопоглощающими включениями (0,1% вес. газовой сажи) падает до 14 Дж/см<sup>2</sup>.

## EFFICIENCY OF THERMAL PHOTOINITIATION OF PETN WITH MILLISECOND LASER PULSE

A. S. Zverev, A. G. Krechetov, A. Yu. Mitrofanov,  
A. O. Terentyeva, A. V. Tupitsyn, Yu. P. Sakharchuk

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: lira@kemsu.ru

We propose a method to identify the mechanism of thermal laser initiation, while the more efficient photochemical initiation mechanism. The basis of being offered the first approach is based on the following considerations are quite simple. To initiate the explosion photochemical mechanism must photoreaction threshold (minimum) concentration of excited states, providing further development chain reaction. If these are short-lived excited state, the threshold concentration is only created during the lifetime of this state, and a further increase in the duration of the pulse initiates is «useless».

For the case of PETN and  $\lambda = 1060$  nm, according to the duration of the pre processes, in any case, not more than a few microseconds, i.e. increasing the duration of the initiating pulse over 10  $\mu$ s will not lead to an increase in excitations concentration, and hence the efficiency of the photochemical initiation.

If the characteristic length of the actual thermal processes that determine the efficiency of thermal initiation exceeds excitation life-time, then this mechanism of initiation situation is may be the reverse: an increase in the pulse duration will increase by heating of, and hence the effectiveness of the thermal initiation mechanism.

This difference opens the possibility in principle of management contributions photochemical and thermal mechanisms in the initiation process by changing the duration and power of the initiating pulse.

It is shown that the threshold for thermochemical initiation of pure PETN with illumination of about  $10^4$  W/cm<sup>2</sup> than 75 J/cm<sup>2</sup> threshold same thermochemical initiation PETN with light-absorbing inclusions (0.1 wt% carbon black) drops to 14 J/cm<sup>2</sup>.

сов, так и низкую эффективность используемых методик локализации и тушения природных пожаров.

В настоящей статье представлены некоторые разработки по способам и устройствам локализации и тушения лесных, степных и торфяных пожаров в рамках новой концепции борьбы с лесными пожарами [1].

Рассматриваются следующие технические предложения:

- способ локализации низового лесного пожара [2];
- устройство для локализации и тушения низового лесного пожара [3];
- дезинтегратор фронта низового лесного пожара с огнегасящим патроном [4];
- устройство для тушения пожара, сбрасываемое с летательного аппарата [5];
- комбинированный способ локализации и тушения низовых лесных и степных пожаров [6];
- накладной шнуровой заряд для локализации и тушения [7].

### Заключение

В соответствии с новой концепцией борьбы с лесными пожарами и знании структуры факела пламени в данной работе рассмотрены разработки по локализации и тушению верховых, низовых лесных и степных пожаров. Применение и учет представленных способов и методик позволит повысить оперативность и эффективность мероприятий по борьбе с природными и техногенными катастрофами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-01-00142\_А, № 14-01-00211\_А.

### Литература

1. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992 г.
2. Гришин А. М., Зима В. П. Патент на изобретение № 2345806 Способ локализации низового лесного пожара. Заявка № 2007106509. Приоритет от 20.02.2007. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 10.02.2009.
3. Гришин А. М., Зима В. П., Медведев А. В. Свидетельство № 12975 на полезную модель «Устройство для локализации низового лесного пожара и быстрого отжига лесных горючих материалов». Заявка № 98120290 от 02.11.1998 А62с3/02. Зарегистрировано в реестре полезных моделей 20.03.2000 г. Бюллетень № 8 от 20.03.2000.
4. Гришин А. М., Зима В. П. Свидетельство № 10582 на полезную модель «Дезинтегратор фронта низового лесного пожара с огнегасящим патроном». Заявка № 98120291. Приоритет полезной модели от 02.11.1998. Зарегистрировано в реестре полезных моделей 16.08.1998 г. Бюллетень № 8 от 16.08.1998.
5. Гришин А. М., Зима В. П. Патент на полезную модель № 2452669 Устройство для тушения пожара, сбрасываемое с летательного аппарата. Заявка № 2010116183. Приоритет полезной модели от 23.04.2010. Зарегистрировано в реестре полезных моделей 23.04.2010.
6. Гришин А. М., Зима В. П. Патент на изобретение № 2458716 Комбинированный способ локализации и тушения низовых лесных и степных пожаров. Заявка № 2011110659. Приоритет от 21.03.2011. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 20.08.2012.
7. Гришин А. М., Зима В. П. Патент на изобретение № 2496539 Накладной шнуровой заряд для локализации низовых лесных и степных пожаров. Заявка № 2012118846. Приоритет от 05.05.2012. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 27.10.2013.

2-26

## ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ И ТУШЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

А. М. Гришин, В. П. Зима, Д. П. Касымов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Актуальность изучения природных пожаров и способов борьбы с ними несомненна. В Российской Федерации в результате лесных пожаров ежегодно погибают от 15 000 до 18 000 человек, а экономический ущерб составляет 13 000 000 000 рублей. Как показывает анализ, в России особенно часто лесные пожары возникают в Сибири и на Дальнем Востоке, где число погибших от лесных пожаров на 10 000 человек в 4–5 раз превышает этот же показатель в Европейской части России.

Сложившаяся ситуация в мире году показала как недостатки существующей системы мониторинга ле-

## EXPLOSIVE AND DETONATION REGIMES AND EXTINGUISHING OF WILDLAND FIRES

A. M. Grishin, V. P. Zima, D. P. Kasymov

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

The urgency of studying wildfires and ways to combat them is undeniable. In the Russian Federation as a result of forest fires each year from 15 000 to 18 000 people die, and the economic damage equal to 13 billion rubles. The analysis shows that in Russia, especially often forest fires occur in Siberia and the Far East, where number of deaths from forest fires per 4–5 times higher than the same in the European part of Russia.

This article presents some of the development on methods and devices to combat forest, steppe and peat fires in the new concept of fighting forest fires [1].

- The method of localization ground fires [2];
- Device for localization and extinguishing ground fire [3].
- Disintegrator front of ground forest fire with extinguishing patron [4].
- The device for fire extinguishing dropped from an aircraft [5].
- The combined method of localization and extinguishing ground forest and grassland fires [6].
- Surface charge cord to contain and extinguish ground forest fire [7].

The current situation in Russia in 2010 and internationally in 2012 showed how the shortcomings of existing forest monitoring system and the low efficiency of the methods used contain and extinguish wildfires.

This paper represents the development of localization and extinguishing of forest, steppe and peat fires in accordance with the new concept of wildland fire management and knowledge of the structure of the flame.

Application and registration of proposed methods and techniques will improve the efficiency and effectiveness of measures to combat natural and man-made disasters

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project number 12-01-00142\_a, № 14-01-00211\_a); Program to improve the competitiveness of TSU (Tomsk State University Competitiveness Improvement Program).

### References

1. Grishin A. M. Mathematical modeling of forest fires and new ways to combat with them. Novosibirsk: Nauka, 1992.
2. Grishin A. M., Zima V. P. Patent of Russia Federation for an invention № 2345806. “The method of localization ground fires”. Proposal № 2007106509 from 02.20.2007. Registered in 02.10.2009.
3. Grishin A. M., Zima V. P., Samoilov V. I., Tsimbaljuk A. F. Certificate № 19472 of utility model “Device for localization and extinguishing ground fire” Proposal № 2000123272/20 from 09.11.2000. Registered in 01.10.2001.
4. Grishin A. M., Zima V. P. Certificate № 10582 of utility model “Disintegrator front of ground forest fire with extinguishing patron” Proposal № 9812029/20 from 11.02.1998. Registered in 11.02.1998.
5. Grishin A. M., Zima V. P. Certificate № 2452669 “The device for fire extinguishing dropped from an aircraft” Proposal № 2010116183 from 07.23.04.2010. Registered in 23.04.2010.
6. Grishin A. M., Zima V. P. Patent of Russia Federation for an

invention № 2458716. “The combined method of localization and extinguishing ground forest and grassland fires”. Proposal № 2011110659 from 03.21.2011. Registered in 08.20.2012.

7. Grishin A. M., Zima V. P. Patent of Russia Federation for an invention № 2496539. “Surface charge cord to contain and extinguish ground forest fire”. Proposal № 2012118846 from 05.05.2012. Registered in 27.10.13.

2-27

## УДАРНАЯ АДИАБАТА ОДНО- И ДВУКРАТНОГО СЖАТИЯ ВВ НА ОСНОВЕ ТАТЬ ПО ДАННЫМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ

А. О. Кашкаров<sup>1,3</sup>, Л. А. Мержиевский<sup>1,3</sup>,  
Э. Р. Прууэл<sup>1,3</sup>, К. А. Тен<sup>1</sup>, Ю. А. Аминов<sup>2</sup>,  
О. В. Костицын<sup>2</sup>, А. К. Музыря<sup>2</sup>, Е. Б. Смирнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им М. А. Лаврентьева СО РАН,  
Новосибирск, Россия

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

<sup>3</sup>Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

В работе приводятся результаты исследования воздействия плоской ударной волны на заряды ВВ на основе ТАТЬ различной пористости с помощью синхротронной диагностики взрывных процессов. Метод позволяет регистрировать распределение массы на луче, проходящем сквозь экспериментальную сборку, вдоль оси координат с пространственным разрешением 0,1 мм и временным 0,496 мкс.

Исследуемый цилиндрический заряд устанавливался на массивном стальном основании, на противоположный торец металась металлическая пластина-ударник. Ось заряда располагалась в плоскости луча синхротронного излучения перпендикулярно его направлению. Таким образом, полет ударника и распространение ударной волны в образце регистрируется в форме одномерного рентгеновского фильма.

Эксперимент далее представляется в виде  $x-t$  диаграммы распространения ударного фронта и движения ударника как до столкновения с образцом, так и после. В ряде экспериментов удается так же зарегистрировать распространение отраженной от основания волны в образце.

При распаде разрыва на границе ударник-образец скорость движения ударника после столкновения будет соответствовать массовой скорости за фронтом ударной волны, которая так же определяется по экспериментальной  $x-t$  диаграмме. Однако такое определение массовой скорости на ударной адиабате сопряжено с внесением существенной систематической ошибки вследствие влияния отраженной волны разгрузки от противоположного торца ударника.

Корректное восстановление параметров ударного сжатия исследуемых образцов было проведено путем построения параметрического уравнения состояния ВВ

на основе ТАТБ в форме Ми-Грюнайзена и одномерным решением задачи о распаде разрыва. Минимизация отклонения расчетных и экспериментальных  $x-t$  диаграмм дает значения параметров уравнения состояния.

Таким образом, получены данные на ударных адиабатах одно- и двукратного сжатия. Исследования проводились для образцов различной начальной пористости.

### HUGONIOT ADIABAT FOR ONE-, AND TWO-FOLD COMPRESSION OF TATB-BASED EXPLOSIVES PLOTTED BY THE DATA OF SYNCHROTRON DIAGNOSTICS OF EXPLOSIVE PROCESSES

A. O. Kashkarov<sup>1,3</sup>, L. A. Merzhievsky<sup>1,3</sup>, E. R. Prueel<sup>1,3</sup>,  
K. A. Ten<sup>1</sup>, Yu. A. Aminov<sup>2</sup>, O. V. Kostistyn<sup>2</sup>,  
A. K. Muzyrta<sup>2</sup>, E. B. Smirnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

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

<sup>3</sup>National Research Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

Synchrotron diagnostics of explosive processes was used to study impact of the plane shock-wave on the TATB-based explosive charges having different porosity and results of this investigation are presented. Synchrotron diagnostics makes it possible to register mass distribution on a beam going through the experimental assembly along the coordinate axis with the 0.1-mm spatial resolution and the 0.496- $\mu$ s time resolution.

The test cylindrical charge was placed on a solid steel support and a metal plate-impactor was thrown against the opposite end face. The charge axis was in the plane of the synchrotron radiation normally to its direction. Therefore, the impactor flight and shock-wave propagation in the sample is registered as a one-dimensional X-ray film.

Then, the experiment was presented as the  $x-t$  diagram of the shock front propagation and the impactor motion both prior to its impact on the sample, and also thereafter. Certain experiments managed to register propagation in the sample of the wave reflected from the support.

In the case of disintegration of discontinuities at the impactor-sample boundary, the impactor velocity after the impact will correspond to the mass velocity behind the front of the shock wave that is also determined from the experimental  $x-t$  diagram. However, this determination of mass velocity on the Hugoniot is associated with the possibility of a serious systematic error due to the influencing unloading wave reflected from the opposite end-face of the impactor.

The derived parametric Mie-Grüneisen equation of state for the TATB-based explosive and 1D solution of the disintegration of discontinuities problem ensured correct recovery of shock-compression parameters of samples. Minimization of deviation in the calculated and experimental  $x-t$  diagrams gives values of EOS parameters.

So, the data on Hugoniots for one-, and two-fold compression are obtained. Investigations were performed for samples having different initial porosity.

2-28

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ БВВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ С ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОМ

Н. А. Кирющенко, Т. Н. Исхаков, В. Я. Базотов

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

E-mail: NA-Makarova89@mail.ru

В данной работе исследовано явление сенсбилизации бризантных взрывчатых веществ (БВВ) в электрическом поле пьезоэлемента (ПЭ). Особенностью является то, что источником электрического поля высокой напряженности служит пьезоэлектрический элемент, находящийся в контакте с ВВ и электрически поляризующийся в момент удара и под действием удара. Установлено, что в зависимости от схемы приложения электрического поля, создаваемого ПЭ, чувствительность БВВ к электромеханическому импульсу различна. Эффект сенсбилизации наблюдается только при определенной схеме приложения электрического поля ПЭ – схема слабозакороченного макродиполя. Результаты исследований свидетельствуют о возможности создания средств взрывания не содержащих ИВВ, обладающих высокой надежностью и безопасностью, действие которых основано на явлении сенсбилизации БВВ в электрическом поле ПЭ.

### RESEARCH OF FEATURES OF INITIATION OF BVV AT DYNAMIC TESTS WITH PIEZOELEMENT

N. A. Kiryushchenkova, T. N. Iskhakov, V. Ya. Bazotov

Kazan national research technological university, Kazan, Russia

E-mail: NA-Makarova89@mail.ru

In this work the phenomenon of a sensitization of the brisant explosives (BE) in electric field of a piezoelement (PE) is investigated. Feature is that the piezoelectric element which is in contact with VV and electrically being polarized at the time of blow and under the influence of blow is a source of electric field of a high tension. It is established that depending on the scheme of the application of the electric field created by PE, sensitivity of BVV to an electromechanical impulse is various. The effect of a sensitization is observed only at a certain scheme of the appendix of electric field of PE – the scheme of a slabozakorochenny macrodipole. Results of researches testify to possibility of creation of blasting agents of not containing IVV possessing high reliability and safety which action is based on the phenomenon of a sensitization of BVV in electric field of PE.

2-29

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЫ, МЕТАЕМОЙ ВЗРЫВОМ

С. А. Душенок<sup>1</sup>, Г. В. Семашкин<sup>1</sup>,  
В. В. Харченко<sup>1</sup>, П. Е. Кискин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальное конструкторско-технологическое бюро  
«Технолог», Санкт-Петербург, Россия

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

Целью работы являлось определение энергетических параметров профилированной пластины при взрывном метании и исследование формирования «ударного ядра» [1]. Были подготовлены и проведены эксперименты с использованием электроконтактной методики (ЭКМ), а также оптической методики регистрации при помощи скоростного фоторегистратора (СФР).

В опытах зарегистрирован эффект обратной кумуляции, определена скорость и форма «ударного ядра» на дистанции до 0,5 м с шагом 5 см. Получена повторяемость результатов.

Экспериментально определенная скорость метаемой пластины согласуется с оценками по методике Е. И. Забабахина [2], а также с двумерными конечно-разностными расчетами.

#### Литература

1. Мазур А. С., Душенок С. А., Григорьев А. Ю., Семашкин Г. В., Васильев В. Д., Дунилов К. К., Фроленков Ю. А. Способ приведения в безопасное состояние ручных гранат и артиллерийских боеприпасов малого калибра. Сборник трудов Седьмой Международной научно-практической конференции «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам» (г. Санкт-Петербург, 18–20 октября 2011 г.), с. 118–120.
2. Е. И. Забабахин, И. Е. Забабахин. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988.

### RESEARCH INTO FLIGHT DYNAMICS OF AN EXPLOSION-ACCELERATED SHAPED PLATE

S. A. Dushenok<sup>1</sup>, G. V. Semashkin<sup>1</sup>,  
V. V. Kharchenko<sup>1</sup>, P. E. Kiskin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSUE SCTB «Technolog», St. Petersburg, Russia

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

The purpose of the work is to determine the energy parameters of the explosion-accelerated shaped plate and to study “shock nucleus” formation [1]. Experiments were prepared and conducted using the electrocontact method and the method of optical registration with the help of a high-speed streak-camera.

In experiments, we registered the reverse cumulation effect, determined the “shock nucleus” speed and shape at the distance of up to 0.5 m with the step of 5 cm. Results reproducibility was obtained.

The experimentally determined speed of the thrown plate agrees well with the estimates given by the E. I. Zababakhin method [2], as well as with 2-D finite-difference calculations.

#### References

1. A. S. Mazur, S. A. Dushenok, A. Y. Grigoriev, G. V. Semashkin, V. D. Vasiliev, K. K. Dunilov, I. A. Frolenkov. Method to bring hand grenades and small-caliber gun ammunition to safe condition. Proceedings of the Seventh International Conference «Anticriminal and anti-terrorist explosions equipment (Saint Petersburg, October 18–20, 2011)», pp. 118–120
2. E. I. Zababakhin, I. E. Zababakhin. Unbounded cumulation phenomena. Moscow; “Nauka” Publisher; 1988.

2-30

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВА ПРОВОЛОЧКИ В ХИМИЧЕСКИ ИНЕРТНЫХ И АКТИВНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ

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

Исследовано формирование ударных волн (УВ) и волн пузырьковой детонации (ПД) при электрическом взрыве проволоочки в химически инертных и реагирующих пузырьковых средах. Использовали воду, либо смесь 0,75 H<sub>2</sub>O + 0,25 глицерина, в качестве газов в пузырьках – воздух, либо взрывчатую смесь C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + 2,5O<sub>2</sub>. Энергия, запасенная в конденсаторе, превышала критическую энергию инициирования ПД и составляла 16–625 Дж. С помощью цифровой скоростной оптической камеры изучены стадии взрыва проволоочки и расширения плазменного пузыря, образующегося после взрыва проволоочки при разряде конденсатора, и процессы сжатия, расширения и разрушения пузырьков в коротких сильных УВ.

Установлен характер разрушения жидкости и пузырьков газа на стадии взрыва проволоочки (~3 мкс) и на последующей более длительной (~1 мс) стадии расширения плазменного пузыря, образующегося при последующем разряде. В жидкости и пузырьковой среде, начиная с момента взрыва проволоочки, на цилиндрической границе плазменного пузыря регистрируется поперечная волновая структура, вызванная токовой магнитогиродинамической неустойчивостью разряда. Обнаружены отличия в скорости расширения и размерах плазменного пузыря при взрыве проволоочки в воде и пузырьковой среде благодаря их различной сжимаемости: плазменный пузырь в пузырьковой среде расширяется быстрее, чем в воде, и до больших размеров. Получены данные о распространении УВ при взрыве проволоочки и расширении плазменного пузыря в инертных и реагирующих пузырьковых средах.

Кавитация в жидкости возникает в области разрежения за фронтом коротких УВ, образующихся при взрыве проволоочки и расширении плазменного разрядного пузыря, взрыве химически активных пузырьков и при

сжатии плазменного пузыря. Время, в течение которого в жидкости наблюдается кавитация, превышает длительность фазы разрежения в УВ. Скоростная оптическая съемка подтвердила сделанный нами ранее вывод о резонансном ударно-волновом механизме инициирования пузырьковой детонации при взрыве проволоки. Установлено, что причина затухания с расстоянием амплитуды сильной УВ и ее спектральной амплитуды связана с дисперсией и различными потерями в пузырьковой среде. Наибольшее затухание с расстоянием сигнала наблюдается в области низких частот. Появление в спектре полученных сигналов других частот связано с разрушением пузырьков и взаимодействием волн давления в пузырьковой среде между собой. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-01-00222а).

### THE RESULTS OF INVESTIGATION OF THE WIRE'S EXPLOSION IN CHEMICALLY INERT AND ACTIVE BUBBLE MEDIA

I. I. Kochetkov, A. V. Pinaev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk,  
Russia

E-mail: kii@hydro.nsc.ru, avpin@ngs.ru

The formation of shock waves (SW) and waves of bubble detonation (BD) at the electrical wire explosion in a chemically inert and active bubble media are investigated. Water or a mixture of 0.75 water + 0.25 glycerin as a liquid and air or explosive mixture  $C_2H_2 + 2.5O_2$  as a gas in bubbles were used. The energy stored in the capacitor exceeded critical energy for initiation of BD and was 15–625 J. Using digital high-speed optical camera the stage of wire's explosion and expanding plasma bubble, which formed after wire explosion at the discharge of the capacitor, expansion and destruction of bubbles in short strong shock waves were studied.

The character of the destruction of the liquid and gas bubbles at the stage of wire explosion ( $\sim 3 \mu s$ ) and a subsequent longer ( $\sim 1 ms$ ) stage of the plasma bubble expansion were determined. In the liquid and bubble media on a cylindrical boundary of the plasma bubble, starting from the explosion of the wire, the structure of transverse wave caused by the discharge current magnetohydrodynamic instability was recorded. Differences in the rate of expansion and sizes of the plasma bubble at the explosion of wires in water and bubble media due to their different compressibility are found: plasma bubble in a bubble media expands faster than in water, and to a large size. The data on the distribution of SW at the explosion of wires and expanding plasma bubble in inert and reacting bubble media were obtained.

Cavitation occurs in the liquid in the vacuum behind the front of short SW produced by the explosion and expansion of the wire discharge plasma bubble, and by the explosion of the chemically active bubbles and at the compression of plasma bubble. The time, within which a fluid cavitation is observed, exceeds the duration of the expansion phase of the SW. High speed optical photography confirmed our previous conclusion about the shock-wave resonant mechanism of initiation of the bubble detonation at the wire explosion. It is found that the cause of the strong wave's amplitude attenuation and of its spectral amplitude with distance

related to the dispersion and different losses in bubble medium. The greatest attenuation of a signal with a distance is observed at low frequencies. The appearance of the other frequencies in the spectrum of the received signals associated with the destruction of the bubbles and the interaction of pressure waves in bubble medium between themselves. This work was supported by RFBR (grant №12-01-00222a).

2-31

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ТЭНА

Д. А. Варфоломеев, К. Ф. Гребенкин,  
А. Л. Жеребцов, О. В. Костицын, Д. В. Кочутин,  
М. А. Машенко, Е. Б. Смирнов, В. Н. Щербаков

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

Характерной особенностью детонации взрывчатых составов (ВС) на основе тэна, содержащих низкоплотный флегматизатор (парафин) является повышенная на 200–400 м/с скорость детонации по сравнению со скоростью детонации чистого тэна той же плотности. Кроме того, экспериментально обнаружено [1–3], 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 режимам детонации.

Ранее была предложена модель детонации таких составов [4], верифицированная по экспериментам [1, 2] (массовое содержание флегматизатора 5 и 10%), и позволившая адекватно воспроизводить структуру детонационных волн, включая химпик.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование детонационных характеристик флегматизированного тэна с содержанием инерта  $\sim 15\%$ . В плосковолновых опытах с помощью пьезорезистивных датчиков давления, расположенных на различных расстояниях от торца детонирующего заряда, были измерены профили давления  $P(t)$ . Было обнаружено плато давления на уровне 15–17 ГПа. Модель [4] с хорошей точностью воспроизвела экспериментальные профили давления.

В работе также проведено расчетное моделирование некоторых предполагаемых опытов с образцами флегматизированного тэна в двумерной постановке.

#### 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, Г. С. Доронин и др. // 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. Варфоломеев Д. А., Гребенкин К. Ф., Жеребцов А. Л., Кочутин Д. В. // Сборник тезисов докладов XI Забабахинских Научных Чтений, Снежинск, 2012, стр. 67–68.



## DETONATION WAVE PROFILES OF PHLEGMATIZED PETN EXAMINATION

D. A. Varfolomeev, K. F. Grebyonkin, A. L. Zherebtsov,  
O. V. Kostitsyn, D. V. Kochutin, M. A. Mashchenko,  
E. B. Smirnov, V. N. Shcherbakov

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

The typical feature of PETN-based HE with 5–20% mass-fraction of low-density phlegmatizer (paraffin) is that their detonation velocity is 200–400 m/s more, then the detonation velocity of pure PETN with the same density. Besides, the experiments [1–3] showed, that detonation profiles for these HE have the typical pressure plateau, which broadens with charge length increasing in plane-wave experiments.

The presented detonation model of such compositions [4] was verified with the experimental data [1, 2] (5 and 10% mass-fraction of paraffin), and this model enabled adequate reconstruction of detonation wave structure, including von Neuman peak.

The experimental study of detonation characteristics of phlegmatized PETN with inert mass fraction ~15% was performed. The pressure profiles  $P(t)$  were measured in plane-wave experiments by piezo-resistive pressure sensors, placed on the different distanced from detonating charge end. The pressure plateau at 15–17 GPa was revealed. The experimental pressure profiles were reconstructed appropriately with the model [4].

The numerical 2D-modeling of several presumed experiments with phlegmatized PETN was performed.

### References

1. L. V. Altshuler, V. V. Balalaev, G. S. Doronin et al. // PMTF, 1982, vol. 131, no. 1, pp. 128–131.
2. L. V. Altshuler, V. K. Ashaev, G. S. Doronin et al. // Fizika gorenya i vzryva, 1983, no. 4, p. 153.
3. L. V. Altshuler, V. S. Zhuchenko, N. F. Imkhovik, I. S. Men'chov // Chemical Physics, 1999, vol. 18, no 11, pp. 69–71.
4. D. A. Varfolomeev, K. F. Grebyonkin, A. L. Zherebtsov and D. V. Kochutin // Abstracts of Zababakhin Scientific Talks, Snezhinsk, 2012, pp. 67–68.

2-32

## РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЯЧЕЙСТОЙ СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ И СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

А. Д. Егорян, А. Н. Крайко, К. С. Пьянков

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

E-mail: akraiko@ciam.ru

В рамках модели химической кинетики водородо-воздушной смеси с 18 реакциями и 9 компонентами выполнены расчеты нестационарной двумерной ячейистой структуры детонационных волн и спиновой детонации.

Уравнения Эйлера интегрировались по модифицированной схеме С. К. Годунова, которая на гладких решениях и равномерных сетках обеспечивает второй

порядок аппроксимации и первый на нерегулярных сетках. Для интегрирования уравнений химической кинетики развит подход, позволяющий на каждом шаге интегрирования не решать систему  $N$  уравнений для  $N$  приращений концентраций, что уменьшает количество арифметических действий в  $N$  раз. Зона интенсивного протекания реакций считалась на мелкой сетке. Перед детонационной волной и в области, где изменение параметров близко к термодинамически равновесному ячейки быстро укрупнялись.

Чтобы детонационная волна не выходила за пределы расчетной области, в набегающем потоке изменялась концентрация горючего. Введение обратной связи концентрации горючего с положением детонационной волны, позволило добиться того, что волна практически стоит в расчетной области. Из-за отличия двумерных расчетов от трехмерных экспериментов найденные размеры детонационных ячеек в разы отличаются от их экспериментальных значений.

Изучалось изменение числа детонационных ячеек при изменении поперечного размера расчетной области. Установлено, что как только зона одной ячейки детонации увеличивается больше чем вдвое, происходит переход от одной ячейки к двум. Обратный процесс происходил при сужении поперечного размера. Обнаружен гистерезис и установлены границы существования перехода одной ячейки в две и двух ячеек в одну.

Спиновые детонационные волны движутся примерно по нормали к дозвуковому потоку холодной смеси, что усложняет расчет. Развита метод выхода на установившийся режим спиновой детонации через пару переходов расчетной области.

Сочетание метода ускорения решения уравнений химической кинетики на сильно неравномерных разностных сетках и стабилизации детонационной волны позволили получать результаты за несколько часов счета на одноядерном персональном компьютере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (14-01-00146) и (14-01-31057).

## CALCULATION OF NONSTATIONARY CELLULAR STRUCTURE OF DETONATION WAVE AND SPINNING DETONATION

A. D. Egoryan, A. N. Kraiko, K. S. Piankov

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

E-mail: akraiko@ciam.ru

The chemical kinetics model for the hydrogen-air mixture with 18 reactions and 9 components was used to calculate nonstationary 2-D cellular structure of detonation waves and spinning detonation.

Eulerian equations were integrated using S.K. Godunov scheme which gives the second order of approximation on smooth solutions and regular meshes, and the first order of approximation on irregular meshes. To integrate the chemical kinetics equations, a special approach was developed when it is not necessary to solve the system of  $N$  equations for  $N$  increments of concentrations at each integration step; thus the number of arithmetic operations is  $N$ -time reduced. Fine mesh was used to calculate the intensive reaction zone.

Before the detonation wave and in the area where the parameters change is close to thermodynamically equilibrium one, the cells coarsened fast.

For the detonation wave not to fall outside the computational domain, the fuel concentration was changed in the inflow. When the “fuel concentration – detonation wave position” feedback was introduced, the wave was nearly immobile in the computational domain. Because of the difference between 2-D calculations and 3-D experiments, the obtained dimensions of detonation cells many times differ from their experimental values.

The change in the number of detonation cells with the change in the cross-sectional dimensions of the computational domain was studied. It was stated that as soon as the zone of one detonation cell increases more than twice, the one-into-two cells transition occurs. The reverse process was observed when the cross-sectional dimension was contracted. Hysteresis was observed and boundaries of one-into-two cells and two-into-one cell transitions were determined.

Computation was complicated due to the spinning detonation wave motion almost normally to the subsonic flow of a cold mixture. The method to establish the stationary mode of spinning detonation after a couple of passages of the computational domain was developed.

The method to promote solution of chemical kinetics equations on strongly irregular differential meshes was combined with stabilization of the detonation wave and this combination made it possible to obtain the results after several hours of computations on a single-core PC.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grants # 14-01-00146 and 14-01-31057).

2-33

**ОСОБЕННОСТИ МИКРООЧАГОВОГО  
ХАРАКТЕРА РЕАКЦИИ  
ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ  
ИНИЦИИРОВАНИИ ТЭНА**

А. Г. Кречетов, А. С. Зверев, А. Ю. Митрофанов,  
А. С. Пашпекин, Н. В. Полева, В. Н. Швайко

Кемеровский государственный университет, Кемерово,  
Россия

E-mail: lira@kemsu.ru

Предложена микроочаговая модель зарождения цепной реакции взрывного разложения при лазерном инициировании энергетических материалов. Зародышами микроочагов являются флуктуации плотности возбуждений, возникающие в результате стохастического характера взаимодействия фотонов с энергетическим материалом при фотоинициировании. Вероятность взрыва определяется конкуренцией двух процессов: а) микровзрыва в изолированном очаге, приводящего к выбросу вещества из области очага и образованию каверн, и б) перекрывания растущих очагов, приводящего к образованию зоны взрыва и макровзрыву значительной части или всего образца.

Проведена экспериментальная проверка предсказаний модели (зависимость вероятности взрыва и дли-

тельности индукционного периода ТЭНа от экспозиции инициирования (1064 нм, 10 нс), подтверждающая адекватность предложенной модели.

**FEATURES OF MICRO-CENTER CHARACTER  
OF EXPLOSIVE DECOMPOSITION REACTION  
OF LASER INITIATION OF PETN**

A. G. Krechetov, A. S. Zverev, A. Yu. Mitrofanov,  
A. S. Pashpekin, N. V. Poleeva, V. N. Shvaiko

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: lira@kemsu.ru

A model of micro-focal origin of a chain reaction of explosive decomposition of laser initiation of energetic materials is proposed. Embryos micro-foci are fluctuations of the density of excitations, resulting from the stochastic nature of the interaction of photons with energetic material for photo-initiation. Probability of explosion is determined by two competing processes: a) microburst in an isolated focus, resulting in the release of substances from the source region and the formation of cavities, and b) the growing overlap foci, leading to the formation zone of the explosion and the macro-explosion or a significant part of the whole sample.

The experimental verification of the predictions of the model (the probability of an explosion and the duration of the induction period of PETN initiation of exposure (1064 nm, 10 ns), confirming the adequacy of the proposed model is performed.

2-34

**ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
В БОЕПРИПАСАХ Пониженного РИСКА  
ЛИТЬЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ  
НА ОСНОВЕ КОМПОНЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИИ  
ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ**

Ю. М. Милёхин, А. А. Матвеев, В. Н. Куликов,  
А. Н. Осапчук, Н. И. Шишов

Федеральный центр двойных технологий «Союз», Дзержинский  
Московской обл., Россия

E-mail: fcdt@monnet.ru,

Одним из путей повышения эффективности боеприпасов является использование в качестве их зарядов новых мощных взрывчатых веществ (ВВ), которые превосходят по значениям своих энергетических характеристик, применяемые в настоящее время штатные бризантные ВВ – тротил, гексоген, октоген [1–3] и смеси на их основе. В данном направлении за рубежом и в России проводятся исследования по разработке, как индивидуальных ВВ, так и литьевых взрывчатых составов (ВС), содержащих традиционные для твердых ракетных топлив (ТРТ) компоненты: ВВ (гексоген или октоген), окислитель, металлическое горючее (АI) и полимерное связующее. При этом в соответствии с требованиями безопасности они должны быть малочувствительными к внешним воздействиям.

Экспериментально-расчетные исследования [3, 4] показали, что современные ТРТ и ряд новых ВС по некоторым основным физико-химическим характеристикам более перспективны с точки зрения взрывобезопасности их изготовления и эксплуатации, а также эффективности применения в средствах поражения в сравнении со штатными ВВ (тротил, ТГ-40, А-IX-2, окфол). В работе представлены результаты исследований по определению взрывчатых и энергетических характеристик модельных рецептур литевых смесевых ВС в целях оценки возможности их использования в боеприпасах пониженного риска. Изучено влияние на параметры детонации, осколочное и метательное действие составов содержания компонентов в рецептуре, размера частиц ВВ и окислителя. Для ряда ВС проведены испытания по оценке их поведения в макетах и изделиях при различных внешних воздействиях (нагрев, прострел и др.).

### Литература

1. Талавар М. Б., Сивабалан Р., Анниппан М., Горе Г. М., Астана С. Н., Гандхе Б. Р. Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов // Физика горения и взрыва, 2007. Т. 43. № 1. С. 72–85.
2. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е, в 2 т.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
3. 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.
4. Милехин Ю. М., Матвеев А. А., Куликов В. Н., Осавчук А. Н., Шишов Н. И., Исследование влияния содержания компонентов в мощных смесевых составах на их взрывчатые и энергетические характеристики // Сборник тезисов докладов на Международной конференции XI Забабахинские научные чтения, 16–20 апреля 2012 г., г. Снежинск, РФЯЦ–ВНИИТФ, С. 97–98.

### PERSPEKTIVE OF USING INSENSITIVE AMMUNITION OF MOLDING EXPLOSIVE COMPOSITIONS BASED ON COMPONENTS AND TECHNOLOGY OF SOLID ROCKET FUELS

Yu. M. Milekhin, A. A. Matveev, V. N. Kulikov,  
A. N. Osavfchuk, N. I. Shishov

FCDT “Soyuz”, Dzerzhinsky, Moscow reg., Russia  
E-mail: fcdt@monnet.ru,

One way to improve the effectiveness of ammunition is to use as their charges new powerful explosives, which exceed to the values of their energy characteristic, currently used regular blasting explosives – TNT, RDX, HMX [1–3] and mixtures based on them. In this direction, both abroad in Russia conducted research on development, both individual explosives and molding explosive compositions (EC), containing tradiatsionnye for solid rocket fuels (SRF) components: explosives (RDX or HMX), oxidizer, metal fuel (Al) and polymer binding. At the same time, in accordance with the requirements of security, EC should be low-sensitive to externals influences.

Experimental and computational studies [1–3] have shown, that a modern SRF and a number of EC on some major physic and chemical characteristics are more perspective in terms of explosion of manufacturing and operation, as well as the effectiveness of the lesion in the media in comparison with regular explosives (TNT, TG-40, A-IX-2, okfol). This paper (in continuation [3, 4]) presents the results of studies on the determination the explosive and energetic characteristics of model formulation mixed injection EC to assess the possibility of their use in insensitive ammunition. There were studied the influence on the parameters of detonation, fragmenting and propelling effect contents of components in formulation, particle size explosive and oxidizer. For a number EC tested to evaluate their behavior in models and mention under various external influences (heating, cross, etc.).

### 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. Physics of explosion / on red. L. P. Orlenko- Edit. 3-e, in 2 t. – M: FIZMATLIT, 2002.
3. 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.
4. Milekhin Yu.M., Matveev A. A., Kulikov V. N., Osavfchuk A. N., Shishov N. I. Study of the influence of components in high-power mixed compositions on their explosive and energetic characteristics // Collection abstracts proceeding of International Conference «XI Zababakhin Scientific Talks», RFNC – VNIITF. Snezhinsk, 16–28 April, 2012. P. 97–98.

2-35

### ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И МЕХСВОЙСТВ НАРУЖНЫХ СЛОЕВ БЕТОНА НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТАЛЬНОЙ КАМЕРЫ НАГРУЖАЕМОЙ ВЗРЫВОМ

А. П. Кухарев, В. И. Беляков,  
М. В. Никульшин, Ар. Ю. Симонов

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

На основе серии численных расчетов результатов действия импульсного давления на оболочку подкрепленную слоем бетона оценена его эффективность по величине относительного снижения смещений  $\Theta = W_{\text{бет}}/W$ . Построены безразмерные зависимости эффективности  $\Theta$  от плотностей, толщин, упругих и пластических свойств стали и бетона в широком диапазоне. Показана связь эффективности  $\Theta$  с отношением волновых сопротивлений стальной оболочки и слоя бетона. Непротиворечивость полученных зависимостей подтверждена результатами взрывных нагружений оболочек подкрепленных льдом и бетоном.

**EFFECT OF THICKNESS AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF OUTER CONCRETE LAYERS ON THE DISPLACEMENT OF THE EXPLOSIVELY LOADED CYLINDRICAL STEEL CHAMBER**

A. P. Kukharev, V. I. Belyakov,  
M. V. Nikulshin, Ar. Yu. Simonov

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

Effect of the pulsed pressure on the shell surrounded by a concrete layer was numerically calculated to estimate concrete efficiency by the value of the relative decrease of displacements  $\Theta = W_{conc}/W$ . Dimensionless dependences of efficiency  $\Theta$  on densities, thicknesses, elastic and plastic properties of steel and concrete are constructed in a wide range. Efficiency  $\Theta$  is shown to depend on the wave resistance of the steel shell and the concrete layer. Consistency of our dependencies is confirmed by results of explosive experiments with the shell surrounded both by ice and concrete.

2-36

**О ВЛИЯНИИ НА ВЕЛИЧИНЫ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК ОТНОШЕНИЙ РАДИУСА И ДЛИНЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СОСУДА К РАДИУСУ ЗАРЯДА ВВ**

A. П. Кухарев, С. А. Ващинкин,  
М. Ю. Сахаров, М. В. Никульшин

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

На основе анализа результатов численных расчетов показано, что при взрыве шарового заряда в центре цилиндрической камеры на величины нагрузок на днища и экваториальную зону наиболее сильно влияет отношение радиуса  $R$  корпуса к радиусу  $R_0$  заряда. Влияние длины камеры  $2L$  гораздо слабее. Показано, что при  $R/R_0 = 2-4$  относительное увеличение длины с  $L/R_0 = 10$  до  $L/R_0 = 20$  приводит к снижению нагрузки на днища в 1,5 раза, а с  $L/R_0 = 20$  до  $L/R_0 = 30$  – в 1,2 раза. При  $R/R_0 > 7$  изменение  $L/R_0 > 10$  снижает нагрузку на днища менее, чем на 10%.

**DEPENDENCE OF EXPLOSIVE LOADS ON THE RADIUS AND LENGTH OF A CYLINDRICAL VESSEL VERSUS EXPLOSIVE CHARGE RADIUS RELATIONSHIP**

A. P. Kukharev, S. A. Baschinkin,  
M. Yu. Sakharov, M. V. Nikulshin

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

Analysis of calculation results demonstrates that if a sphere charge explodes in the center of a cylindrical chamber, the load onto the bottom and the equatorial zone

strongly depends on the charge case radius  $R$  versus charge radius  $R_0$  relationship. Dependence on the chamber length  $2L$  turned out to be weaker. At  $R/R_0 = 2-4$ , relative increase of the length from  $L/R_0 = 10$  up to  $L/R_0 = 20$  is shown to result in the 1.5 times decrease of the load onto the bottom and from  $L/R_0 = 20$  up to  $L/R_0 = 30$  – in the 1.2 times decrease. At  $R/R_0 > 7$ , changes in  $L/R_0 > 10$  lead to the less than 10% reduction in the load onto the bottom.

2-37

**ОБ ОБЩИХ ПАРАМЕТРАХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ ВВ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРАХ НА ГРАНИЦЕ «ВЗРЫВ – НЕВЗРЫВ»**

A. П. Кухарев, О. С. Путилин, М. В. Никульшин

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

Энергетический критерий взрыва ВВ в результате механических воздействий был предложен во ВНИИТФ в 1996 г. в работах по оценке амортизирующих покрытий и о уровнях безопасности ЯЗ после аварий, проводимых под руководством И. М. Каменских и академика Б. М. Литвинова.

В настоящей работе представлен анализ результатов расчетов и экспериментов для случаев низкоскоростных ударов, вызывающих взрыв ВВ при его нагружении по поршневой схеме и при локальном внедрении стержней диаметром 5–20 мм. Показано, что при принятой для ВВ диаграмме  $\sigma$ - $\epsilon$ , для всех указанных случаев нагружения возбуждение взрыва происходит при близких параметрах НДС.

Предложено, в качестве первого приближения, использовать следующий критерий взрыва при механическом возбуждении: взрыв возможен, если в объеме не ниже критического ( $\approx 0,06 \text{ см}^3$ ) создается давление не ниже критического и происходит его сброс за время  $\tau_0 < 0,3 \text{ мс}$ .

**GENERAL PARAMETERS FOR STRESSED-DEFORMED STATES OF EXPLOSIVES UNDER LOW-VELOCITY IMPACTS AT THE «EXPLOSION – MALFUNCTION» BOUNDARY**

A. P. Kukharev, O. S. Putilin, M. V. Nikulshin

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

Energy criterion of HE explosion induced by mechanical impacts was proposed at VNIITF in 1996 in the works aimed to estimate buffer coatings and safety level of nuclear charges involved in accidents. This work was performed under the direction of I. M. Kamenskikh and Academician B. V. Litvinov.

The paper analyzes calculation and experimental results obtained when low-velocity impacts were used to initiate explosion of an explosive loaded by a piston and by a lo-

cal penetration of rods having 5–20 mm diameter. With the  $\sigma$ – $\varepsilon$  diagram used for explosive materials, an explosion is initiated at almost the same parameters of the stressed-deformed state in all the cases.

The following criterion of the explosion under mechanical initiation is proposed as the initial approximation: explosion is possible if pressure not less than the critical one is created in the volume not less than the critical one ( $\approx 0.06 \text{ cm}^3$ ) and if pressure drop takes  $\tau_0 < 0.3 \text{ ms}$ .

---

2-38

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИК-ДИАГНОСТИКИ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ  
В ПЛАМЕНИ И РЕГИСТРАЦИИ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ,  
ЭКРАНИРОВАННЫХ СЛОЕМ ПЛАМЕНИ**

Е. Л. Лобода<sup>1</sup>, В. В. Рейно<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

E-mail: loboda@mail.tsu.ru, reyno@iao.ru

При исследовании процессов горения значительную трудность представляет получение распределения термодинамических температур в пламени. Применение традиционных контактных методов измерений температуры связано с техническими трудностями, заключающимися в использовании термопар, которые вносят возмущения в исследуемую среду. Однако, использование микротермопар с диаметром спая не более 25 мкм, которые вносят минимальные возмущения, возможно только в лабораторных условиях, и тем не менее не обеспечивает хорошего пространственного разрешения результатов измерений. Применение современных методов ИК-диагностики позволяет отказаться от использования большого количества термопар и дает возможность получать хорошее разрешение по пространству и времени. Однако, использование этих методов сопряжено с необходимостью решения исследователем ряда задач, а именно: правильно выбрать спектральный интервал исследования, определить коэффициент излучения пламени, оценить влияние излучения других объектов и отражение излучения от них.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований пламени, образующегося при горении растительных горючих материалов, с применением тепловизионных методов ИК-диагностики. Приводится анализ спектра излучения пламени и обоснования выбора спектральных интервалов для измерения полей температуры в пламени и для регистрации высокотемпературных объектов, экранированных слоем пламени. В докладе представлена связь регистрируемой энергетической яркости высокотемпературного объекта, экранированного слоем пламени, с его истинной энергетической яркостью и энергетической яркостью пламени. Приводятся коэффициенты излучения и пропускания пламени для различных спектральных интервалов, находящихся в диапазоне 2–5 мкм.

В докладе представлен анализ изменения во времени температуры в пламени. Приводится частотный спектр изменения температуры, где отчетливо выделяются характерные частоты в диапазоне 2–7 Гц, которые не зависят ни от размера очага горения, ни от массы горючих материалов, а связаны с физическими процессами, протекающими в пламени, в том числе с масштабами турбулентности.

**APPLICATION OF IR-DIAGNOSTICS  
FOR RESEARCH FIELDS FLAME TEMPERATURE  
AND REGISTRATION OF HIGH OBJECTS  
SCREENED BY FLAME**

E. L. Loboda<sup>1</sup>, V. V. Reyno<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Atmospheric Optics Russian Academy of Science, Siberian Branch, Tomsk, Russia

E-mail: loboda@mail.tsu.ru, reyno@iao.ru

In the study of combustion processes is considerable difficulty obtaining the distribution of the thermodynamic temperature of the flame. The use of traditional methods of contact temperature measurements due to technical difficulties, is to use thermocouples, which perturbs to the medium under study. However, the use microthermocouples junction diameter less than 25 mkm, which make the minimum disturbance possible only under laboratory conditions, and yet does not provide good resolution measurements. Application of modern methods of IR-diagnosis eliminates the need for a large number of thermocouples and gives the opportunity to get a good resolution in space and time. However, use of these methods involves the necessity to solve a number of problems the researcher, namely to choose the spectral interval study, to determine the emissivity of the flame, evaluate the impact of radiation from other objects and reflected radiation from them.

The paper presents the results of experimental studies of the flame produced by combustion of combustible materials, using thermal of IR-diagnosis methods. An analysis of the emission spectrum of the flame and justify the selection of spectral intervals for measurement of temperature fields in flames and high-temperature objects for registration, screened by layer of flame. The report presents the communication recorded radiance of high object, screened by layer of flame, with its true radiance and radiance of the flame. Are the coefficients of emission and transmission of the flame for different spectral intervals which are in the range of 2–5 mkm.

The report presents an analysis of changes over time in the flame temperature. Given frequency spectrum of temperature change, where clearly distinguished characteristic frequencies in the range of 2–7 Hz, which do not depend on the size of the combustion chamber, or from the mass of combustible materials, and associated with the physical processes occurring in the flame, including the scale of turbulence.

---

2-39

### ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ ВЗРЫВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

В. И. Олешко, В. М. Лисицын, В. В. Лысык

Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: oleshko@tpu.ru

Одним из перспективных методов исследования взрывного разложения энергетических материалов (ЭМ) является метод импульсной оптической спектроскопии с временным разрешением. К настоящему времени достигнуто высокое временное ( $\approx 1$  нс) и пространственное ( $\approx 5$  мкм) разрешение. Что касается спектрального разрешения, то в большинстве опубликованных работ оно составляет 5–20 нм, что не позволяет однозначно идентифицировать продукты взрывного разложения ЭМ.

Целью настоящей работы является измерение спектров продуктов взрывного разложения азидов тяжелых металлов, тетранитропентаэритрита и фуразанотетразиндиоксида с высоким спектральным разрешением достаточным для идентификации атомов и молекул.

Источником инициирования служил импульсный ускоритель электронов ( $\sim 250$  кэВ,  $\sim 15$  нс). Плотность энергии сильноточного электронного пучка варьировалась в диапазоне 0,2–50 Дж/см<sup>2</sup>. Использовались два метода регистрации спектра взрыва. В первом методе изображение плазмы проецировали на входную щель монохроматора МДР 23 и фотографировали цифровым фотоаппаратом SONY  $\alpha 500$  при снятой выходной щели монохроматора (спектральное разрешение метода  $\approx 0,2$  нм; спектральный диапазон измерений 400–700 нм). Идентификацию спектральных линий атомов и молекул, зарегистрированных при взрыве ЭМ, осуществляли с помощью известных атомных спектров, которые одновременно со спектром взрыва фотографировали на одну спектрограмму с помощью спектральных ламп ЛСП 1. Во втором методе интегральные спектры взрыва регистрировали с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec 2048–2 (диапазон измерений 200–1100 нм, спектральное разрешение  $\approx 1,5$  нм).

В спектрах взрывного свечения исследованных ЭМ в «красной» области спектра обнаружены интенсивные линии свечения щелочных металлов Na, Li и K, которые в виде примесей входят в состав ЭМ в процессе их изготовления. Испарение подложки (дюралюминий), на которой крепится исследуемый образец, приводит к появлению дополнительных атомных линий (Al, Ca) и молекулярных полос AlO в спектрах плазмы взрыва. Результаты исследований представляют интерес для разработки взрывных источников излучения для атомной и молекулярной спектроскопии энергетических и инертных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, Госзадание «Наука», тема 3.1329.2014 (2152).

### EMISSION SPECTROSCOPY OF EXPLOSION PLASMA OF ENERGETIC MATERIALS INITIATED BY ELECTRON BEAM

V. I. Oleshko, V. M. Lisitsyn, V. V. Lysyk

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

E-mail: oleshko@tpu.ru

Optical pulsed spectroscopy with the time resolution is one of the promising methods for studying of explosive decomposition of energetic materials (EM). At present, high time ( $\sim 1$  ns) and dimensional ( $\sim 5$   $\mu\text{m}$ ) resolutions are achieved. As for the spectral resolution, it doesn't exceed  $\sim 5$ – $20$  nm in the majority of publications. This doesn't allow unambiguous identification of EM explosive decomposition products.

The presented work is aimed at measuring of emission spectra observed during explosive decomposition of heavy metal azides, pentaerythritol tetranitrate and furazanotetrazinedioxide with high spectral resolution sufficient for atom and molecules identification.

Pulse electron accelerator ( $\sim 250$  keV,  $\sim 15$  ns) was used as a source of initiation. Energy density of high-current electron beam was varied within the range of 0.2–50 J/cm<sup>2</sup>. Two methods were used for registration of explosion spectrum. In the first case the image of plasma jet was projected onto the entrance slit of monochromator MDR-23. The exit slit of monochromator was removed and obtained spectra were photographed with digital camera SONY  $\alpha 500$ . Spectral resolution of the method was  $\sim 0.2$  nm, spectral range of measurements was 400–700 nm. Atomic and molecular spectral lines recorded during the explosion of EM were identified using well-known atomic spectra. These reference spectra were generated by a spectral lamp LSP-1 and photographed along with the explosion emission onto the same spectrogram. In the second method integral spectra of explosion were registered by means of a fiber-optical spectrometer AvaSpec 2048-2 (measurements range 200–1100 nm, spectral resolution  $\sim 1.5$  nm).

Intensive emission lines were observed in the «red» region of explosion spectra of studied energetic materials. These lines are related to alkali metals Na, Li and K which enter EM during their preparation. Evaporation of sample holder (duralumin) leads to appearance of additional atomic (Al, Ca) and molecular (AlO) lines in explosion plasma spectra. Obtained results are of interest for development of explosive emission sources for atomic and molecular spectroscopy of energetic and inert materials.

This work was performed with the financial support of Russian Ministry of Education and Science, government order «Science», theme 3.1329.2014 (2152).

2-40

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ДАВЛЕНИЯ С ВЗРЫВНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ

С. И. Карачинский, И. А. Мальгин, О. А. Тимофеев

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

E-mail: niik@vniitf.ru

Газодинамические источники давления (ГИД) находят широкое применение в различных областях техники. В последнее время появилось много новых технических решений, направленных на расширение их возможностей и улучшение характеристик, в том числе за счет взрывного инициирования с использованием для предотвращения детонации основного заряда пороха различных демпфирующих прослоек.

В докладе приведены результаты экспериментальных исследований параметров работы ГИД с взрывным инициированием, в котором, в качестве демпфирующей прослойки, использован дымный порох. Задачей исследований была оценка зависимости скорости взрывчатого превращения черного пороха от прочности оболочки основного заряда пороха и толщины демпфирующей прослойки из дымного пороха при инициировании последнего зарядом пластичного ВВ на основе высокодисперсного ТЭНа, а также оценка зависимости реализующегося при срабатывании ГИД давления от времени.

В результате исследований подтверждена эффективность использования дымного пороха в качестве демпфирующей прослойки в ГИД с взрывным инициированием и показана возможность изменения закона газообразования ГИД в достаточно широких пределах путем изменения ее (прослойки) параметров.

### Литература

1. Бугаев А. В., Воробьев В. И., Кирюшкин И. Н. и др. Газодинамический источник давления // Патент РФ № RU 2357181 С1 от 28.01.2008.
2. Карачинский С. И., Мальгин И. А., Тимофеев О. А. Заявка на изобретение «Газодинамический источник давления» № 2012140669 от 21.09.2012 (положительное решение о выдаче Патента РФ от 24.01.2014).
3. Бугаев А. В., Калмыков П. Н., Шляпников Г. П. Исследование внутренней баллистики источников давления с комбинированным (порох+ВВ) зарядом // Сборник докладов научно-технической конференции РАРАН. Г. Саров, 2000. С. 475–481.
4. Беляев А. Ф., Курбангалина Р. Х., Осуществление детонации дымного пороха // Журнал физической химии, 1964. Т 38. № 3, С. 579–582.
5. Карачинский С. И., Лежнев В. Б., Мальгин И. А., Тимофеев О. А. и др. Манометрическая бомба для исследований параметров импульса давления комбинированных зарядов ВВ и порохов. Сборник материалов X Международной конференции «Забабахинские научные чтения» // г. Снежинск, РФЯЦ–ВНИИТФ, 2010, С. 108.
6. Втулкин А. А., Комаров В. И., Карачинский С. И., Мальгин И. А., Рубашин А. В., Тимофеев О. А. Ударный стенд // Патент РФ № 126133 от 20.03.13

## INVESTIGATION INTO OPERATION PARAMETERS OF EXPLOSIVELY-INITIATED GAS-DYNAMIC PRESSURE SOURCE

S. I. Karachinskiy, I. A. Malguin, O. A. Timofeyev

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

E-mail: niik@vniitf.ru

Gas-dynamic pressure sources (GPS) are widely used in different areas of engineering. Recently, many technical solutions have appeared to enlarge functionality of GPS and improve their parameters including the case with explosive initiation where various damping layers are used to prevent detonation of the main powder charge.

The paper gives the results in experimental investigation into operation parameters of explosively-initiated GPS containing smoke powder as a damping layer. The investigation was tasked to evaluate the dependence of transformation velocity of black powder on strength of the main powder charge shell and on thickness of smoke powder used as a damping layer when the latter is initiated by the plastic-bonded explosive charge based on the fine-grained PETN. The study was also aimed at evaluating the pressure dependence on time at GPS activation.

The study has proven the efficiency of smoke powder used as a damping layer in explosively-initiated GPS and has shown the possibility of sufficiently large change in the law of gas generation in GPS by varying parameters of this layer.

### References

1. Bugayev A. V., Vorobyov V. I., Kiryushkin I. N. et al. Gas-dynamic pressure source // RF Patent # RU 2357181 C1 of 28.01.2008.
2. Karachinskiy S. I., Malguin I. A., Timofeyev O. A. Claim for the invention “Gas-dynamic pressure source” # 2012140669 of 21.09.2012 (favourable decision resulted in issuing the RF Patent of 24.01.2014).
3. Bugayev A. V., Kalmykov P. N., Shlyapnikov G. P. Study of internal ballistics of pressure sources containing the combined charge (black powder+HE) // Proceedings of RAMAS Technical Scientific Conference (Russian Academy of Missile and Artillery Science), Sarov, 2000, pp. 475–481.
4. Belyayev A. F., Kurbangalina R. Kh. Realization of smoke powder detonation // Physical chemistry journal, 1964. V. 38, # 3, pp. 579–582.
5. Karachinskiy S. I., Lezhnev V. B., Malguin I. A., Timofeyev O. A. et al. Closed explosive bomb to study parameters of pressure pulses of combined HE and powder charges. Proceedings of the Xth International Conference “Zababakhin Scientific Talks” // Snezhinsk, RFNC – VNIITF, 2010, p. 108.
6. Vtulkin A. A., Komarov V. I., Karachinskiy S. I., Malguin I. A., Rubashin A. V., Timofeyev O. A. Shocking stand // RF Patent № 126133 of 20.03.13.

2-41

**ЭФФЕКТЫ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ  
ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ  
ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ И ИХ ОПИСАНИЕ  
РЕАКЦИОННЫМ МЕХАНИЗМОМ  
С КВАНТОВЫМИ ПОПРАВКАМИ**

С. П. Медведев, С. В. Хомик,  
Г. Л. Агафонов, О. Г. Максимова

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

E-mail: s\_p\_medvedev@chph.ras.ru

В пионерских работах Воеводского и Солоухина отмечено, что измеренные задержки самовоспламенения водорода при температуре  $T < 1000$  К оказываются намного короче рассчитанных по детальным реакционным механизмам. Различие может достигать 2–3 порядка величины при снижении температуры до 650–700 К и увеличении давления до 1,5–2,5 МПа. Обнаруженный эффект проявляется в экспериментах на установках различного типа – ударных трубах, машинах адиабатического сжатия и проточных реакторах.

В представленной работе явление «раннего» самовоспламенения водородсодержащих смесей исследовано на ударной трубе, работающей в условиях генерации волн сжатия при взаимодействии отраженной ударной волны с контактным разрывом («over-tailored» режим). При использовании такой методики динамика сжатия и нагрева горючей смеси имеют много общего с развернутой индикаторной диаграммой поршневого двигателя, однако, без спада давления после достижения верхней мертвой точки. Время наблюдения ограничено приходом головы волны разрежения и достигает 30 мс (при длине трубы 10 м). Исследовалось самовоспламенение смесей водород – воздух и синтез-газ – воздух при давлении до 2 МПа и температуре 650–950 К, т. е. в диапазоне параметров, представляющих интерес для проблем водородной взрывобезопасности на АЭС и проектирования перспективных двигательных установок. Эксперименты подтвердили эффекты, полученные на других типах установок. С помощью высокоскоростной теневой съемки установлено, что низкотемпературное самовоспламенение водородсодержащих смесей носит очаговый характер. Показано, что детальная реакция механизма горения водорода описывает эффект «раннего» самовоспламенения при условии введения квантовых поправок к константам скоростей экзотермических реакций (Елецкий, Старостин, Таран 2005).

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» (ГК № Н.4х.44.90.13.1106) и при частичной поддержке РФФИ (проект 12-03-00963-а).

**SELF-IGNITION EFFECTS OF HYDROGENOUS  
MIXTURES AT HIGH PRESSURE  
AND ITS INTERPRETATION VIA REACTION  
MECHANISM WITH QUANTUM CORRECTIONS**

S. P. Medvedev, S. V. Khomik,  
G. L. Agafonov, O. G. Maximova

Semenov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: s\_p\_medvedev@chph.ras.ru

In their pioneering works Voevodsky and Soloukhin revealed that the measured self-ignition delays of hydrogen at  $T < 1000$  K appear to be much shorter than calculated by detailed reaction mechanisms. The difference can reach 2–3 orders of value at temperature decrease down to 650–700 K and pressure increase up to 1.5–2.5 MPa. The revealed effect takes place at different type of setups including shock tubes, adiabatic compression machines and flow reactors.

Present work reports investigation of an «early-time» ignition phenomenon in hydrogenous mixtures using a shock tube operated under over-tailored conditions. This method affords the dynamics of compression/heating of a combustible mixture to be similar to pressure-time diagram in a reciprocating engine but without expansion phase after reaching the top dead centre. The observation time is limited by the arrival of the head of a rarefaction wave and may amount to as much as 30 ms in the tube of 10 m in length. The self-ignition of hydrogen-air and syngas – air mixtures was investigated at pressures up to 2 MPa and temperature ranged between 650 K and 950 K. These conditions are typical for accidents in nuclear power stations and for prospective engines as well. The experimental observations reinforce the effects achieved at different types of setups. The use of the shadow high-speed visualization demonstrated a hot spot nature of the low-temperature ignition of hydrogenous mixtures. It was shown that a detailed reaction mechanism is capable to fit an effect of the «early-time» ignition when quantum corrections to constants of exothermic reactions are taking into account (Eletsii, Starostin, Taran 2005).

This work was supported by «Rosatom» (CN H.4x.44.90.13.1106) and partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 12-03-00963-a).



2-42

**ТЭН, ГЕКСОГЕН, ОКТОГЕН И ТАТБ:  
ЗАВИСИМОСТЬ ШИРИНЫ  
ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ  
ОТ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ  
СЖАТИИ ПО ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА  
ПЛОТНОСТИ С ПОПРАВКАМИ  
НА ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВОЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И КВАЗИЧАСТИЧНЫЕ  
ВОЗБУЖДЕНИЯ**

А. Э. Муханов, А. В. Янилкин

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

E-mail: mukhanov@vniia.ru

В начале 1990-х Гилман [1] предложил идею о переходе взрывчатого вещества в ударной волне из состояния изолятора в проводящее состояние с последующим адиабатическим расширением свободных электронов. Одной из причин такого поведения электронов является сужение или исчезновение щели между верхней валентной зоной и нижней зоной проводимости в монокристалле. Хорошо известно, что такая тенденция может быть воспроизведена с помощью теории функционала плотности (ТФП). Однако существует серьезная проблема, связанная с занижением значения щели в ТФП. Поэтому для количественного предсказания степени сужения щели под давлением необходимо использовать более сложные методы расчета, например, такие как метод квазичастичных возбуждений.

Из первых принципов мы определили тензоры упругих постоянных для идеальных кристаллов тэна, гексогена, октогена и ТАТБ. На их основе было воспроизведено гидростатическое сжатие монокристаллов и получены «холодные» уравнения состояния. Поскольку в этих веществах существенное значение имеют силы Ван-дер-Ваальса, было использовано приближение для сил межатомного взаимодействия, комбинирующее теорию функционала плотности и дальнедействующие потенциалы по методу Гримме [2]. Мы определили зависимости ширины щели в зонной структуре от величины внешнего давления.

Наши предварительные результаты по расчетам квазичастичных возбуждений показали, что для несжатого монокристалла ТАТБ величина щели получаемая этим методом в два раза больше величины, даваемой ТФП. Этот результат в общем согласуется с известным соотношением между результатами ТФП и метода квазичастичных возбуждений [3].

#### Литература

1. Gilman J. J. *Philosophical Magazine Part B*, 67:2, 207 (1993); Gilman J. J. *Philosophical Magazine Part B*, 71:6, 1057 (1995).
2. Grimme, S. J. *Comput. Chem.*, 27, 1787 (2006).
3. Aulbur W G, Jönsson L and Wilkins J W *Solid State Physics* 54:1 (2000).

**PETN, RDX, HMX, AND TATB:  
BAND GAP DEPENDENCE ON PRESSURE  
UNDER HYDROSTATIC COMPRESSION  
FROM DFT WITH GW AND VDW CORRECTIONS**

A. E. Mukhanov, A. V. Yanilkin

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: mukhanov@vniia.ru

In early 1990s Gilman [1] proposed the idea that explosives transit from insulator to conductor state with following adiabatic expansion of free electrons in shockwave. One of the reasons of such a behavior of electrons is narrowing or disappearing of the gap between top valence band and bottom conduction band in explosive single crystal. It is well known that similar behavior can be simulated by Density Functional Theory (DFT). But there is a severe problem of lowering the value of gap by DFT. So for quantitative prediction of narrowing of gap under pressure it is necessary to use more complicated methods like GW.

From first principle calculations we determined elastic moduli for ideal crystals of PETN, RDX, HMX, and TATB. Accounting for those moduli we simulated the 0 K isotherms for hydrostatic compression of single crystals and obtained equations of states. Due to essential role of van der Waals interaction in such materials the vdW corrections to DFT in Grimme's [2] form was used. We obtained the dependencies for band gap on pressure under hydrostatic compression.

Our preliminary results on GW calculations show that for TATB at initial uncompressed volume we have the value of gap twice a bigger in GW than in DFT. This result is in general consistent with known relation between GW and DFT [3].

#### References

1. Gilman J. J. (1993) Shear-induced metallization, *Philosophical Magazine Part B*, 67:2, 207–214; Gilman J. J. (1995) Chemical reactions at detonation fronts in solids, *Philosophical Magazine Part B*, 71:6, 1057–1068.
2. Grimme, S. J. *Comput. Chem.* 2006, 27, 1787.
3. Aulbur W G, Jönsson L and Wilkins J W 2000 *Solid State Physics* 54 pp 1–172.

2-43

**ИНИЦИИРОВАНИЕ  
ФУАЗАНОТЕТРАЗИНДИОКСИДА  
И СМЕСЕЙ НА ЕГО ОСНОВЕ  
СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

В. И. Олешко<sup>1</sup>, В. Е. Зарко<sup>2</sup>, В. В. Лысык<sup>1</sup>,  
В. П. Ципилев<sup>1</sup>, П. И. Калмыков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН,  
Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>ФГУП ФНПЦ «Алтай», Бийск, Россия

E-mail: oleshko@tpu.ru

Эндотермическое вещество фуразанотетразин диоксид ( $C_2N_6O_3$ , ФТДО), обладающее высокой энтальпией образования (4200 кДж/кг), представляет большой интерес в качестве перспективного высокоэнергетического материала. Однако его практическое использование затруднено в связи с высокой чувствительностью к механическим воздействиям. Для преодоления этого препятствия предложено кристаллизовать ФТДО в смеси с динитродиазептаном ( $C_3H_8N_4O_4$ , ДНП).

В настоящей работе изучены закономерности и особенности электронно-пучкового инициирования образцов ФТДО и смесей ФТДО/ДНП с содержанием ФТДО 75 и 80 вес. %.

Исследуемые образцы ФТДО представляли собой прессованные таблетки ( $\varnothing = 3$  мм,  $d = 420\text{--}450$  мкм,  $\rho = 1,44$  г/см<sup>3</sup>). Образцы смесей ФТДО/ДНП приготавливались кристаллизацией соответствующего расплава. Источником инициирования служил наносекундный ускоритель электронов (эффективная энергия электронов  $\sim 250$  кэВ, длительность импульса тока  $\sim 15$  нс). Кинетические характеристики катодолуминесценции ФТДО и продуктов взрывного разложения регистрировались с помощью измерительной системы на основе дифракционного монохроматора МДР-23, ФЭУ-84 и осциллографа Tektronix DPO 3034. Интегральные спектры взрыва регистрировали с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec 2048-2 (спектральное разрешение  $\approx 1,5$  нм).

Установлено, что при облучении ФТДО электронным пучком с плотностью энергии  $H \sim 0,1$  Дж/см<sup>2</sup> наблюдается взрывное разложение образцов. На кинетической кривой наблюдается два пика свечения: катодолуминесценция образца и свечение продуктов взрывного разложения, возникающее с задержкой  $t_{\text{инд.}} \sim 1,2$  мкс относительно момента облучения. Увеличение плотности энергии СЭП в диапазоне  $0,1 \leq H \leq 0,25$  Дж/см<sup>2</sup> приводит к монотонному уменьшению индукционного периода с 1200 нс при одновременном сокращении длительности импульса взрывного свечения. Обнаружен размерный эффект. Взрыв ФТДО инициируется при  $d \geq 300$  мкм. Увеличение содержания ДНП  $>80$  вес. % приводит к увеличению порога инициирования взрыва.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, Госзадание «Наука», тема 3.1329.2014 (2152).

**INITIATION OF FURAZANOTETRAZINEDIOXIDE  
AND MIXES ON ITS BASIS BY HIGH-CURRENT  
ELECTRON BEAM**

V. I. Oleshko<sup>1</sup>, V. E. Zarko<sup>2</sup>, V. V. Lysyk<sup>1</sup>,  
V. P. Tsipilev<sup>1</sup>, P. I. Kalmykov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Novosibirsk,  
Russia

<sup>3</sup>Federal Research & Production Center ALTAI, Biysk, Russia

E-mail: oleshko@tpu.ru

The endothermic substance furazanotetrazinedioxide ( $C_2N_6O_3$ , FTDO) with high enthalpy of formation (4200 kJ/kg) is of great interest as a perspective high-energy material. However, its practical use is complicated due to the high sensitivity to the mechanical impact. For resolving this problem it is suggested to crystallize FTDO in a mix with dinitrodiazepentane ( $C_3H_8N_4O_4$ , DNP).

In the present work behavior and features of electron beam initiation of FTDO samples and FTDO/DNP mixes (with FTDO content of 75 and 80 weight %) are studied.

FTDO samples were pressed in the form of tablet (diameter = 3 mm, thickness  $d = 420\text{--}450$   $\mu\text{m}$ , density  $\rho = 1.44$  g/cm<sup>3</sup>). Samples of FTDO/DNP mixes were prepared by crystallization of corresponding melt. Nanosecond pulse electron accelerator (average electron energy  $\sim 250$  keV, pulse duration  $\sim 15$  ns) was used as a source of initiation. Kinetic characteristics of FTDO cathodoluminescence and gloving of explosive decomposition products were registered by measurement system based on grating monochromator MDR-23, PMT-84 and oscilloscope Tektronix DPO 3034. Integral spectra of explosion were registered by means of a fiber-optical spectrometer AvaSpec 2048-2 (spectral resolution  $\approx 1.5$  nm).

It was revealed that irradiation of the FTDO samples by an electron beam with the value of energy density  $H \sim 0,1$  J/cm<sup>2</sup> leads to explosive decomposition of samples. Two peaks of gloving appear on a kinetic curve: cathodoluminescence of sample and gloving of explosive decomposition products arising with a delay  $t_{\text{ind}} \sim 1.2$   $\mu\text{s}$  after irradiation instant. Increasing of electron beam energy density within the range of  $0,1 \leq H \leq 0,25$  J/cm<sup>2</sup> leads to monotonous reduction of the induction period from 1200 to 30 ns and simultaneous reduction of duration of explosive luminescence pulse. Size effect was established. FTDO explosion is being initiated at  $d \geq 300$   $\mu\text{m}$ . Increasing of DNP content  $>80$  weight % leads to growing of initiation threshold of explosion.

This work was performed with the financial support of Russian Ministry of Education and Science, government order «Science», theme 3.1329.2014 (2152).

2-44

### ЗАТУХАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ОБЛАКЕ ПЫЛИ ПРИ ПониЖЕННЫХ НАЧАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ СМЕСИ

А. В. Пинаев

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

Изучено влияние начального давления смеси  $p_0$  и параметров пылевой завесы, при которых наблюдается затухание детонационной волны ДВ и остаточного пламени. Проведены эксперименты в вертикальной ударной трубе длиной 7 м со смесью  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + \text{N}_2$  при  $p_0 = 0,01\text{--}0,05$  МПа. Исследованы фракции песка  $\delta = 250\text{--}600, 120\text{--}250, 90\text{--}120$  мкм. Среднеобъемная концентрация пыли  $2,2 \leq k \leq 3,5$  г/л и концентрация пылевого «ядра»  $2,3 \leq k_1 \leq 4,0$  г/л изменялись меньше, чем длина пылевого облака.

В газе без пыли ДВ выходит на установившийся режим (2240–2200 м/с) на расстоянии около 2 м от верха трубы. Частицы пыли, являясь горячими точками, изменяют механизм воспламенения во фронте детонации. Детонация ослабляется лучше в мелких фракциях песка. С уменьшением  $p_0$  энергия смеси снижается, длина зоны реакции увеличивается, и легче осуществляется гашение детонации. При  $p_0 = 0,02$  МПа на нижних участках трубы ДВ замедляется до  $D = 1600\text{--}1700$  м/с, полного гашения детонации не происходит. Наряду с монотонным ослаблением волн в пылевой завесе возникает обратный процесс при  $D \approx 1200\text{--}1300$  м/с, когда нагретые частицы пыли воспламеняют газовую смесь и возникает вторичная детонация. При  $p_0 = 0,015$  МПа после срыва детонации до  $D \approx 10^3$  м/с характерный химпик исчезает, профиль давления становится прямоугольным, свечение продуктов реакции заметно уменьшается. Увеличение  $k$  до 3–3,5 г/л ускоряет срыв детонации, волна к концу трубы плавно замедляется до  $D = 600\text{--}700$  м/с.

В опытах при  $p_0 = 0,01$  МПа ДВ затухала с 2160–2190 м/с (верхний участок трубы) до  $D = 100\text{--}300$  м/с. После срыва детонации на нижнем измерительном участке распространяется волна сжатия, интенсивность свечения в ней примерно на порядок меньше, чем в затухающей ДВ. После отражения этой волны от торца воспламенение несгоревшей смеси не происходит, свечение полностью отсутствует. Для гашения детонации при  $p_0 = 0,01\text{--}0,015$  МПа во фракции песка 90–120 мкм необходима величина  $k = 2\text{--}3,5$  г/л на длине около 6 м.

### THE SUPPRESSION OF A GAS DETONATION IN DUST CLOUD AT LOW INITIAL MIXTURE PRESSURES

A. V. Pinaev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk,  
Russia

E-mail: avpin@ngs.ru

The influence of an initial mixture pressure  $p_0$  and a dusty screen at which detonation wave (DW) and residual flame suppression occurred was investigated. Experiments in a vertical shock tube with the length of 7 m with a mixture of  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + \text{N}_2$  at  $p_0 = 0.01\text{--}0.05$  MPa were performed. The sand fractions  $\delta = 90\text{--}120, 120\text{--}250, 250\text{--}600$   $\mu\text{m}$  were investigated. The dust average volume concentration  $2.2 \leq k \leq 3.5$  g/l and a dust «nuclear» concentration  $2.3 \leq k_1 \leq 4.0$  g/l were changed less than a dusty cloud length.

In a gas without dust DW comes to a steady state (2240–2200 m/sec) approximately at 2 m distance from the top of tube. The dust particles being the hot dots change the combustion mechanism in the detonation front. At the fine sand fractions detonation is weakened better. With reducing of  $p_0$  the energy of mixture decreases while the length of reaction zone increases and the detonation suppression is easily carried out. At  $p_0 = 0.02$  MPa in the lower part of the shock tube DW slowed to  $D = 1600\text{--}1700$  m/sec and the complete suppression does not occur. Along with monotonic waves suppression in a dusty screen a reverse process at  $D \approx 1200\text{--}1300$  m/sec occurs, when heated dust particles ignite the gas mixture and secondary detonation is initiated. After failure of detonation to  $D \approx 10^3$  m/sec at  $p_0 = 0.015$  MPa a characteristic chemical peak is disappeared, the pressure profile becomes triangular and emission of the reaction products significantly decreases. Increase of  $k$  to 3–3.5 g/l accelerates the failure of detonation, the wave gradually slows down at the end of the tube to  $D = 600\text{--}700$  m/sec.

Experiments with  $p_0 = 0.01$  MPa have indicated that DW is slowed down from 2160–2190 m/sec at the top part of the tube to 100–300 m/sec at the end of the tube. After failure of detonation at the bottom diagnostic part of the tube the compression wave with the intensity of emission approximately ten times less than in the dumping DW propagates. After the reflection of that wave from the end of tube the combustion of an unburned portion of the mixture doesn't happen, the emission is completely absent. The value of  $k = 2\text{--}3.5$  g/l on the length around 6 m is necessary to suspend the detonation in the sand fraction 90–120  $\mu\text{m}$  at  $p_0 = 0.01\text{--}0.015$  MPa.

2-45

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА И СРЕДНЕОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ ВЗВЕСЕЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

А. В. Пинаев

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

Во взвесах низкоплотных вторичных ВВ со среднеобъемной плотностью  $k$ , близкой к плотности атмосферного воздуха, реализована самоподдерживающаяся детонация. Экспериментально изучено влияние начального давления воздуха ( $0 < p_0 \leq 0,3$  МПа) на детонационную активность взвесей ВВ, параметры, механизм детонации и величину критической  $k^*$ . В качестве ВВ использован крупнозернистый ТЭН с частицами  $d = 0,2-0,8$  мм,  $k = 0,14-1,28$  мг/см<sup>3</sup>. В зависимости от условий инициирования,  $p_0$  воздуха и  $k$  в опытах наблюдали режимы самоподдерживающейся или затухающей детонации. Установлено, что низкоскоростная детонация в взвесах ВВ распространяется по конвективно-струйному механизму и показано, что не реализуется классический механизм ударно-волнового инициирования. В отсутствие воздуха во взвесах ВВ профиль давления в волне детонации плавный, без характерного ударного скачка.

В взвесах ВВ на переднем фронте детонации регистрируется скачок давления. При  $p_0 < 0,02$  МПа за ударным скачком в волне детонации наблюдается плавный подъем давления. С увеличением  $p_0$  свечение и скорость горения частиц ВВ уменьшаются, и профиль давления за фронтом волны становится вначале (при  $0,02 < p_0 \leq 0,1$  МПа) прямоугольным, а затем (при  $p_0 > 0,1$  МПа) спадающим. Зона свечения на осциллограммах отстоит от скачка давления на 15–50 см, длина области от начала до максимума свечения 0,3–0,5 м, что близко к длине зоны реакции при «вакуумной» детонации.

Случаи затухающей детонации  $D \sim 10^3$  м/с, когда свечение в волне полностью отсутствует, наблюдаются либо вблизи предела детонации при минимальных значениях  $k$ , либо с повышением  $p_0$ . Несмотря на отсутствие свечения, параметры волн превышают параметры ударных волн в воздухе без ВВ, полученных при тех же энергиях в СИ. Это указывает на газификацию зерен ВВ и наличие беспламенных экзотермических реакций за фронтом низкоскоростной затухающей детонации, что подтверждается измерениями значений скоростей и давлений в проходящих и отраженных волнах сжатия. В исследованном диапазоне  $p_0$  и  $k$  величина  $D = 1800-1300$  м/с, с увеличением  $p_0$  возрастает величина  $k^*$ .

## EFFECT OF AIR PRESSURE AND AVERAGE SUSPENSION DENSITY OF THE EXPLOSIVES ON THE DETONATION WAVE PARAMETERS

A. V. Pinaev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk,  
Russia

E-mail: avpin@ngs.ru

The self-sustaining detonation in the low density secondary high explosives (HE) with the average volume density  $k$ , which close to atmospheric air pressure, was realized. Effect of initial air pressure ( $0 < p_0 \leq 0.3$  MPa) on detonation activity of HE air-suspension, parameters, detonation mechanism and the critical  $k^*$  value (below which the detonation does not spread) was experimentally investigated. Coarse-grained PETN with the particles  $d = 0.2-0.8$  mm,  $k = 0.14-1.28$  mg/cm<sup>3</sup> was used as HE. Depending on the initiation terms,  $p_0$  of air and  $k$ , regimes of the self-sustaining or of the damping detonation was experimentally observed. It is found that the low-velocity detonation in HE air-suspensions spreads by convective-jet mechanism and it is shown that in all experiments the classical mechanism of shock-wave initiation is not realized. When the air in HE suspensions is absent the detonation wave has gradual profile without a characteristic shock rise.

In HE air-suspensions a jump of pressure at the forward detonation front is recorded. At  $p_0 < 0.02$  MPa behind the detonation wave front a gradual pressure rise is observed. With the increase of  $p_0$  the particles emission and combustion rate decreases, the pressure profile behind the shock front is initially rectangular (at  $0.02 < p_0 \leq 0.1$  MPa), then it becomes decreasing (at  $p_0 > 0.1$  MPa). Emission zone on the oscillograms is separated from the pressure jump at 15–50 cm. The length of a distance between the beginning and the maximum value of emission is 0.3–0.5 m and close to «vacuum» detonation reaction zone.

The cases of the suspended detonation  $D \sim 10^3$  m/sec (when emission in the wave is totally absent) is observed either near a detonation limit at the small value of  $k$  or with the rise of  $p_0$ . Despite the abstention of the emission the wave parameters exceed the shock wave parameters in air which was received at the same energy without HE. It indicates that a gasification of HE grains takes place and the flameless exothermic reactions behind the front of the low-velocity damping detonation exists what is proved by pressure and velocity variation in the transient and reflected waves. In the investigated range of  $p_0$  and  $k$  value  $D$  is 1800–1300 m/sec and  $k^*$  is increasing with the growth of  $p_0$ .

2-46

## ВЛИЯНИЕ ТИПА ИСКУССТВЕННЫХ ПОР НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

А. В. Пластинин, А. С. Юношев, В. В. Сильвестров

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

E-mail: plastinin@hydro.nsc.ru

Цель работы – получить ответ на вопрос: как влияют характеристики сенсibilизатора на скорость и давление детонации, на параметры зоны реакции эмульсионного ВВ (ЭмВВ). Использовались высокопористые сенсibilизаторы, различающиеся структурой включений и истинной плотностью: 1) микробаллоны из стекла; 2) мелкодисперсный перлит; 3) зольные пустотелые ценосферы; 4) полимерные микробаллоны «Expancel». Основа эмульсионной матрицы – водный раствор смеси аммиачной и натриевой селитры. Плотность исследуемых ЭмВВ составляла 1,0–1,1 г/см<sup>3</sup>.

Постановка эксперимента: заряд ЭмВВ в оболочке из стали с внутренним диаметром 30 мм длиной 300 мм / 1-мм защитная пластинка из плексигласа / манганиновый датчик давления / 20-мм плексиглас. Измерялись скорость детонации и давление в преграде, которое пересчитывалось в давление за фронтом детонации.

Показано, что по мере роста истинной плотности сенсibilизатора скорость и давление детонации уменьшаются, а характерное время реакции увеличивается, что указывает на уменьшение скорости реакции во фронте детонационной волны. На примере «тяжелых» включений: перлита и ценосфер, показано, что структура частиц сенсibilизатора также является существенным фактором.

Максимальные параметры детонации реализуются при использовании микробаллонов из полимера в качестве сенсibilизатора. Регистрируемые значения скорости и давления детонации близки к расчетным значениям (при 100%-ом химическом превращении) для ЭмВВ на основе АС/НС эмульсии (Yoshida et al. 1985). Возможные причины: 1) сведение к минимуму потерь на нагрев и увлечение материала сенсibilизатора, и 2) высокая дисперсность сенсibilизатора, состоящего из углеводородов (газ изобутан внутри оболочки из термопластичной смолы), которые могут окисляться в пределах зоны реакции. В результате возможно увеличение температуры в зоне реакции. Наблюдаемое значительное увеличение амплитуды химического пика, скорости и давления детонации и уменьшение времени реакции прямо указывают на это.

Таким образом, «легкие» полимерные полые микросферы с ультратонкой стенкой около 0,1–0,2 мкм являются наиболее эффективным сенсibilизатором, позволяющим полностью реализовать потенциальные возможности эмульсионного ВВ.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1).

## EFFECT OF ARTIFICIAL PORE FORM ON DETONATION PARAMETERS OF EMULSION EXPLOSIVES

A. V. Plastinin, A. S. Yunoshev, and V. V. Sil'vestrov

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

E-mail: yunoshev@hydro.nsc.ru

The aim of the investigation is to get the answer on question: as far as appreciably the sensitizer characteristics affect on the velocity and pressure detonation, on the reaction zone parameters for emulsion explosives (EMX). The high-porosity sensitizers with different inner structure of inclusions and true densities were used: 1) glass microballoons, 2) fine-dispersive pearlite, 3) ash hollow cenospheres, 4) polymeric microballoons «Expancel». Emulsion matrix is based on the water solution of ammonium and sodium nitrates. The density of investigated EMX's equals 1.0–1.1 g/cc.

Experimental setup is follows: EMX charge in steel casing 30 mm I.D. and 300 mm in length / 1-mm protective Plexiglas plate / manganin pressure gage / 20-mm Plexiglas bottom. The detonation velocity and pressure profile into the Plexiglas target are measured, and recalculated to pressure behind the detonation front.

At an increase of sensitizer true density the detonation velocity and pressure are decreasing, and characteristic reaction time is increasing, that points to the decrease of chemical reaction rate behind the detonation front. In example of «heavy» inclusions: cenospheres and pearlite, it is shown that an inner structure of sensitizer particles has also the vital importance.

The maximal detonation parameters are realizing at use of polymeric microballoons as sensitizer. Registered velocity and pressure values of detonation are close to calculated ones for 100% chemical transformation of EMX based on AN/SN emulsion (Yoshida et al., 1985). The possible reasons are follows: 1) the reduction to minimum of losses on heating and dragging the sensitizer material, and 2) high dispersibility of sensitizer consisting of hydrocarbons (isobutane gas inside the shell from thermoplastic resin) that oxidize into reaction zone. In the result the temperature increase into reaction zone is possible. The observed significant increase of chemical spike pressure, velocity and pressure of detonation, and the decrease of reaction time point to this respect directly.

So, the «light» polymeric hollow microspheres with ultra-thin shell about 0.1–0.2 μm in thick are the most effective sensitizer that allows to realizing completely the potential possibilities of emulsion explosive.

The work was supported by grant of the President of the Russian Federation for State Support of Leading Scientific Schools (NSh-2695.2014.1).

2-47

### ВЛИЯНИЕ «ЭФФЕКТА ДОГОРАНИЯ» ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ИНИЦИИРОВАНИИ ЗАРЯДОВ В СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКЕ

В. Ю. Давыдов<sup>1</sup>, А. С. Губин<sup>1</sup>, А. Д. Никитин<sup>1</sup>,  
И. В. Потапов<sup>1</sup>, Г. С. Григорьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский машиностроительный институт,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт механизации,  
Московская область, Россия  
E-mail: vitadavidov@yandex.ru

Догорание продуктов детонации (ПД) в воздухе оказывает значительное влияние на ускорение и скорость разлета ПД [1]. Было показано, что «эффект догорания» усиливается при увеличении скорости ПД относительно воздуха, что наиболее заметно проявляется для ВВ, содержащих Al.

Для определения степени воздействия на фугасность и осколочное действие, были выполнены измерения давления детонирующей волны (ДВ) и скорости фрагментов стальных образцов, наполненных Окфолом-3,5 и А-IX-2, при односторонней и двусторонней инициации подрыва.

Был зафиксирован явный прирост (+10%) в скорости осколков для А-IX-2 при двустороннем иницировании по сравнению с односторонним иницированием и обратный эффект (-15%) для Окфола-3,5. Аналогичные результаты были получены при измерениях давлений ДВ. Прирост давления ДВ для А-IX-2 варьировался от +10% до 25% во всех точках измерений.

При двустороннем иницировании скорость ПД в воздухе возросла, вследствие чего создавались более благоприятные условия догорания ПД, содержащих Al. Условия догорания ПД Окфола также стали более благоприятными при 2-стороннем иницировании подрыва. Это проявилось в увеличении давления ДВ (+24%) в последней точке измерений. Однако давление ДВ и скорости фрагментов значительно снизились в близких к эпицентру точках измерений.

При двустороннем иницировании подрыва волна разрежения появляется раньше и энергия оболочки ПД полностью меняется в связи с меньшей степенью разлета ПД. Это означает, что меньше энергии взрыва перейдет в работу взрыва, особенно в кинетическую энергию оболочки. Энергия догорания ПД для Окфола-3,5 в большинстве экспериментов не компенсирует газодинамические потери, однако для А-IX-2 демонстрирует положительное воздействие.

Таким образом, была экспериментально продемонстрирована значимость воздействия «эффекта догорания» на фугасность и осколочное действие образцов.

#### Литература

1. В. Ю. Давыдов, А. С. Губин, Ф. С. Загрядцкий, И. В. Потапов // Материалы международной конференции Ударные волны в конденсированных средах, Киев, Украина, 16–21 сентября 2012, с. 334–338.

### “AFTERBURNING EFFECT” AT TWO-SIDED INITIATION OF CHARGES IN STEEL COVER

V. Yu. Davydov<sup>1</sup>, A. S. Goubin<sup>1</sup>, A. D. Nikitin<sup>1</sup>,  
I. V. Potapov<sup>1</sup>, G. S. Grygoryev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Mechanical Engineering, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Research Institute of Mechanization, Moscow region, Russia

E-mail: vitadavidov@yandex.ru

Detonation product's (DP) afterburning in the air have an essential influence on acceleration ability and DP expansion velocity [1]. It was shown that “afterburning effect” increases when DP velocity relative to the air rises, which appears for Al-containing explosive most notably.

In order to check this influence on fugacity and fragmentation action, the measurements of blast wave (BW) pressures and fragment's velocities of steel models, filled by Okfol-3,5 and A-IX-2 at 1- and 2-side initiation have been conducted.

It was recorded evident increase (+10%) of fragment's velocity for A-IX-2 at 2-sided initiation as regards to 1-sided initiation and inverse effect (-15%) for Okfol-3,5. Similar result observed by BW pressures measurements. The growth of BW pressures for A-IX-2 from +10% to 25% at all bases.

At two-sided initiation DP velocities in the air increases and more favorable conditions for Al-containing DP afterburning arise. The conditions of Okfol's DP afterburning also improve at 2-sided initiation. That appears in increase (+24%) of BW pressure on last base of measurements. But BW pressures on short bases and fragment's velocity essentially decrease.

At 2-sided initiation rarefaction wave arises earlier and DP-cover energy change complete by less DP expansion degree. That is less part of explosion energy will be transformed in explosion job, particularly in cover kinetic energy. DP afterburning energy for Okfol-3,5 in mjest of experiments doesn't compensate gas-dynamic waste but for A-IX-2 gives positive effect.

Thus experiments showed essential “afterburning effect” influence on fugacity and fragmentation action of the models.

#### References

1. Davydov V. Y., Goubin A. S., Zagryadtskiy F. S., Potapov I. V. // Proceedings of Conf. SWCM, Kiev, Ukraine, 16–21 Sept. 2012, pp. 334–338.

2-48

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Т. Л. Празян

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

E-mail: Prazyan.tigran@yandex.ru

В последние годы значительное внимание уделялось нитроароматическим и циклическим нитраминовым соединениям, таким как  $C_3N_6O_6H_6$  (RDX),  $C_5N_4O_{12}H_8$

(PETN),  $C_6N_6O_6H_6$  (TATB),  $C_6N_3O_6H_3$  (TNB). Для поиска новых кандидатов в высокоэнергетические материалы очень важно предсказывать свойства и характеристики предлагаемых структур перед их экспериментальной проработкой, поскольку она связана с определенной опасностью и риском. Вычислительный дизайн материала посредством молекулярного моделирования является надежным путем исследования новых высокомолекулярных энергетических материалов, таких как  $SiC_4N_4O_{12}H_8$  (Si-PETN),  $C_3N_6O_6$  (TNTA),  $C_2N_5O_2H_3$ ,  $C_3N_5O_4H_3$  с их высокой теплотой образования, благоприятной динамикой детонации, хорошей термической стабильностью, и нечувствительностью к воздействию удара.

Факторами, определяющими производительность детонации, являются скорость детонации и детонационное давление, которые в свою очередь определяются через среднюю молекулярную массу, теплоту реакции и плотность взрывчатого вещества. Факторы чувствительности это и электронная ширина запрещенной зоны, молекулярная электроотрицательность, R-NO<sub>2</sub> длина связи, энергия диссоциации связи, количество энергии на единицу объема, малликиеновские заряды нитрогрупп, кислородный баланс и т. д.

Для исследования данных соединений использовался пакет CRYSTAL09 с гибридным функционалом B3LYP и базисом: C\_6-21G\*, H\_3-1p1G, N\_6-31d1G, O\_6-31d1. Рассчитанные параметры производительности детонации, а также факторы чувствительности находятся в удовлетворительном согласии с имеющимися экспериментальными данными для классических взрывчатых веществ RDX, PETN, TATB.

Показано, что корреляционная зависимость между рассчитанными химической энергии детонации, скоростью детонации, детонационным давлением, средней молекулярной массой, числом молей газообразных продуктов детонации на грамм взрывчатого вещества, кислородным балансом, чувствительностью к удару, длинами связей R-NO<sub>2</sub>, электростатических потенциалов, шириной между верхней занятой молекулярной орбиталью и самой нижней незанятой молекулярной орбиталью, а также новым фактором чувствительности – заселенность перекрывания связей P (R-NO<sub>2</sub>) для всех соединений имеет весьма сложный вид, отличающийся от простой линейной зависимости.

## COMPUTER MODELLING OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF ENERGETIC MATERIALS

T. L. Prazyan

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: Prazyan.tigran@yandex.ru

In recent years, a considerable attention to the nitroaromatic and cyclical nitroamine compounds, such as  $C_3N_6O_6H_6$  (RDX),  $C_5N_4O_{12}H_8$  (PETN),  $C_6N_6O_6H_6$  (TATB),  $C_6N_3O_6H_3$  (TNB), has been paid. Before searching new candidates for high-energy materials, it is important to predict the properties and characteristics of the proposed structures, before the pilot study, because it is associated with a specific hazard and risk. Computational design of the

material by means of molecular modelling is a safe way of studying new high-molecular energy materials, such as  $SiC_4N_4O_{12}H_8$  (Si-PETN),  $C_3N_6O_6$  (TNTA),  $C_2N_5O_2H_3$ ,  $C_3N_5O_4H_3$  with their high heat of formation, favourable dynamics of detonation, good thermal stability, and non-sensitivity to the shock impact.

The factors which determine the performance of the detonation are the velocity and the pressure of detonation, which in their turn are determined through average molecular weight, heat of reaction and the density of the explosive. The factors of sensitivity are the width of the band gap, molecular electronegativity, R-NO<sub>2</sub> bond length, dissociation energy of connection, the amount of energy per unit of volume, Mulliken charges of nitrogroups, oxygen balance, etc.

To search the given structures the package of CRYSTAL09, a hybrid functional B3LYP and basis: C\_6-21G\*, H\_3-1p1G, N\_6-31d1G, O\_6-31d1 was used. The calculated performance parameters of detonation, as well as sensitivity factors, are in satisfactory agreement with the available experimental data for such classic explosives as RDX, PETN, TATB.

It is demonstrated that the correlation between the calculated chemical energy of detonation, velocity of detonation, detonation pressure, average molecular weight, quantity of moles of gaseous detonation products per gram of explosive, oxygen balance, sensitivity to shock, R-NO<sub>2</sub> bond lengths, electric potential, width between the upper occupied molecular orbit and the lowest unoccupied molecular orbit, as well as a new factor sensitivity-density overlapping bonds P(R-NO<sub>2</sub>) for all structures is a very sophisticated form, that is different from a simple linear dependence.

2-49

## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПЛОТНЫХ ГАЗОВ С УЧЕТОМ РАВНОВЕСНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Э. Р. Прууэл<sup>1,3</sup>, К. А. Тен<sup>1,3</sup>, В. М. Титов<sup>1,3</sup>,

А. О. Кашкаров<sup>1,3</sup>, Л. А. Мержиевский<sup>1,3</sup>,

А. К. Музыря<sup>2</sup>, Е. Б. Смирнов<sup>2</sup>, К. М. Просвирин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

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

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

При решении задач использования энергии взрыва конденсированных взрывчатых веществ регулярно возникает проблема детального предсказания и оптимизации химического состава и термодинамических параметров газообразных продуктов взрыва. Разработанные за последние десятилетия термодинамические подходы и статистические методы, в связке с современными вычислительными возможностями, позволяют проводить такие расчеты.

Приводится описание алгоритма и программного комплекса (<http://ancient.hydro.nsc.ru/chem>) позволяющего вычислять равновесные термодинамические

параметры как разреженных, так и плотных смесей химически реагирующих газов с плотностями до 3 г/см<sup>3</sup> и температурами от 200 до 5000 К.

Для учета межмолекулярного взаимодействия использовались статистические методы Монте-Карло и парный потенциал Леннарда-Джонса. Для расчета сложной зависимости теплоемкости от температуры применялись статистические суммы внутренних степеней свободы молекул, зависимости которых от температуры определены для разреженных газов и загабугориванные для широкого круга веществ.

Список рассматриваемых химических соединений газов определялся из условий значимости их вклада в продукты взрыва: N<sub>2</sub>, N, O<sub>2</sub>, O, H<sub>2</sub>, H, H<sub>2</sub>O, OH, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>. Дополнительно введен оценочный учет формирования конденсированной фазы углерода.

Алгоритм позволяет определять равновесный химический состав, термодинамические характеристики смеси и параметры некоторых газодинамических течений: ударные и детонационные волны, волны разрежения.

Калибровка уравнений состояния проводилась как по ударно-волновым и детонационным данным опубликованным в литературе, так и по данным скоростной рентгеновской томографии плотности расширяющихся продуктов детонации цилиндрических зарядов. Для последнего подхода использовалось оборудование Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения.

#### EQUATION OF STATE OF DENSE GASES WITH REGARD TO EQUILIBRIUM CHEMICAL COMPOSITION

E. R. Prueel<sup>1,3</sup>, K. A. Ten<sup>1,3</sup>, V. M. Titov<sup>1,3</sup>,  
A. O. Kashkarov<sup>1,3</sup>, L. A. Merzhievsky<sup>1,3</sup>, A. K. Muzyrga<sup>2</sup>,  
E. B. Smirnov<sup>2</sup>, K. M. Prosvirin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, RAS Siberian Branch,  
Novosibirsk, Russia

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

<sup>3</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

When solving the problems of application of condensed HE explosion energy, we regularly face the challenge of detailed prediction and improvement of both chemical composition and thermodynamic parameters of gaseous explosion products. For the past decades, thermodynamic principles and statistical methods were developed; being combined with up-to-date computational capabilities, they allow us to perform computations of this kind.

Paper describes algorithm and software complex (<http://ancient.hydro.nsc.ru/chem>) that provide the way to compute equilibrium thermodynamic parameters of both rarefied and dense mixtures of chemically reactive gases with densities up to 3 g/cm<sup>3</sup> and temperatures from 200 K to 5000 K.

Intermolecular interaction was taken into account by applying statistical Monte-Carlo methods and Lennard-Jones pair potential. In order to calculate complex 'heat capacity-temperature' dependence, we used statistical sums of internal degrees of molecular freedom, whose temperature de-

pendences were determined for rarefied gases and tabulated for a wide range of substances.

Chemical compounds of gases were ranged according to probability of their detection in explosion products: N<sub>2</sub>, N, O<sub>2</sub>, O, H<sub>2</sub>, H, H<sub>2</sub>O, OH, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>. We also performed estimative analysis of how condensed phase of carbon is formed.

Our algorithm allows us to determine equilibrium chemical composition, thermodynamic characteristics of mixture, and parameters of some gas-dynamic processes, namely shock waves, detonation waves, and rarefaction waves.

Equations of state were calibrated using shock-wave and detonation data published in literature, as well as the rapid-series X-ray tomography data on the density of expanding cylindrical-charge detonation products. The latter were obtained using equipment from Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center.

2-50

#### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФРОНТА ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В НИТЕВИДНЫХ ОБРАЗЦАХ АТМ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИМПУЛЬСНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА

Р. Г. Ахметшин, А. В. Разин, В. П. Ципилев

Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: a.v.razin@mail.ru

Впервые скорость распространения фронта взрывного разложения была измерена в работе [1], при иницировании нитевидного кристалла азида серебра первой гармоникой излучения YAG: Nd-лазера (1064 нм, 10 нс). Значение средней скорости составило 1,5 км/с, что значительно меньше скорости развитой детонации, но значительно больше расчетной скорости стационарного горения. Объяснение этому явлению дано в [1] на основе цепного (электрон-дырочного) механизма развития и распространения взрывного разложения АТМ.

В работе [2] исследовано распространение взрывного разложения в нитевидных образцах кристаллов и прессованных порошков азида серебра и азид свинца на той же длине волны лазерного излучения (1064 нм, 10 нс). Обнаружено, что средняя скорость распространения в нитевидных кристаллах составляет 1,54 км/с. При этом скорость распространения на разных участках по длине кристалла крайне не стационарна и может отличаться от средней в 2 раз. Однако в прессованных образцах различной плотности средняя скорость составила от 4 до 4,5 км/с. Кроме того отклонение скорости на локальных участках не превышало 10–12% от средней, стабильна и амплитуда свечения. Такие различия в поведении кристаллов и порошков не могут быть объяснены с позиций [1].

Для выявления этого вопроса проведены измерения характеристик взрывного разложения (порог иницирования, индукционный период, скорость фронта разложения, интенсивность свечения в зоне воздействия и на фронте распространения) при лазерном импульсном



(10 нс) воздействию излучением четвертой и первой гармоники, а также импульсным излучением CO<sub>2</sub>-лазера. Показано, что для всех видов воздействия области собственного, примесного и фононного поглощения, основные характеристики разложения не зависят от метода инициирования, а скорость разложения составляет 1,5±1 км/с для кристаллов и 4,5±0,5 для прессованных порошков нитевидной формы.

Это указывает на единую природу процесса взрывного разложения, как в области инициирования, так и за ее пределами, т. е. в области распространения фронта разложения. Утверждается, что наиболее вероятной природой процессов взрывного разложения нитевидных образцов является тепловая, а распространение фронта разложения является детонационным.

### Литература

1. Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Кречетов А. Г., Митрофанов А. Ю. Распространение цепной реакции взрывного разложения в кристаллах азидов серебра // Физика горения и взрыва – 2003 – Т. 39, № 6 – с.104–106.
2. Скрипин А. С., Ципилев В. П. Кинетические характеристики процесса взрывного разложения азидов тяжелых металлов при лазерном импульсном возбуждении // Известия вузов. Физика. – 2009 – Т. 52, № 8/2 – с.316–319.

### PROPAGATION OF EXPLOSIVE DECOMPOSITION FRONT IN FILAMENTARY ANM SAMPLES AT LASER PULSE INITIATION IN VARIOUS SPECTRAL REGIONS

R. G. Akhmetshin, A. V. Razin, V. P. Tsipilev

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

E-mail: a.v.razin@mail.ru

The velocity of the propagation of explosive decomposition front was originally measured in [1] at the excitation of threadlike crystal of silver azide by the first harmonics of YAG:Nd laser radiation (1064 nm, 10 ns). The average velocity of decomposition comprised 1.5 km/s which is sufficiently slower than detonation velocity. However, this value is greater than that for stationary combustion. The explanation of that phenomenon was given in [1] within the limits of chain (electron-and-hole) mechanism of progress and propagation of explosive decomposition of heavy metal azides.

In [2] explosive decomposition propagation was studied in threadlike crystals and threadlike pressed powders at pulsed laser action (1064 nm, 10 ns; i. e. laser parameters were the same as those in [1]). It was found that average velocity comprised 1.54 km/s. In addition, it was learned that decomposition velocity is unstable and can be varied for 2 times. However, pressed powders demonstrate stable average velocity of 4–4.5 km/s with instability about 10–12%. The difference in decomposition velocity values of crystals and powders cannot be explained within the limits [1].

To clarify the reason for this difference the measurements of explosive decomposition characteristics (explosion initiation threshold, decomposition front velocity, glow intensity from the irradiated area and beyond it) at pulsed laser action (10 ns) on the first and fourth harmonics of YAG:Nd laser and first harmonics of CO<sub>2</sub> laser. It was demonstrated that decomposition velocities are not affected

by excitation wavelength and comprised 1.5±1 km/s and 4.5±0.5 km/s for threadlike crystals and threadlike pressed powders, respectively.

The results indicate that nature of decomposition process is common for initiation and decomposition front propagation. It is to be proposed that nature of those processes based on heat generation and transport and the decomposition front propagation is detonative.

### References

1. B. Aduiev, E. Aluker et al. The propagation of the chain explosive decomposition reaction in silver azide crystals; Combustion, Explosion and Shock Waves, 2003, vol. 39, no. 6, p. 701
2. A. Skripin, V. Tsipilev. Kinetic characteristics of explosive decomposition process of heavy metal azides at laser pulsed initiation; Russian Physics Journal, 2009, vol. 52, no. 8/2, p. 316

2-51

### ИНИЦИИРОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ (ОБЗОР И НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ)

Г. Г. Савенков<sup>1</sup>, В. А. Морозов<sup>2</sup>, А. А. Лукин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru; Viktor.Morozov@math.spbu.ru

Приводятся обзор и анализ результатов по инициированию взрывчатых превращений (большинство авторов интерпретируют их как «инициирование детонации») как в инициирующих взрывчатых веществах (ИВВ), так и в самом чувствительном бризантном взрывчатом веществе – тетранитропентаэритрите (ТЭНе) с помощью сильноточного электронного пучка (СЭП) (средняя энергия электронов не более 0,25 МэВ, длительность импульса тока 20–50 нс, удельная энергия 10–15 Дж/см<sup>2</sup>).

Анализ результатов экспериментальных работ позволяет сделать вывод о том, что в большинстве случаев (исключение составляет 1–2 работы) одним из основных (если не самым основным) действующим фактором на инициируемые ВВ является металлическая плазма (так называемый катодный факел (КФ)), которая генерируется с катода вслед за пучком электронов. На это указывают расстояние между катодом и образцом, скорость катодного факела и время задержки взрывчатого превращения, а также результаты по инициированию зарядов ИВВ автоэмиссионным электронным пучком.

Исследовано инициирование с помощью СЭП наносекундной длительности (~50 нс, 0,18–0,3 МэВ, 10–20 Дж/см<sup>2</sup>) ряд зарядов из энергонасыщенных материалов (ЭНМ) (ранее никогда применяемые в экспериментах) на основе пикрата калия, свинцового сурика, нитрата калия, смеси нитроглицерина с нитроцеллюлозой, перхлората аммония, смеси перхлората калия и с порошками алюминия и магния микронного размера.

Температура воспламенения указанных ЭНМ лежала от 175 °С (для смеси нитроглицерина) до 340 °С (для материала на основе пикрата калия). Толщина образцов ЭНМ – 2 мм, диаметр – 16 мм. Образцы были запрессованы в стальные обоймы диаметром 30 мм. Плотность запрессовки составляла  $\sim(0,6-0,8)$  от теоретической плотности ЭНМ.

Инициировать взрывчатые превращения как с помощью чистого СЭП, так и в совокупности с КФ удалось только в ЭНМ на основе свинцового сурика (температура воспламенения 180 °С). Все другие заряды ЭНМ (включая легковоспламеняемую смесь нитроглицерина с нитроцеллюлозой) инициировать не удалось. В них наблюдались, в основном, каверны различного диаметра, глубина которых в большинстве случаев не превышала 1 мм. И только для ЭНМ на основе пикрата калия при совокупном действии СЭП и КФ наблюдалось неустойчивое горение.

Анализ полученных результатов показал, что физико-химико-кинетическая теория процесса возбуждения взрывчатых превращений при помощи СЭП (в том числе и в совокупности с КФ) чрезвычайно сложна и не поддается однозначному толкованию. Очевидно, речь может идти о различных классах ЭНМ, для каждого из которых существуют свои предельные условия инициирования таким видом воздействия.

#### INITIATION OF EXPLOSIVE TRANSFORMATIONS IN ENERGY SATURATED MATERIALS BY HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM OF NANOSECOND DURATION (REVIEW AND NEW RESULTS)

G. G. Savenkov<sup>1</sup>, V. A. Morozov<sup>2</sup>, A. A. Lukin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Spetsial'noye konstruktorsko-tekhnologicheskoye byuro «Tekhnolog», Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: sav-georgij@yandex.ru; Viktor.Morozov@math.spbu.ru

Overview and analysis of the results to initiate explosive reactions (most authors interpret them as «detonation initiation») in initiating explosives (IE), and in the most sensitive brisant high explosive – tetranitropentaeritrite (PETN) using a high-current electron beam (HEB) (average electron energy of 0.25 MeV, current pulse duration of 20–50 ns, energy density of 10–15 J/cm<sup>2</sup>) were given.

Analysis of the experimental results leads to the conclusion that in most cases (except for 1–2 work ) one of the main (if not the main ) factor acting on the explosive is initiated by metal plasma (the so-called cathode flare (CF)), which is generated at the cathode after electron beam. This is indicated by the distance between the cathode and the sample rate of the cathode torch and the delay time of explosive transformation, and the results to initiate charges IE field emission electron beam.

Initiation using HEB of nanosecond duration ( $\sim 50$  ns, 0.18–0.3 MeV, 10–20 J/cm<sup>2</sup>) for number of energy saturated materials (ESM) ( never before used in these experiments ) based on potassium picrate, lead oxide, potassium nitrate, mixtures of nitroglycerin with nitrocellulose, ammonium perchlorate, potassium perchlorate and a mixture of powders of aluminum and magnesium micron size was

investigated. Flashpoint these ESM lying on 175 °C (for a mixture of nitroglycerin) to 340 °C (for the material on the basis of potassium picrate). Specimen thickness ESM – 2 mm diameter – 16 mm. Samples were pressed into the steel ferrule 30 mm. Joining density was  $\sim(0.6-0.8)$  of the theoretical density of ESM.

Initiate explosive transformation as using pure HEB, and in conjunction with CF was only possible at the ESM based on red lead (ignition temperature of 180 °C). All other charges ESM (including Highly flammable mixture of nitrocellulose with nitroglycerin) were not initiated. Only mainly cavities of different diameters, the depth of which in most cases does not exceed 1 mm were observed. And just for the ESM based on potassium picrate in total action HEB and CF unstable burning was observed.

Analysis of the results showed that the physical-chemical-kinetic theory of the initiation of explosive transformations using HEB (including in conjunction with CF) is extremely complex and can not be unambiguous interpreted. Obviously, we can talk about the different classes of ESM, each of which has its own limiting conditions initiate such kind of exposure.

2-52

#### МИКРОСЕКУНДНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ И РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ЭНЕРГОЕМКИХ СИСТЕМ

Д. Н. Садовничий<sup>1</sup>, Ю. М. Милёхин<sup>1</sup>, С. А. Лопаткин<sup>2</sup>,  
Д. В. Жгун<sup>2</sup>, С. А. Малинин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз»»,  
Дзержинский Московской обл., Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: fcdt@monnet.ru; tpu@tpu.ru

Импульсный электрический пробой, реализуемый в объеме энергоемких полимерных материалов (ЭПМ), имеет особенности, отличающее его от пробоя в не-энергоемких аналогах [1, 2]. Целью настоящей работы было экспериментальное изучение особенностей импульсного электрического пробоя с длительностью фронта 1–26 мкс, развиваемого в объеме ЭПМ, содержащих в своем составе алюминиевый порошок, до 70% масс. взрывчатые вещества (нитроглицерин, циклотетраметилтетранитрамин) или окислитель – перхлорат аммония.

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 толщиной 3–5,6 мм, что приближается к их критическому диаметру детонации.

Показано, что ЭПМ, наполненные дисперсными компонентами, обладают меньшей электрической прочностью, по сравнению с ненаполненной энергоемкой полимерной основой. Наибольшее снижение электрической прочности наблюдается при введении в систему перхлората аммония. Пробой ЭПМ происходит при напряженности поля, близкой к пробую воздуха

в однородном электрическом поле. Пробой образцов сопровождался сильными механическими разрушениями с формированием сквозного отверстия и радиально ориентированных трещин. До максимальной мощности в разряде 30 МВт воспламенение или взрыв образцов ЭПМ отсутствовали. Обсуждаются закономерности развития импульсного электрического пробоя в полимерных энергоемких материалах, содержащих мощные взрывчатые вещества.

### Литература

1. Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Лопаткин С. А. и др. // Физика горения и взрыва. 2010. № 4. С. 107.
2. Sadovnichii D. N., Milekhin Yu. M., Lopatkin S. A. et al. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 11/3. С. 183.

### MICROSECOND ELECTRICAL BREAKDOWN AND DESTRUCTION OF POLYMERIC ENERGY-INTENSIVE SYSTEMS

D. N. Sadovnichii<sup>1</sup>, Yu. M. Milekhin<sup>1</sup>, S. A. Lopatkin<sup>2</sup>,  
D. V. Zhgun<sup>2</sup>, S. A. Malinin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Soyuz Federal Center of Dual-Use Technologies, Dzerzhinskii, Russia

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

E-mail: fcdt@monnet.ru; tpu@tpu.ru

Submicrosecond electric breakdown realized in the energy-intensive polymeric materials (EPM) volume has peculiarities distinguishing it from the breakdown in non energy-intensive analogs [1, 2]. The purpose of the present work is experimental study of impulse electrical breakdown features with a pulse of 1–26 microseconds, developing in the EPM volume containing aluminum powder up to 70% mass of explosives (nitroglycerine, cyclotetramethylenetetranitramine), or the oxidizer – ammonium perchlorate.

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 3–5.6 mm thick, which approaches their critical detonation diameter, were studied.

It was shown that EPM filled with dispersed components have lesser electric strength in comparison to unfilled energy-intensive polymeric base. Maximum decrease of electric strength is observed at addition of ammonium perchlorate into the system. A breakdown of EPM occurs at field intensity close to air breakdown in the homogeneous electric field. The breakdown of the samples was accompanied with heavy mechanical destruction with formation of a through hole and radial-oriented cracks. Up to a maximum discharge power of ~30 megawatt there was no EPM samples ignition or explosion. Patterns of development of pulsed electric breakdown in the energy-intensive polymeric materials containing high capacity explosives.

### References

1. Sadovnichii D. N., Milekhin Yu. M., Lopatkin S. A. et al. // Combustion, Explosions and Shock Waves. 2010. N 4. P. 464.
2. Sadovnichii D. N., Milekhin Yu. M., Lopatkin S. A. et al. // Izvestiya VUZ'ov. Fizika. 2012. T. 55. № 11/3. С. 183.

2-53

### ИНИЦИИРОВАНИЕ РЯДА ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ НЕБОЛЬШИМИ ЗАРЯДАМИ ПВВ-85

Е. И. Ермолович, Ю. Г. Печенев, В. Г. Кожевников,  
А. Н. Михайлюкова, А. Б. Севастьянов, Ф. Т. Хворов

Государственный научно-исследовательский институт  
«Кристалл», Дзержинск, Нижегородская обл., Россия

Приведены результаты экспериментального исследования инициирования тротила (1,56 г/см<sup>3</sup>), флегматизированного гексогена (1,67 г/см<sup>3</sup>) и флегматизированного октогена (1,78 г/см<sup>3</sup>) зарядами ПВВ-85 (1,53 г/см<sup>3</sup>) массой 0,01–0,03 г. Инициирование ВС проводили для двух вариантов размещения заряда ПВВ-85. В первом варианте заряд ПВВ-85 был открытым, а во втором – находился в толстой стальной обойме. Проведено численное моделирование экспериментов. Анализ проводился с использованием интегрального критерия инициирования. Предложенный интегральный критерий инициирования является обобщением критерия инициирования [1], поскольку учитывает изменение давления как во времени, так и пространстве.

### Литература

1. F. E. Walker, R. J. Wasley. Critical Energy for Shock Initiation of Heterogeneous Explosives // Explosivestoffe. 1969. Vol. 1. pp. 9–16.

### INITIATION OF EXPLOSIVE COMPOSITIONS USING SMALL CHARGES OF PVV-85

Е. И. Ермолович, Ю. Г. Печенев, В. Г. Кожевников,  
А. Н. Михайлюкова, А. Б. Севастьянов, Ф. Т. Хворов

JSC “GosNII “Kristall”, Dzerzhinsk, Nizhegorodskaya oblast,  
Russia

The paper presents the results of experimental investigation on initiation of trotyl (1.56 g/cm<sup>3</sup>), phlegmatized hexogen (1.67 g/cm<sup>3</sup>) and phlegmatized octogen (1.78 g/cm<sup>3</sup>) using plastic explosive composition PVV-85 (1.53 g/cm<sup>3</sup>) charges (0.01–0.03 g weight). Initiation of explosive compositions was carried out with two versions of PVV-85 charge placement. In the first version a charge of PVV-85 was open and in the second version it was in thick steel casing. The experiments were numerically simulated. The assay was carried out using integral criterion of initiation. Suggested integral criterion of initiation was a generalization of the initiation criterion [1], because it considered pressure changes both in time and in space.

### Reference

1. F. E. Walker, R. J. Wasley. Critical Energy for Shock Initiation of Heterogeneous Explosives // Explosivestoffe. 1969. Vol. 1. pp. 9–16.

2-54

### КРИТЕРИЙ НАЧАЛА ВЗРЫВА ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ВЗРЫВЧАТЫЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА

С. Ю. Седов, М. Н. Мицура

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

Низкоскоростной режим взрывчатого превращения (НСР ВП) реализуется при скоростях ударников порядка 10–100 м/с. Задача о формулировке критериев начала НСР ВП, которые можно использовать в численных методиках при расчетах конструкций, содержащих взрывчатые вещества (ВВ), является в настоящее время весьма актуальной с точки зрения обеспечения безопасности обращения с этими конструкциями.

Один из таких критериев описан в данном докладе. Приведены примеры расчетов с использованием критерия НСР ВП.

Сущность предлагаемого подхода для описания НСР ВП состоит в следующем.

1. Проводятся расчеты максимального значения критерия, в зависимости от времени, в представительном наборе тестовых экспериментов. Подбирается единое для всех тестов пороговое значение критерия.
2. Проводятся расчеты какой-либо конструкции с использованием критерия. На основе расчетов и известного порогового значения критерия делается предсказание о возможности взрывобезопасной ситуации.

В качестве набора тестовых экспериментов рассматривались:

- 1) соударение стального шарика с образцом ВВ в виде цилиндра;
- 2) соударение стального цилиндра с образцом ВВ в виде полусферы.

В расчетах использовалась реологическая вязкоупругая модель среды [1]. Это позволило при определении критерия корректно учесть работу диссипативных сил, обусловленную как вязкостью среды, так и разрушениями.

#### Литература

1. T. N. Dey and J. R. Camm. Numerical modeling of shear formation in PBX-9501 // XI International symposium on Detonation, P. 725–734, 1998.

### CRITERION OF DETONATION INITIATION UNDER LOW-VELOCITY IMPACT ON OCTOGEN-BASED EXPLOSIVE COMPOUNDS

S. Yu. Sedov, M. N. Mitsura

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

The low-velocity explosive transformation regime (XDT) is implemented at about 10–100 m/s velocities of impactors. Currently, it is an urgent problem, from the standpoint of operation safety, to formulate XDT initiation criteria that could be used in numerical codes to simulate configurations with high explosives (HE).

The paper describes one of such criteria and gives examples of simulations with this XDT criterion.

The idea of the proposed approach to describing the low-velocity explosive transformation is as follows:

1. The criterion maxima depending on time are calculated using a representative set of tests. Then, a threshold, which is the single one for all tests, is selected.
2. Simulations using this criterion are carried out for some configuration and predictions concerning a possibility of explosive situation are made basing on the results of these simulations and the known limit value of criterion.

The test problem set included:

- 1) the problem of impacting a steel-made sphere with a HE sample in the form of a cylinder;
- 2) the problem of impacting a steel-made cylinder with a HE sample in the form of a hemisphere.

The rheological viscoelastic model of medium [1] was used for simulations. It allows properly accounting for dissipative forces due to viscosity of medium and material fractures in order when determining the criterion.

#### References

1. T. N. Dey and J. R. Camm. Numerical modeling of shear formation in PBX-9501 // XI International symposium on Detonation, P. 725–734, 1998.

2-55

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. В. Сильвестров, С. А. Бордзиловский,  
С. М. Караханов, А. В. Пластинин

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

E-mail: silver@hydro.nsc.ru

Предлагается иной взгляд на структуру сигнала светимости фронта детонации, и приведены результаты измерения яркостной температуры детонации эмульсионных ВВ (ЭмВВ) со стеклянными микробаллонами в качестве сенсibilизатора. Использовались методика «оптического окна» из плексигласа и высокоскоростной оптический пирометр. Начальная плотность и скорость детонации ЭмВВ изменялись в широких пределах введением низкоплотного сенсibilизатора от 1 до 50 массовых% сверх массы эмульсии.

Временной профиль интенсивности свечения для ЭмВВ типичен для гетерогенных ВВ. На основе результатов специальных экспериментов с монослоем искусственных пор было предположено, что регистрируемый сигнал является суперпозицией двух профилей. Первый профиль, температурный «всплеск», обусловлен формированием слоя «горячих точек» за фронтом ударной волны, ведущей детонацию. Второй профиль связан с увеличением температуры продуктов детонации в зоне реакции в соответствии с ЗНД-теорией. Эта температура достигает максимума вблизи конца зоны реакции. Таким образом, температуру детонации следует оценивать по амплитуде точки, лежащей на «хвосте»

те» сигнала, на удалении от фронта сигнала светимости, близком ко времени реакции.

Доказательство утверждения получено при сопоставлении временных профилей температуры, давления и массовой скорости за фронтом детонации, которые были получены на поверхности раздела ЭМВВ/окно при помощи оптического пирометра, датчика давления и интерферометра Visar. Анализ этих профилей позволяет фиксировать точку, в которой и следует измерять температуру детонации.

Согласно экспериментальным результатам, температура детонации эмульсионных композиций примерно в два раза ниже температур, характерных для традиционных ВВ. При детонационных давлениях от 0,7 до 11,0 ГПа наблюдается немонотонная зависимость температуры детонации ЭМВВ от давления детонации. В максимуме температура достигает 2200–2260 К при давлении 6–8 ГПа. Наблюдается качественное и количественное соответствие опытных данных и результатов расчета японских авторов (Yoshida et al., 1985): при увеличении давления детонации до 11 ГПа температура уменьшается до 1840 К и остается на уровне 1900 К в соответствии с расчетом при уменьшении давления до 0,7 ГПа.

Температура детонации эмульсионного ВВ измерена впервые.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-08-00092-а и Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-2695.2014.1.

#### DETONATION TEMPERATURE MEASUREMENT OF EMULSION EXPLOSIVES

V. V. Silvestrov, S. A. Bordzilovskii, S. M. Karakhanov, and A. V. Plastinin

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

E-mail: silver@hydro.nsc.ru

The other view on the structure of the radiance signal of the detonation front and experimental results of brightness detonation temperature measuring of emulsion explosives (EMX) with glass microballoons as sensitizer are presented. The Plexiglas «optical window» technique and the high-speed optical pyrometer are used. The initial density and detonation velocity of emulsion explosives are varied in the wide range by adding of low-density sensitizer from 1 up to 50 wt. % over weight of emulsion.

The brightness intensity profile for EMX is typical for heterogeneous high explosives. Based on the results of special experiments performed with a monolayer of artificial pores it was supposed that the recorded signal is the superposition of two profiles. The first one is the temperature spike that appears due to formation of «hot spots» layer behind the shock leading the detonation. The second profile is concerned with the increase of detonation product's temperature in the reaction zone in compliance with ZND theory. This temperature achieves maximum near the reaction zone end. Hence it is necessary to calculate the detonation temperature on the trailing edge of signal, using the point on the radiance signal at the end of reaction zone.

The proof of this statement is obtained by comparison of the profiles of temperature, pressure and particle velocity behind the detonation front that are obtained at EMX/window interface using optical pyrometer, pressure gage, and VISAR interferometer. The analysis of these profiles allows to fix the point for estimation of the detonation temperature.

Experimental results show that EMX's detonation temperatures are about two times lower than detonation temperature of the ordinary explosives. At detonation pressures from 0.7 up to 11.0 GPa the non-monotonous behavior of the EMX's detonation temperature versus detonation pressure is observed. Maximum temperature is about 2200–2260 K at pressure of 6–8 GPa. The qualitative and quantitative correspondence of test data and calculation results of Japanese authors (Yoshida et al., 1985) is observed. The decrease temperature to 1840 K is registered at increase of detonation pressure up to 11 GPa, and remains at 1900 K level in accordance with the calculations at pressure decrease to 0.7 GPa.

The detonation temperature of the emulsion explosive is measured for the first time.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 12-08-00092-a), and the President of the Russian Federation for State Support of Leading Scientific Schools (grant NSH-2695.2014.1).

---

2-56

#### МОДЕЛЬ ДЕТОНАЦИИ НЕИДЕАЛЬНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

Е. Б. Смирнов, О. В. Костицын,  
К. М. Мирошкин, А. Н. Киселёв

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

E-mail: ewgeny\_smirnov@mail.ru

Теория идеальной детонации Зельдовича-Неймана-Деринга удовлетворительно описывает детонацию зарядов, диаметр которых близок к предельному. При меньших диаметрах скорость детонации может существенно отличаться от идеального значения, ожидаемого на основании равновесной химической термодинамики. Это отличие в значительной степени проявляется для неидеальных взрывчатых веществ и может достигать в отдельных случаях до 1/3 от скорости идеальной детонации. Численное моделирование таких систем является весьма трудоемким поскольку требуется расчет состояний внутри зоны химической реакции, а также требуется информация о уравнении состояния смеси (ВВ и ПВ) и скорости химической реакции, которые на сегодняшний день плохо изучены. Для практических целей может использоваться модель «Динамики Детонационного Фронта» (Detonation Shock Dynamics), базирующаяся на взаимосвязи локальной скорости фронта с локальной кривизной детонационного фронта. Данная взаимосвязь зависит и от уравнения состояния смеси ПВ и от скорости реакции, однако не требуется явного задания этих характеристик.

В данной работе проведен анализ результатов экспериментов демонстрирующих взаимосвязь локальной кривизны фронта детонационной волны с величиной скорости детонации данного участка фронта. Получено уравнение для формы фронта детонационной волны позволяющее интегрированием обычного дифференциального уравнения для формы фронта с граничным условием в виде угла  $\theta$  на границе заряда предсказывать скорость детонации и форму фронта детонационной волны в произвольной геометрии. Приведенные результаты являются основанием для применимости модели «Динамики Детонационного Фронта» для описания детонационных процессов в неидеальных ВВ.

#### DETONATION MODEL FOR NON-IDEAL CONDENSED EXPLOSIVES

E. B. Smirnov, O. V. Kostitsyn,  
K. M. Miroshkin, A. N. Kisilyov

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

The Zeldovich-Neumann-Doering theory of ideal detonation can adequately describe the detonation of charges with near-critical diameter. For minor diameters, detonation velocity can differ significantly from an ideal value expected based on equilibrium chemical thermodynamics. This difference is quite evident when using non-ideal explosives; in certain cases, this value can be up to one third of ideal detonation velocity. Numerical simulation of these systems is a very labor-consuming process because one needs to compute the states inside the chemical reaction zone, as well as to obtain data on the equation of state of 'HE-explosion products' mixture and on the rate of chemical reaction; however, these characteristics are poorly studied today. For practical purposes, one can use the Detonation Shock Dynamics model based on interrelation between local velocity of the front and its local curvature. This interrelation depends on both the equation of state of explosion products, and the reaction rate; but the explicit definition of these characteristics is not needed.

In this paper, experimental results are analyzed. They demonstrate interrelation between the local curvature of detonation front and the detonation velocity. Equation of detonation front shape is found. This equation allows us to predict detonation velocity and shape of detonation wave front in arbitrary geometry by integrating ordinary differential equation for the front shape with a boundary condition on  $\theta$  at the charge edge. These results confirm that the model of Detonation Shock Dynamics can be used to describe detonation processes in non-ideal explosives.

2-57

#### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖАЮЩЕГО ИМПУЛЬСА И ПОРИСТОСТИ ВВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕХОДА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДЕТОНАЦИОННУЮ

Е. Б. Смирнов, О. В. Костицын, В. И. Щербаков,  
К. М. Просвирнин, И. А. Ахлюстин

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

E-mail: ewgeny\_smirnov@mail.ru

Наиболее полную информацию о развитии процесса ударно-волнового инициирования детонации взрывчатых веществ традиционно получают регистрацией эволюции волновых профилей давления или массовой скорости. В данной работе регистрация процесса перехода ударной волны в детонационную осуществлялась одновременно при помощи пьезорезистивной и радиоинтерферометрической методик. 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 регистрировалась  $x-t$  диаграмма процесса распространения ударной волны и переход ее в детонационную волну. Нагружение исследуемого ВВ ударными волнами различной интенсивности осуществлялось при помощи взрывного генератора. Используемый генератор позволял получать в исследуемом ВВ ударные волны с амплитудой от 6 до 30 ГПа с различным градиентом давления за фронтом. Изменение параметров нагружающего импульса осуществлялось за счет изменения толщины активного заряда ВВ и толщины преграды из фторопласта или меди. Пористость деталей из исследуемого ВВ варьировалась в диапазоне от 1% до 5%.

Для детального отслеживания траектории перехода ударной волны в детонационную был использован подход, базирующийся на теоретических выкладках расширенной теории динамики детонационного фронта (DSD). Аппроксимация, выполненная на основании данного подхода, соответствуют экспериментальным данным в мельчайших деталях и позволяют расширить область их применения для калибровки численных моделей, а также способствуют изучению физических механизмов инициирования. Прецизионная обработка траекторий перехода ударной волны в детонационную, выполненная в данной работе, позволила проверить справедливость приближения единой кривой (SCI), в соответствии с которым переход инициирующей ударной волны в детонационную осуществляется по единственной для данного ВВ кривой в плоскости  $P_{ВВ}-x_0$  (плоскость Pop-plot) независимо от величины начального давления и профиля инициирующей УВ. Проведенный в данной работе детальный анализ показал, что приближение SCI не выполняется для ВВ исследованного в данной работе.

Детальная обработка траекторий перехода ударной волны в детонационную позволила построить Pop-plot диаграммы для различных пористостей исследуемого

ВВ с физически верными асимптотами. Сверху диаграммы ограничиваются скоростью детонации. Снизу ограничиваются скоростью распространения ударной волны на пределе упругости Гюгоню. Ниже этой величины не может происходить инициирование, поскольку механизм «горячих точек» при более низких скоростях не может реализовываться.

### EFFECT OF LOADING PULSE PARAMETERS AND HE POROSITY ON SHOCK-TO-DETONATION WAVE TRANSITION

E. B. Smirnov, O. V. Kostitsyn, V. I. Scherbakov,  
K. M. Prosvirnin, I. A. Akhlyustin

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

E-mail: ewgeny\_smirnov@mail.ru

Registering evolution of pressure wave profiles or mass velocity traditionally provides the most complete information on the progress of the shockwave initiation of HE detonation. In this work, the piezoresistive and radio-interferometric techniques were simultaneously used to register the shock-to-detonation wave transition. Piezoresistive sensors registered parameters of a shock wave that leaved the test explosive and entered a charge, as well as parameters of the shock/detonation wave leaving this charge. The radio interferometer registered the  $x-t$  diagram of shock wave propagation and transition to detonation. An explosive generator was used to load the test explosive by different-intensity shock waves. This generator allowed shock waves with the 6–30 GPa amplitude and different pressure gradient behind the front to be formed in the test explosive material. A change in the loading pulse parameters was due to changes in the initial explosive charge thickness and also in the thickness of the fluoroplastic or copper barrier. Porosity of the test explosive ranged from 1% up to 5%.

The approach based on theoretical conclusions of the extended detonation-shock-dynamic theory (DSD) was used to thoroughly track the trajectory of the shock-to-detonation wave transition. Approximations based on this approach agree with experimental data in minute particulars and expand the area of their application as to calibrate numerical models and also contribute to the study of initiation physical mechanisms. Precision treatment of the shock-to-detonation wave transition trajectories allowed us to check the validity of the single-curve approximation (SCI) whereby the initiating shock-to-detonation wave transition follows the unambiguous unique single curve for our explosive material in the  $P_{\text{ВВ}}-x_0$  plane (Pop-plot plane) independently of the initial pressure value and the initiating shock-wave profile. The detailed analysis showed that SCI-approximation is not fulfilled for the test explosive material in this work.

Detailed treatment of the shock-to-detonation wave transition trajectories allowed the Pop-plot diagrams to be constructed for different porosities of the test explosive material with physically correct asymptotes. From above, diagrams are limited by the detonation velocity and from below – by the shock wave propagation velocity at the Hugoniot elastic limit below which initiation is impossible as the “hot spots” mechanism is unrealizable at lower velocities.

2-58

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТВЕРДЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВВ

Е. Б. Смирнов<sup>1</sup>, К. А. Тен<sup>2</sup>, Э. Р. Прууэл<sup>2</sup>,  
Б. П. Толочко<sup>3</sup>, М. Р. Шарафутдинов<sup>3</sup>, А. Н. Шмаков<sup>4</sup>,  
А. К. Музыря<sup>1</sup>, О. В. Костицын<sup>1</sup>, А. Н. Кутепова<sup>1</sup>,  
Л. Х. Бадретдинова<sup>5</sup>, К. Э. Купер<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup> Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,  
Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН,  
Новосибирск, Россия

<sup>5</sup> Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, Казань, Россия

<sup>6</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия

Для описания процесса инициирования взрывчатого вещества (ВВ) широко используются феноменологические модели кинетики разложения, базирующиеся на количественной взаимосвязи неоднородностей структуры, и экспериментально определенной чувствительности ВВ к внешним воздействиям. При построении таких моделей предполагается взаимосвязь размера неоднородности, в частности воздушной поры и величины энергии, которую она аккумулирует в себе при сжатии. Построенная в этих предположениях, математическая модель кинетики разложения ВВ чрезвычайно требовательна к фактическим данным о распределении неоднородностей внутри ВВ. Для верификации таких моделей необходима эмпирическая информация как о молекулярной структуре ВВ, так и о гетерогенной структуре заряда ВВ. Последняя, в свою очередь, определяется процессом производства и изменяется при механических и тепловых воздействиях на ВВ. Всю совокупность неоднородностей структуры заряда ВВ можно условно разделить на три класса: внутрикристаллические (1–100 нм), внутригранульные (0,1–100 мкм) и межгранульные (0,1–10 мм). Таким образом, для построения физической модели кинетики разложения ВВ необходима информация о структуре, охватывающая область от молекулярной структуры с характерными размерами на уровне  $10^{-10}$  м до макроструктуры ВВ с характерными размерами  $\sim 10^{-2}$  м.

Исследования структуры зарядов гетерогенных ВВ проводились методом малоуглового рентгеновского рассеяния (SAXS). Размеры структур, зарегистрированные в наших экспериментах, находятся в диапазоне от 1 нм до 10 нм. Структуры в диапазоне размеров от 1 мкм до 10 мм исследовались методом рентгеновской компьютерной микротомографии с использованием синхротронного излучения (XRCT). Для получения количественной информации о распределении неоднородностей из результатов, полученных методами рассеяния на малые и сверхмалые углы, необходима

информация о фактической топологии воздушных включений внутри исследуемого ВВ. С этой целью использовали методы растровой электронной и оптической микроскопий. Применение этих методов позволило определить, в первую очередь, форму, а также размеры неоднородностей в ВВ в диапазоне от 100 нм до 10 мкм.

В ходе исследований получены количественные характеристики морфологии структуры исследуемого гетерогенного ВВ. Полученные данные предназначены для построения математических моделей кинетики разложения конденсированных гетерогенных ВВ.

## STUDYING THE STRUCTURE OF HETEROGENEOUS SOLID EXPLOSIVES

E. B. Smirnov<sup>1</sup>, K. A. Ten<sup>2</sup>, E. R. Prueel<sup>2</sup>,  
B. P. Tolochko<sup>3</sup>, M. R. Sharafutdinov<sup>3</sup>, A. N. Shmakov<sup>4</sup>,  
A. K. Muzyrya<sup>1</sup>, O. V. Kostitsyn<sup>1</sup>, A. N. Kutepova<sup>1</sup>,  
L. Ch. Badretdinova<sup>5</sup>, K. E. Kuper<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, RAS Siberian Branch,  
Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry,  
RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Boreskov Institute of Catalysis, RAS Siberian Branch,  
Novosibirsk, Russia

<sup>5</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan,  
Russia

<sup>6</sup>Budker Institute of Nuclear Physics, RAS Siberian Branch,  
Novosibirsk, Russia

Phenomenological models of decomposition kinetics are widely used to describe the processes of HE initiation. These models are based on the quantitative relation between structural imperfections and experimentally determined HE sensitivity to external factors. When constructing these models, we assume that size of imperfection, namely the air void size, is related to the energy accumulated inside this imperfection under compression. Under these assumptions, mathematical model of HE decomposition kinetics imposes very strict requirements to actual data on distribution of imperfections inside HE. Verification of these models requires empirical data both on molecular structure of explosive, and on heterogeneous structure of HE charge. The latter, in its turn, depends on the manufacturing procedure and changes under the influence of mechanical and thermal factors. All structural imperfections in HE charge can be conditionally divided into three main groups: intracrystalline (1–100 nm), intragranular (0.1–100 μm), and intergranular (0.1–10 mm) imperfections. Thus, construction of physical model of HE decomposition kinetics requires the data on a wide-range of HE structures, i.e. from molecular structure with characteristic sizes of  $\sim 10^{-10}$  m to macrostructure with characteristic sizes of  $\sim 10^{-2}$  m.

The structure of heterogeneous HE charges was studied by small-angle X-ray scattering (SAXS). In our experiment, we registered structures from 1 nm to 10 nm. In the range of 1 μm–10 mm, the structures were studied by X-ray computer tomography (XRCT). Quantitative data on imperfection distribution can be obtained from the results of small-angle

and ultrasmall-angle scattering only if we have information about actual topology of air inclusions in test HE. For this purpose, we used optical microscopy and electronic raster microscopy. First of all, these techniques allowed us to determine the shape of imperfections, as well as their size inside HE in the range of 100 nm...10 μm.

In the course of our study, we obtained quantitative characteristics of morphology of heterogeneous HE structure. These data can be used to construct mathematical models describing kinetics of condensed heterogeneous HE decomposition.

2-59

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ОБОЛОЧКИ НА ВЕЛИЧИНУ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ДЕТОНАЦИИ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ

С. М. Долгих, Е. Б. Смирнов,  
М. А. Соколов, К. М. Просвирнин

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

E-mail: sokolovm1982@mail.ru

Критическая толщина детонации – одна из определяющих характеристик взрывчатых веществ, характеризующая его детонационную способность. Критическая толщина детонации величина не постоянная и зависит от различных факторов, связанных как с технологией изготовления ВВ, так и с условиями применения данного ВВ. Существенное влияние на величину критического сечения детонации оказывает наличие оболочки.

В данной работе исследовалось влияние оболочки и ее динамической жесткости на величину критической толщины детонации, исследовано влияние начальной пористости ВВ на величину критической толщины детонации. Требуемая пористость деталей из ВВ достигалась путем прессования. Для проведения экспериментальных исследований были выбраны следующие материалы: оргстекло, фторопласт, алюминий, бериллий, магний, медь.

Критическая толщина определялась на клиновидных зарядах по методу «поперечного клина». Иницирование клиновидных зарядов из низкочувствительного ВВ производилось плоской детонационной волной вдоль поверхности с переменным сечением.

Регистрация выхода детонационной волны на поверхность, противоположную поверхности иницирования, осуществлялась при помощи фотохронографа с зеркальной разверткой изображения. Локализация свечения детонационной волны при выходе на свободную поверхность осуществлялась при помощи преграды из оргстекла с нанесенными на нее линиями раstra, каждый из которых соотнесен с сечением клиновидного образца из ВВ определенной толщины. Преграда из оргстекла, в данном случае, выполняла роль светового затвора, перекрывая свечение при вхождении в нее ударной волны. Постановка эксперимента позволяла получить значение угла наклона фронта детонационной



волны к контактной границе между исследуемыми ВВ и оболочкой.

Результаты проведенной работы находятся в согласии с данными полученными по методу «продольного клина». В ходе экспериментальных исследований получена зависимость критической толщины детонации от пористости исследуемого низкочувствительного ВВ. Показано влияние динамической жесткости оболочки на величину критической толщины детонации.

### STUDYING THE INFLUENCE OF DYNAMIC RIGIDITY OF SHELL ON LOW-SENSITIVE HE DETONATION

S. M. Dolgikh, E. B. Smirnov,  
M. A. Sokolov, K. M. Prosvirnin

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia  
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia  
E-mail: sokolovm1982@mail.ru

Critical thickness of detonation is one of determinant features characterizing HE detonability. Critical thickness of detonation is not a constant value; it depends on different factors attributed to both technologies of HE manufacturing, and conditions of its application. The presence of shell has a great influence on the value of critical section of detonation.

In this paper, we studied how the presence of shell and the dynamic rigidity of this shell influence the critical thickness of detonation; we also studied the influence of HE initial porosity on this critical thickness of detonation. Required porosity of HE samples was achieved by pressing. The following materials were chosen for our experiment: plexiglas, fluoroplastic, aluminum, beryllium, magnesium, and copper.

Critical thickness was determined using wedge charges by the “cross-wedge” method. Wedge charges made of low-sensitive HE were initiated by a plane detonation wave along the surface having variable cross-section.

Detonation wave arrival onto the surface opposite to the surface of initiation was recorded by streak camera. Light coming from the detonation wave during this wave arrival onto the free surface was localized using plexiglas barrier with special raster lines (each line corresponds to the cross-section of wedge sample having particular thickness). In this case, plexiglas barrier acts as a light shutter that intercepts the light when shock wave enters this barrier. Such experimental setup allowed us to obtain the inclination of detonation wave front to the contact boundary between the test HE and the shell.

Our results are consistent with data obtained by the “longitudinal-wedge” method. Dependence of critical detonation thickness on the low-sensitive HE porosity was experimentally determined during our investigation. The influence of dynamic rigidity of shell on the critical thickness of detonation was also shown.

2-60

### АНИЗОТРОПИЯ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ 1,3,5-ТРИАМИНО 2,4,6-ТРИНИТРОБЕНЗОЛА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В КВАЗИИЗОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

А. В. Станкевич, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов,  
Е. Б. Смирнов, А. Ю. Тарасов

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

Необходимыми данными для построения физических уравнений состояния конденсированных веществ являются зависимости изменения удельного объема элементарной ячейки кристаллического твердого тела от температуры и давления окружающей его среды. Однако наиболее полное описание состояния кристалла дает учет его анизотропии, т.е. свойств кристаллографической системы в целом.

В работе представлены функциональные зависимости изменения параметров структуры молекулярного кристалла ТАТБ при температурном воздействии ( $T = 143...523$  К) в квазиизобарических условиях ( $P = P_{атм}$ ). По данным рентгеноструктурного анализа на дифрактометрической станции методами PXRD определены параметры кристаллической структуры: метрика ячейки, постоянные решетки, элементарный объем, плотность и размерные характеристики субструктуры. Построены следующие уравнения описывающие анизотропию параметров молекулярного кристалла ТАТБ:  $a_p = f(T)$ ;  $b_p = f(T)$ ;  $c_p = f(T)$ ;  $\alpha_p = f(T)$ ;  $\beta_p = f(T)$ ;  $\gamma_p = f(T)$ ;  $\rho_p = f(c)$ ; и изменение его физических характеристик:  $V_p = f(T)$ ;  $\rho_p = f(T)$ ;  $\nu_p = f(T)$ ;  $\alpha_{V_p} = f(T)$ ;  $d_p = f(T)$ ;  $\varepsilon_p = f(T)$ . Так же получены уточненные параметры тепловых колебаний структуры кристалла и статических смещений атомов в объеме элементарной ячейки, которые позволяют проверить корректность существующих моделей молекулярной динамики.

### ANISOTROPY OF CRYSTAL STRUCTURE PARAMETERS FOR 1,3,5-TRIAMINO 2,4,6-TRINITROBENZOL UNDER TEMPERATURE IMPACT IN QUASIBARIC CONDITIONS

A. V. Stankevich, O. V. Kostitsyn, E. B. Smirnov,  
N. P. Taibinov, A. Yu. Tarasov

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

The dependences how specific volume of an elementary cell in a crystal solid body changes depending on the environmental temperature and pressure are data necessary to construct physical equations of state for condensed matter. However, the state of a crystal is most completely described through accounting its anisotropy, i.e. properties of a crystallographic system on the whole.

The paper presents functional dependences how parameters of TATB molecular crystal structure are changing

under temperature impact ( $T = 143 \dots 523$  K) in quasibaric conditions ( $P = P_{\text{atm}}$ ). Based on the data of the X-ray diffraction analysis at a diffractometric station, PXRD methods were used to determine the following parameters of the crystal structure: cell metrics, lattice constants, elementary volume, as well as density and dimensional data of the substructure. The following equations were constructed to describe anisotropy of parameters of TATB molecular crystal:  $a_p = f(T)$ ;  $b_p = f(T)$ ,  $c_p = f(T)$ ,  $\alpha_p = f(T)$ ,  $\beta_p = f(T)$ ,  $\gamma_p = f(T)$ ,  $\rho_p = f(c)$ ; and also changes of its physical characteristics:  $V_p = f(T)$ ,  $\rho_p = f(T)$ ,  $v_p = f(T)$ ,  $\alpha_{V_p} = f(T)$ ,  $d_p = f(T)$ ,  $\varepsilon_p = f(T)$ . Parameters of thermal crystal-structure oscillations and static shifts of atoms in the elementary cell volume were determined more exactly and these refined parameters allow correctness of existing molecular dynamics models to be checked.

2-61

**КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ  
И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФРАКЦИИ  
РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ  
НА ПОРОШКООБРАЗНОМ ТАТБ**

А. В. Станкевич, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын,  
Н. П. Тайбинов, Е. Б. Смирнов, А. И. Ахметзянов

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

Кристаллическая структура вещества, как правило, определяется прямыми дифракционными методами, т. е. дифракцией на монокристаллах. Однако в тех случаях, когда вещества обладают рядом свойств, не позволяющих выращивать качественные монокристаллы значительных размеров (порядка 0,2–0,5 мм), и доступны только в поликристаллическом (порошкообразном) виде, роль метода порошковой дифрактометрии, несмотря на свою сложность, значительно возрастает.

Знание пространственной структуры органического соединения и характеристик молекулярных кристаллов, в большинстве случаев именно таковыми и являются ВВ, помогает получить количественные характеристики системы водородных связей, понять природу полиморфизма, что представляется актуальным при разработке технологии энергетических материалов.

В работе представлены результаты расчетов структуры молекулярного кристалла ТАТБ по данным картины дифракции рентгеновских лучей на порошкообразном (поликристаллическом образце). Результатом расчетов явилось получение кристаллографической и математической моделей, позволяющих спрогнозировать его поведение в определенных условиях.

**CRYSTALLOGRAPHIC AND MATHEMATICAL  
MODEL OF X-RAY DIFFRACTION  
ON POWDER TATB**

A.V. Stankevich, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn,  
N.P. Taibinov, E.B. Smirnov, A.I. Akhmetzyanov

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

As a rule, the crystal structure of a substance is determined using the direct diffraction methods, i.e. diffraction on monocrystals. However, in cases when substances have some properties that prevent high-quality mono crystals from growing up to sufficient sizes (order of 0.2–0.5 mm) and are available only in the poly crystal (powder) form, the role of powder diffractometry method seriously increases despite its complexity.

Knowledge of both the spatial structure of an organic compound and characteristics of molecular crystals to which HE belong to in most cases helps to get quantitative characteristics of hydrogen bonds system, to understand the nature of polymorphism that is actual for the development of energetic materials technology.

The molecular crystal structure of the TATB powdered (polycrystal) sample was calculated based on the data of X-ray diffraction pattern and results of this calculation are presented, i.e. the developed crystallographic and mathematical models that permit behavior of the sample material in certain conditions to be predicted.

2-62

**СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
КОМБИНИРОВАННОЙ ЗАГРУЗКИ  
ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА  
ПОРОШКООБРАЗНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

А. В. Станкевич, Т. П. Евсева,  
И. Ю. Суркова, В. Я. Базотов

Казанский Национальный Исследовательский  
Технологический Университет, Казань, Россия

Задача изготовления комбинированных изделий может быть представлена и решена с помощью порошковых методов формования. Наибольшее распространение, среди которых получил метод одностадийного прессования, однако основная проблема метода, в случае формования комбинированных изделий, связана с реологией порошкообразных материалов. Рассмотрев и проанализировав зоны структурно-механического состояния порошкообразного материала при комбинированном заполнении канала прессового инструмента, в том числе зоны контакта, было выявлено влияние множества факторов, позволяющих оценить роль первичной компоновки в предположении дилатантного поведения используемого материала.

Установлено, что текучесть (сыпучесть) порошкообразного энергетического материала зависит от дисперсного состава, морфометрических характеристик (формы, размера частиц и состояния их поверхности), вла-

госодержания, насыпной плотности, коэффициентов внутреннего и внешнего трения, которые также зависят от влагосодержания. Можно предположить, что идеальная модель текучести энергетического порошкообразного материала – есть сложная многопараметрическая модель.

Эмпирический случай зависимости сыпучести от размеров соответствующего канала:

$$v(D) = v_0(D) - v_i(\mu_0, \mu_i), \text{ где}$$

$v_0(D)$  – объем продукта вытекающего через отверстие за 1 с (скорость истечения продукта  $\text{см}^3/\text{с}$ );  $v_i(\mu_0, \mu_i)$  – потеря объема продукта при различных взаимодействиях (трение, электростатическое воздействие и другие)

$$v_i(\mu_0, \mu_i) = f(a) + f(d, w, L), \text{ причем}$$

$$f(a) = g(\chi, d, w, L), \text{ где}$$

$f$  – внутреннее и внешнее трение;  $a$  – адгезионное взаимодействие;  $\chi$  – характеристика природы материала, его активности;  $d$  – дисперсный состав;  $w$  – влагосодержание;  $L$  – форма и состояние поверхности. В случае сводообразования  $v(D) = 0$ .

С учетом вышеизложенного с эмпирической точки зрения наиболее значимыми параметрами являются физико-механические характеристики материала, среди которых сдвиговые и нормальные напряжения, возникающие в материале при его перемещении, описываемые коэффициентами внутреннего и внешнего трения. Однако данные характеристики имеют тесную взаимосвязь со свойствами, природой, составом и структурой порошкообразного материала. Следовательно, зависимость текучести порошкообразного материала при комбинированной нагрузке можно записать:

$$T(D) = V/\tau;$$

$$T(D) = T_0 - k \int_x^D dx - \rho_n (f_{в.тр} + f_{вн.тр}) - rw_i - mL_i$$

Знание структурно-механических (реологических) свойств используемых в производстве порошкообразных материалов, служит основой разработки технологии изготовления изделий, позволяет понять роль параметров вносящих наибольший вклад и выявить причины получения брака, что представляется актуальным при разработке технологии изготовления изделий из энергетических материалов.

### STRUCTURAL–MECHANICAL MODEL FOR COMBINED LOADING OF POWDER MATERIALS INTO THE PRESSING TOOL

A. V. Stankevich, T. P. Evseeva,  
I. Yu. Surkov, V. Ya. Bazotov

Kazan National Research Technological University, Kazan,  
Russia

Powder molding methods can be used to manufacture combined products. Among these methods, the one-stage pressing is the most widely used. As for molding of combined products, however, the main problem of the method is associated with powder material rheology. Consideration and analysis of the structural-mechanical state zones in

the powder material, including contact zones, in the case of combined filling of the pressing tool channel elucidated influence of numerous factors enabling estimation of the initial assembly in the assumption of the dilatant behavior of the test material.

Flowability of the powder energetic material is established to depend on the particle size distribution, morphometric characteristics (shape, particle size, and their surface state), water content, bulk density, as well as internal and external friction coefficients (they also depend on water content). An ideal model of powder energetic material flowability is supposed to be a complex multiparametric model.

The empirical case of flowability dependence on the appropriate channel dimensions is given below:

$$v(D) = v_0(D) - v_i(\mu_0, \mu_i), \text{ where}$$

$v_0(D)$  is the volume of the powdered or granulated material outflowing from the hole within 1 second (the powdered or granulated material outflow velocity,  $\text{cm}^3/\text{s}$ );  $v_i(\mu_0, \mu_i)$  is the powdered or granulated material volume loss in the case of different interactions (friction, electrostatic effect, etc.)

$$v_i(\mu_0, \mu_i) = f(a) + f(d, w, L), \text{ while}$$

$$f(a) = g(\chi, d, w, L), \text{ where}$$

$f$  – internal and external friction;  $a$  – adhesive interaction;  $\chi$  – is characteristics of the material nature, its activity;  $d$  – disperse composition;  $w$  – water content;  $L$  – surface shape and state. If doming occurs, then  $v(D) = 0$ .

Therefore, from the empirical viewpoint, the most significant parameters are the material physical-mechanical characteristics described by internal and external friction coefficients, i.e. shear and normal stresses arising in the material due to its displacement. However, these characteristics have strong interrelation with the properties, nature, composition, and structure of the powder material. Hence, the dependence of powdered or granulated material flowability under combined loading is as follows:

$$T(D) = V/\tau;$$

$$T(D) = T_0 - k \int_x^D dx - \rho_n (f_{в.тр} + f_{вн.тр}) - rw_i - mL_i$$

Knowledge of the structural-mechanical (rheological) properties of powdered materials used in production serves as the basis for the development of product manufacturing methods, helps to estimate the role of the most contributing parameters, and identify reasons of defects. This knowledge is critical for the development of methods used to manufacture products from energetic materials.

2-63

## ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ НИЗКОПЛОТНОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТЭНА

К. А. Тен<sup>1</sup>, Э. Р. Прууэл<sup>1</sup>, А. О. Кашкаров<sup>1</sup>,  
Л. А. Андреевских<sup>2</sup>, А. Л. Михайлов<sup>2</sup>, Л. И. Шехтман<sup>3</sup>,  
В. В. Жуланов<sup>3</sup>, Б. П. Толочко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр –  
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

<sup>3</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Институт химии твердого тела и механохимии,  
Новосибирск, Россия

E-mail: ten@hydro.nsc.ru

Синхротронное излучение (СИ), как источник рентгеновского излучения, обладает рядом уникальных свойств, основными из которых являются большая интенсивность потока, позволяющая использовать очень малое время экспозиции ( $\tau \leq 1$  нс), высокая периодичность во времени ( $\Delta t = 5\text{--}250$  нс) и малая угловая расходимость. Это выгодно отличает СИ от обычного импульсного рентгеновского аппарата и позволяет при регистрации излучения, проходящего через вещество, получать многокадровую картину распределения плотности в ударных волнах и в детонирующем ВВ с хорошим разрешением.

На экспериментальной станции ускорителя ВЭПП-3, расположенного в ИЯФе СО РАН, были проведены эксперименты по исследованию с помощью СИ детонирующих образцов насыпных смесей мелкодисперсного тэн+сода диаметром 15–20 мм. Данное смесевое взрывчатое вещество (ВВ) отличается очень малой начальной плотностью ( $\sim 0,5$  г/см<sup>3</sup>) и низкой скоростью детонации ( $\sim 2$  км/с). В сочетании с малым критическим диаметром ( $\sim 3$  мм) данный состав очень перспективен для использования при сварке взрывом [1]. Все образцы данного смесевое ВВ были приготовлены в ВНИИЭФ (Саров) и ими же доставлены в Новосибирск. Эксперименты проводились в двух постановках: продольное измерение рентгеновского поглощения и поперечное (детектор расположен поперек направления детонации). Регистрация СИ проводилась детектором DIMEX, собственной разработки [2]. Методика измерений приведена в [3, 4]. В первых экспериментах получены распределения плотности на фронте при детонации этого состава. Получены значения плотности в пике Неймана (1,15 г/см<sup>3</sup>) при скорости детонации 2,3 км/с. Ширина химпика составляет 12–15 мм. При использовании смеси обычного порошка тэна с содой (35/65), скорость детонации не изменяется, но критический диаметр увеличивается до 20 мм. При поперечном измерении поглощения получены объемные распределения давления, плотности и поля скоростей разлета продуктов детонации.

### Литература

1. L. A. Andreevskikh, Yu. P. Dedenkov, O. B. Drennov, A. L. Mikhailov, N. N. Titova, A. A. Deribas. Explosive Mixture

for Explosive Welding of Thin Foils // Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2011, v. 36, pp. 48–50.

2. Aulchenko V. M., Bondar A. E., Kudryavtsev V. N., Nikolenko D. M., Papushev P. A., Prueel E. R., Rachek I. A., Ten K. A., Titov V. M., Tolochko B. P., Zhilich V. N., Zhulanov V. V. GEM-based detectors for SR imaging and particle tracking. Shekhtman L. I. // Journal of Instrumentation, Volume 7, Issue 03 (March 2012), pp. 1–18.

3. E. R. Prueel, K. A. Ten, B. P. Tolochko, L. A. Merzhievskii, L. A. Luk'yanchikov, V. M. Aul'chenko, V. V. Zhulanov, L. I. Shekhtman, V. M. Titov. Implementation of the capability of synchrotron radiation in a study of detonation processes // Doklady Akademii Nauk, Physics, January 2013, Volume 58, Issue 1, pp. 24–28.

4. V. M. Titov, E. R. Prueel, K. A. Ten, L. A. Luk'yanchikov, L. A. Merzhievskii, B. P. Tolochko, V. V. Zhulanov, and L. I. Shekhtman Experience of Using Synchrotron Radiation for Studying Detonation Processes // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2011. Vol. 47, No. 6 pp. 3–15.

## DETONATION PARAMETERS OF A LOW-DENSITY PETN-BASED EXPLOSIVE

K. A. Ten<sup>1</sup>, E. R. Prueel<sup>1</sup>, A. O. Kashkarov<sup>1</sup>,  
L. A. Andreevskikh<sup>2</sup>, A. L. Mikhailov<sup>2</sup>, L. I. Shekhtman<sup>3</sup>,  
V. V. Zhulanov<sup>3</sup>, B. P. Tolochko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, RAS Siberian Branch,  
Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research  
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

<sup>3</sup>Budker Institute of Nuclear Physics, RAS Siberian Branch,  
Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, RAS  
Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

E-mail ten@hydro.nsc.ru

Synchrotron radiation as an X-ray source has a number of unique properties, i.e. great flux density that allows a very short exposure period ( $\tau \leq 1$  ns), high frequency ( $\Delta t = 5\text{--}250$  ns), and small angular divergence. This compares the synchrotron radiation favourably with a conventional X-ray pulse apparatus and makes it possible, when registering radiation going through a substance, to have good-resolution multiframe distribution of density in shock waves and in a detonating explosive.

The experimental accelerator VEPP-3 at the Institute of Nuclear Physics, RAS Siberian Branch, was used in experiments wherein synchrotron radiation helped to investigate detonating samples of the bulk fine PETN mixed with sodium carbonate. The samples were 15–20 mm in diameter. The distinctive feature of this explosive mixture is a small initial density ( $\sim 0.5$  g/cm<sup>3</sup>) and low detonation rate ( $\sim 2$  km/s). In combination with a small critical diameter ( $\sim 3$  mm), this composition is very promising as for its application in explosive welding [1]. VNIIEF (Sarov) prepared all samples of this mixed explosive and then delivered them to Novosibirsk. Experiments were performed in two setups: longitudinal measurements of X-ray absorption and transverse measurements (a detector is across the detonation direction). Synchrotron radiation was registered with DIMEX detector of our development [2]. The measurement procedure is presented in [3, 4]. The first experiments gave density distributions at the front under detonation of this

composition: density in the Neumann peak was 1.15 g/cm<sup>3</sup> at the detonation rate of 2.3 km/s and the chemical peak width was 12–15 mm. With the powdered PETN mixed with sodium carbonate (35/65), detonation rate remained unchanged though the critical diameter increased up to 20 mm. Transverse measurements of absorption gave volume distributions of pressure and density, as well as velocity fields of detonation products scatter.

## References

1. L. A. Andreevskikh, Yu. P. Dedenkov, O. B. Drennov, A. L. Mikhailov, N. N. Titova, A. A. Deribas. Explosive Mixture for Explosive Welding of Thin Foils // Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2011, v. 36, pp. 48–50.
2. Aulchenko V. M., Bondar A. E., Kudryavtsev V. N., Nikolenko D. M., Papushev P. A., Prueel E. R., Rachek I. A., Ten K. A., Titov V. M., Tolochko B. P., Zhilich V. N., Zhulanov V. V. GEM-based detectors for SR imaging and particle tracking. Shekhtman L. I. // Journal of Instrumentation, Volume 7, Issue 03 (March 2012), pp. 1–18.
3. E. R. Prueel, K. A. Ten, B. P. Tolochko, L. A. Merzhievskii, L. A. Luk'yanchikov, V. M. Aul'chenko, V. V. Zhulanov, L. I. Shekhtman, V. M. Titov. Implementation of the capability of synchrotron radiation in a study of detonation processes // Doklady Akademii Nauk, Physics, January 2013, Volume 58, Issue 1, pp. 24–28.
4. V. M. Titov, E. R. Prueel, K. A. Ten, L. A. Luk'yanchikov, L. A. Merzhievskii, B. P. Tolochko, V. V. Zhulanov, and L. I. Shekhtman Experience of Using Synchrotron Radiation for Studying Detonation Processes // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2011. Vol. 47, No. 6 pp. 3–15.

фаз углерода – ультрадисперсных алмазов (УДА) или низкоплотных графитоподобных веществ [1, 2].

Работы проведены на комплексе VEPP-3 и VEPP-4 (ИЯФ СО РАН, энергия 2 ГэВ и 4 ГэВ, экспозиция 1 нс, время между импульсами от 250–500 нс, общий поток ~10<sup>16</sup> фот/сек.). Регистрация проводилась детектором DIMEX-3 с угловым разрешением 10<sup>-4</sup> рад. [3].

Исследовались образцы, изготовленные на основе 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензола (ТАТБ) и его смесей с октогеном и УДА, тринитротолуола (ТНТ) и его смеси с гексогеном, бензотрифуроксана (C<sub>6</sub>N<sub>6</sub>O<sub>6</sub>, ВТФ). Все заряды имели одинаковые размеры: диаметр 20 мм, длина 30 мм.

Обработка распределений МУРП показывает, что средние размеры наночастиц конденсированного углерода составляют от 1–2 нм у ТАТБ, до 10 нм у БТФ в зоне химической реакции. Размеры частиц продолжают расти за фронтом детонации.

Были также проведены эксперименты по анализу сохраненных продуктов детонации тех же зарядов ВВ. Заряды взрывались в ледяной оболочке во взрывной камере из нержавеющей (нержавеющей стали). Были проведены микроскопические и дифракционные исследования полученных продуктов. Наноалмазы из них были выделены после обработки горячим газом. Полученные распределения размеров наноалмазов в исследованных ВВ совпадают с распределениями, полученными в динамических экспериментах (измерение МУРП).

## DYNAMICS OF CARBON NANOPARTICLE SIZES UNDER DETONATION OF CONDENSED EXPLOSIVES

K. A. Ten<sup>1,5</sup>, Yu. A. Aminov<sup>4</sup>, V. M. Aulchenko<sup>2</sup>, V. V. Zhulanov<sup>2</sup>, A. O. Kashkarov<sup>1,5</sup>, O. V. Kostistyn<sup>4</sup>, B. G. Loboiko<sup>4</sup>, A. K. Muzyrya<sup>4</sup>, K. V. Prosvirnin<sup>4</sup>, E. R. Prueel<sup>1,5</sup>, V. M. Titov<sup>1</sup>, B. P. Tolochko<sup>3</sup>, E. B. Smirnov<sup>4</sup>, L. I. Shekhtman<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Budker Institute of Nuclear Physics, RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

<sup>5</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

E-mail: ten@hydro.nsc.ru

The paper gives data on experimental dynamic registration of the small-angle X-ray scattering under detonation of explosives with oxygen deficiency. Distribution of the small-angle X-ray scattering can provide information on density fluctuation in the chemical reaction zone whereas in carbon-bearing explosives, density fluctuation is associated with the synthesis of carbon condensed phases, i. e. ultrafine diamonds or low-density graphite-like substances [1, 2].

This investigation was performed with systems VEPP-3 and VEPP-4 (Institute of Nuclear Physics, RAS Siberian Branch, energy – 2 GeV and 4 GeV, exposure – 1 ns,

2-64

## ДИНАМИКА РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ УГЛЕРОДА ПРИ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

К. А. Тен<sup>1,5</sup>, Ю. А. Аминов<sup>4</sup>, В. М. Аульченко<sup>2</sup>, В. В. Жуланов<sup>2</sup>, А. О. Кашкаров<sup>1,5</sup>, О. В. Костицын<sup>4</sup>, Б. Г. Лобойко<sup>4</sup>, А. К. Музыря<sup>4</sup>, К. В. Просвирнин<sup>4</sup>, Э. Р. Прууэл<sup>1,5</sup>, В. М. Титов<sup>1</sup>, Б. П. Толочко<sup>3</sup>, Е. Б. Смирнов<sup>4</sup>, Л. И. Шехтман<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

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

<sup>5</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: ten@hydro.nsc.ru

В работе приводятся экспериментальные данные по динамической регистрации мало-углового рентгеновского рассеяния (МУРП) при детонации ВВ с отрицательным кислородным балансом. По распределениям МУРП возможно извлекать информацию о флуктуации плотности в зоне химической реакции, которая в углеродо-содержащих ВВ связана с синтезом конденсированных

interpulse time – 250–500 ns, total flux  $\sim 10^{16}$  phot/s). The DIMEX-3 detector with the  $10^{-4}$  rad angular resolution was used for registration [3].

Investigations were performed with samples prepared based on 1.3.5-triamino-2.4.6-trinitrobenzol (TANB) and its mixtures with HMX and ultrafine diamonds; methyl-trinitrobenzene (TNT) and its mixtures with RDX; and benzotrifuroksan ( $C_6N_6O_6$ , BTF). All charges had the same dimensions, i. e. the 20-mm diameter, the 30-mm length.

Treatment of the small-angle X-ray scattering distributions shows that the average size of condensed carbon nanoparticles is 1–2 nm for TATB and up to 10 nm for BTF in the chemical reaction zone. Particles continue to grow in size behind the detonation front.

Experiments were also performed to analyze the recovered detonation products of the same charges exploded in the ice shell in the explosion chamber of stainless steel. These products were subjected to microscopic and diffraction analysis. Hot-gas treatment was used to extract nanodiamonds from these products. In the test explosives, distributions of nanodiamonds in size agree with distributions obtained in dynamic experiments (measurements of the small-angle X-ray scattering).

давлений ( $p \in [1, 1.36]$  атм) и концентраций компонент смеси ( $\xi_{SiH_4} \in [3 \cdot 10^{-4}, 0.02]$ ,  $\xi_{O_2} \in [5 \cdot 10^{-4}, 0.1]$ ,  $\xi_{H_2} \in [3 \cdot 10^{-4}, 6 \cdot 10^{-3}]$ ) по двум критериям воспламенения (максимум роста температуры смеси и достижение максимума радикала OH). Кроме того рассчитаны зависимости скорости детонационной волны и равновесных параметров смеси (давления, температуры) от стехиометрического соотношения между топливом (силан) и окислителем. Оказалось, что в переменных ( $D/D_{st}$ ,  $\phi$ ) скорости детонационной волны совпадают для смесей силан-воздух и водород-воздух. Найдены аналитические представления для зависимостей времен задержки воспламенения смесей силан – воздух и силан – кислород – аргон от концентраций компонент, температуры и давления смеси.

### PHYSICO-MATHEMATICAL MODELLING OF SILANE IGNITION AND COMBUSTION IN TRANSMITTED AND REFLECTED SHOCK WAVES

D. A. Tropin, A. V. Fedorov

Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics  
RAS Siberian Branch, 630090, Novosibirsk, Russia

E-mail: d.a.tropin@itam.nsc.ru, fedorov@itam.nsc.ru

2-65

### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ СИЛАНА В ПРОХОДЯЩИХ И ОТРАЖЕННЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ

Д. А. Тропин, А. В. Федоров

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: d. a.tropin@itam.nsc.ru, fedorov@itam.nsc.ru

Исследования воспламенения и горения силана в проходящих и отраженных ударных волнах (УВ) в настоящее время являются актуальными с точки зрения взрыво- и пожаробезопасности полупроводниковой промышленности, использующих силан в качестве рабочего тела. В частности, силан широко используется на соответствующих предприятиях как один из источников кремния, который получается при сгорании силана. Поэтому представляется полезным прогнозирование условий протекания дефлаграционных и детонационных процессов в силане, не только при технологическом горении, но и при протекании техногенных катастрофических явлений. Для этого полезным является метод математического моделирования в механике реагирующих сред.

В данной работе произведено построение физико-математических моделей воспламенения и горения смеси силана/водорода/кислорода и инертного газа (азот, аргон) в проходящих и отраженных УВ, основанных на детальной кинетике воспламенения и горения смеси. Для реализации задач воспламенения, горения и детонации данной смеси создана математическая технология. Показано, что эта модель удовлетворительно описывает экспериментальные данные по временам задержки воспламенения в диапазоне температур ( $T \in [800, 1900]$  К),

Studies of silane ignition and combustion in the transmitted and reflected shock waves are of current interest in terms of explosion and fire safety in semiconductor industry; silane is used as a working medium. In particular, silane is widely used as a source of silicon resulting from silane combustion. Consequently, it seems useful to predict deflagration and detonation processes in silane not only in the case of in-process combustion, but also as part of the technogenic catastrophic phenomena. Method of mathematical modelling in reactive-media mechanics is effective for this purpose.

Physico-mathematical models are based on the detailed kinetics of mixture ignition and combustion and are developed for ignition and combustion of silane/hydrogen/oxygen mixed with inert gas (nitrogen, argon) in transmitted and reflected shock waves. Mathematical technology was developed to solve problems pertaining to ignition, combustion, and detonation of the mixture. It is shown that the model adequately describes experimental data on the ignition delay time in the temperature range ( $T \in [800, 1900]$  K), in the pressure range ( $p \in [1, 1.36]$  atm), and the range of mixture components concentration ( $\xi_{SiH_4} \in [3 \cdot 10^{-4}, 0.02]$ ,  $\xi_{O_2} \in [5 \cdot 10^{-4}, 0.1]$ ,  $\xi_{H_2} \in [3 \cdot 10^{-4}, 6 \cdot 10^{-3}]$ ) by two ignition criteria (mixture temperature growth maximum and radical maximum attainment). Moreover, dependences of the detonation wave velocity and equilibrium parameters of the mixture (pressure, temperature) on the stoichiometric ratio between the fuel (silane) and the oxidant were calculated. It turned out that in the variables ( $D/D_{st}$ ,  $\phi$ ), detonation wave velocities coincide for the silane-air and hydrogen-air mixtures. Analytic representations were found for dependences of ignition delay time for silane-air and silane-oxygen-argon mixtures on the component concentration, temperature, and pressure.

2-66

### ВЛИЯНИЕ ДИЭТИЛЕНТРИАМИНА НА ВРЕМЯ РЕАКЦИИ НИТРОМЕТАНА ПРИ ДЕТОНАЦИИ

А. В. Уткин<sup>1</sup>, В. М. Мочалова<sup>1</sup>, С. М. Лапин<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,  
Россия<sup>2</sup>Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: utkin@icp.ac.ru

Малые добавки аминов могут существенно влиять на детонационные свойства нитрометана, в частности, на давление инициирования детонации, критический диаметр, профили массовой скорости. Увеличение начальной скорости реакции, обусловленное добавками аминов, должно влиять также и на время реакции нитрометана в детонационных волнах.

С целью проверки этого предположения были проведены эксперименты по изучению влияния диэтилен триамина (ДЭТА) на время реакции в нитрометане. Концентрация ДЭТА изменялась от 0 до 2,0 массовых процентов. Регистрация профилей массовой скорости осуществлялась лазерным интерферометром VISAR. Метод определения положения точки Чепмена-Жуге заключается в следующем: нужно подобрать такие условия инициирования зарядов, диаметры и материалы оболочек, чтобы в разных опытах спад скорости в волне разгрузки был различным. При этом течение в зоне реакции останется неизменным при диаметре оболочки, значительно превышающем критический. Время реакции определялось по расхождению профилей в волне разрежения.

Найденное из экспериментов значение времени реакции в нитрометане составило примерно 50 нс. При добавлении 0,5% ДЭТА оно уменьшается до 37 нс. При 1 и 2% ДЭТА время реакции в пределах точности измерения одинаково и равно примерно 30 нс. То есть малые добавки ДЭТА (0,5–2%) приводят к уменьшению времени реакции нитрометана меньше, чем в 2 раза. Согласно соотношению Харитона соответственно должен уменьшиться и критический диаметр. Однако критический диаметр при этом падает почти на порядок. Это несоответствие объясняется тем, что в нитрометане на краю заряда наблюдаются волны срыва реакции, которые и определяют критический диаметр (модель Дремина). Увеличение начальной скорости разложения нитрометана при добавках ДЭТА приводит к стабилизации течения и соответственно изменению природы критического диаметра. Если в смеси нитрометан/ДЭТА критический диаметр определяется временем реакции, то в чистом нитрометане он пропорционален времени индукции теплового взрыва на краю заряда, которое может быть существенно больше времени реакции.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ, проект № 14.122.13.6847-МК.

### THE INFLUENCE OF DIETHYLENTRIAMINE ON THE REACTION TIME OF NITROMETHANE IN DETONATION WAVES

A. V. Utkin<sup>1</sup>, V. M. Mochalova<sup>1</sup>, S. M. Lapin<sup>2</sup><sup>1</sup>Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka,  
Russia<sup>2</sup>Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: utkin@icp.ac.ru

Small additions of amines can influence the detonation properties of nitromethane, in particular the initiation pressure, the failure diameter, particle velocity profiles. The increase of initial reaction rate caused by amines additions must influence the reaction time of nitromethane in detonation waves.

For the purpose of verification of this assumption the experiments for investigation of DETA influence on the reaction time in nitromethane were conducted. The DETA concentration changed from 0 to 2 weight percentages. The registration of particle velocity profiles was carried out by the laser interferometer VISAR. Method of determination of the Chapman-Jouguet point position lay in the need of selection of charges initiation conditions, diameters and material of shells in order to the drop of velocity in unloading wave was different for various experiments. The flow in reaction zone remained the same at shell diameter exceeding the critical one. The reaction time was determined by divergence of the velocity profiles in the unloading wave.

The value of reaction time for nitromethane was about 50 ns. At addition of 0,5% DETA it decreased up to 37 ns. At 1 and 2% DETA reaction time was about 30 ns. I.e. small additions of DETA (0,5–2%) result in the decrease of reaction time smaller than in 2 times. According to the ratio of Chariton the failure diameter must decrease correspondingly. But the failure diameter drops in the order of magnitude. This discrepancy is explained by the waves of cessation of reaction on the charge edge in nitromethane, which determine the failure diameter. The increase of initial rate of nitromethane decomposition at DETA addition results in stabilization of flow and correspondingly the change of the nature of the failure diameter. If the failure diameter for nitromethane/DETA determined by the reaction time, for nitromethane it depends on the induction time of the thermal explosion on the charge edge, which can be greater than reaction time.

The work was supported by Grant of Russian President (Project 14.122.13.6847-MK).

2-67

**ХЕЛАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ  
ФТОРСОДЕРЖАЩИХ 1,3-ДИКЕТОНОВ  
И ЕНАМИНОКЕТОНОВ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ  
ИСТОЧНИКИ МЕТАЛЛОВ  
В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ**

В. И. Филякова<sup>1</sup>, А. Н. Кутепова<sup>2</sup>, А. В. Станкевич<sup>2</sup>,  
Н. П. Тайбинов<sup>2</sup>, Б. Г. Лобойко<sup>2</sup>, В. Н. Чарушин<sup>1</sup>

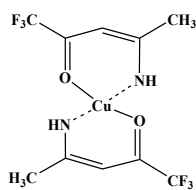
<sup>1</sup>Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО  
РАН, г. Екатеринбург, Россия

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

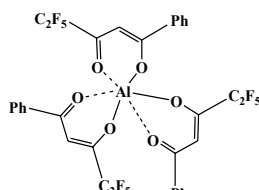
E-mail: vif@ios.uran.ru, b.g.loboiko@vniitf.ru

Хелатные комплексы фторсодержащих 1,3-дикетонов и енаминокетонов ( $\beta$ -аминовинилкетонов) с переходными, благородными и редкоземельными металлами обладают уникальным комплексом свойств. Они используются для получения оксидных и металлических покрытий методом химического осаждения из газовой фазы (метод CVD), создания магнитоактивных материалов, количественного определения металлов методом ГХ–МС, в катализе процессов полимеризации, гидрогенизации, карбонилирования и других [1, 2 и ссылки в них].

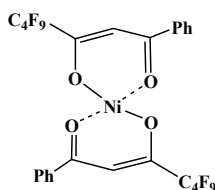
Мы обнаружили явление формирования металлов в нанокристаллическом состоянии ( $[n-M]$ ) на поверхности хелатных комплексов I–IV. Для хелатов I и II образование  $[n-M]$  подтверждено данными сканирующей электронной микроскопии в режиме BSE и рентгенофазового анализа (для соответствующих хелатных комплексов наблюдались рефлексы от меди  $2\theta = 43,30^\circ$  и алюминия  $2\theta = 38,47^\circ$ ). Для хелатов III, IV образование  $[n-M]$  методом сканирующей электронной микроскопии не зафиксировано, но в их рентгенограммах наблюдались возможные рефлексы от кобальта  $2\theta = 44,22^\circ$ ;  $2\theta = 51,52^\circ$  и никеля  $2\theta = 44,51^\circ$ .



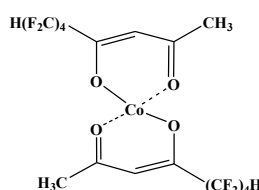
I



II



III



IV

Образцы комплексов I–IV хранились в течение нескольких лет. Окисления  $[n-M]$  не наблюдалось. Методы синтеза хелатов фторсодержащих  $\beta$ -дикетонов и енаминокетонов на базе доступного фторорганического сырья разработаны хорошо, а потому их целесообразно использовать для формирования  $[n-M]$ , стабилизированных органическими лигандами. Выявлены

условия, способствующие формированию  $[n-M]$  на поверхности комплексов I–IV. Способность фторсодержащих хелатов (особенно енаминокетонатов) легко возгоняться позволяет получать «сферы», содержащие на поверхности  $[n-M]$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-03-12188 офи\_m).

### Литература

1. В. Г. Исакова, Т. С. Хлебникова, Ф. А. Лахвич // Успехи химии, 2010. Т. 79. № 10. С. 929–960.
2. В. И. Филякова, Д. Л. Чижов, Е. Ф. Хмара, В. Н. Чарушин // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2009. Т. LIII. № 1. С. 64–73.

**CHELATE COMPLEXES  
OF FLUORINE-CONTAINING 1,3-DIKETONES  
AND ENAMINOKETONES – PERSPECTIVE  
METAL SOURCES IN NANOCRYSTALLINE STATE**

V. I. Filyakova<sup>1</sup>, A. N. Kutepova<sup>2</sup>, A. V. Stankevich<sup>2</sup>,  
N. P. Taibinov<sup>2</sup>, B. G. Loboyko<sup>2</sup>, V. N. Charuchin<sup>1</sup>

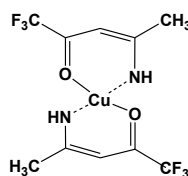
<sup>1</sup>Postovsky Institute of Organic Synthesis, RAS Ural Branch,  
Ekaterinburg, Russia

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

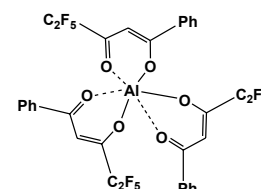
E-mail: vif@ios.uran.ru, b.g.loboiko@vniitf.ru

Chelate complexes of fluorine-containing 1,3-diketones and enaminoketones ( $\beta$ -aminovinylketones) with transition, noble, and rear-earth metals exhibit unique properties. They are used to obtain oxide and metal coatings by chemical vapor deposition (CVD method), to produce magnetic materials, to determine metals quantitatively by GC-MS method, in catalysis of polymerization, hydrogenization, carbonylation and other processes [1, 2 and references].

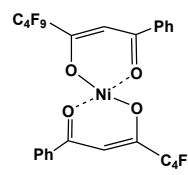
The phenomenon of metal formation in nanocrystalline state ( $[n-M]$ ) on the surface of chelate complexes I–IV was observed. For chelates I and II, formation of  $[n-M]$  is confirmed by the data of the electron scanning microscopy in BSE-mode and the X-ray phase analysis (reflections from copper  $2\theta = 43.30^\circ$  and aluminum  $2\theta = 38.47^\circ$  were observed for corresponding chelate complexes). For chelates III, IV, the scanning electronic microscopy has not recorded formation of  $[n-M]$ , but their X-ray diagrams show potential reflections from cobalt  $2\theta = 44.22^\circ$ ;  $2\theta = 51.52^\circ$  and nickel  $2\theta = 44.51^\circ$ .



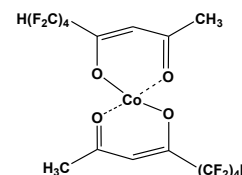
I



II



III



IV



Complexes I–IV samples have been stored for several years and  $[n-M]$  oxidation was not observed. The methods of synthesizing the chelates of fluorine-containing  $\beta$ -diketones and enamino-ketones based on available fluoro-organic materials are well-developed and therefore it is reasonable to use these methods to form  $[n-M]$  stabilized with organic ligands. Conditions contributing to the formation of  $[n-M]$  on the surface of complexes I–IV were identified. The capability of fluorine-containing chelates (especially enamino-ketones) for easy sublimation enables “spheres” containing  $[n-M]$  on the surface to be obtained.

The work was performed with financial support from RFFI (grant No 13-03-12188 ofi\_mm).

#### References

1. V. G. Isakova, T. S. Khlebnikova, F. A. Lakhvich // *Uspekhi khimii* (Advances in chemistry). 2010, 79, 929–960.
2. V. I. Filyakova, D. L. Chizhov, E. F. Khmara, V. N. Charushin // *Ros. Khim. J.* (Russian Chemical Journal) (J. of Russian Chemical Society named after D. I. Mendeleev). 2009, 1, 64–73.

---

2-68

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТАКТНОГО МЕТОДА ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПЛАВКИХ СИСТЕМАХ

А. Р. Хайруллин, В. Я. Базотов,  
В. Г. Никитин, Д. И. Хамидуллин

Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, Казань, Россия

E-mail: ttxb@mail.ru

При создании новых плавких высокоэффективных систем важно знать природу образующего сплава. Контактный метод является простейшим и наиболее быстрым способом установления типа диаграмм состояния (плавкости) в бинарных и тройных системах, а также удачной формой экспрессного физико-химического анализа. Если между предметным и покровным стеклами расплавить сначала одно соединение с более высокой температурой плавления, дать ему закристаллизоваться, а затем расплавить второе соединение с более низкой температурой плавления так, чтобы расплав его соприкасался с границей первого уже твердого вещества, то вследствие диффузии расплава в неподвижную твердую фазу первого соединения образуется так называемая контактная зона или, правильнее, зона смешения.

Подобная зона смешения является своеобразной диаграммой плавкости, по которой можно судить о взаимодействии двух соединений.

В работе представлены данные, полученные контактным методом при изучении сплавов на основе фтординитроэтилметилфуроксана, имеющего  $T_{пл.} = 82$  °C и производных фуроксана ( $T_{пл.} = 107$  °C) и фуразана ( $T_{пл.} = 102$  °C).

Для установления характера взаимодействия исследуемых компонентов использовался поляризационный микроскоп Olympus BX-51 с термостолком; наблюдаемая картина фиксировалась на цифровую камеру.

Анализ микроструктуры контактных зон систем фтординитроэтилметилфуроксана с фуроксаном и фу-

разаном, а также наблюдение за процессами кристаллизации и расплавления, свидетельствует об образовании эвтектик.

### USING A CONTACT METHOD FOR DETERMINE NATURE OF THE INTERACTION IN A FUSE SYSTEMS

A. R. Khayrullin, V. Ya. Bazotov,  
V. G. Nikitin, D. I. Khamidullin

Kazan National Research Technological University, Kazan,  
Russia

E-mail: ttxb@mail.ru

When creating a new fuse high-performance systems it's very important to know the nature of forming alloy. Contact method is a simplest and fastest way of establishing the type of state diagrams (melting) in binary and ternary systems, and successful form of express physico-chemical analysis. If between the object and cover glass melt one first compound with a high melting point, give it to crystallize, then melt the second compound with a low melting point so that its melt into contact with the boundary of the first solid, is due to diffusion of the melt into the stationary solid phase of the first compound, a so-called contact zone or, more correctly, the mixing zone is formed.

This mixing zone is a kind of fusion diagrams, by which to judge the interaction of the two compounds.

The job presents the data obtained by the contact method in the study of alloys based on fтординитроэтилметилфуроксан having melting point 82°C and derivatives of furoxan (with melting point 107°C) and furazanyl (with melting point 102°C).

To establish the nature of the interaction of the component used a polarizing microscope, Olympus BX-51 with heating stage, the observed pattern was recorded on a digital camera.

Analysis of the microstructure of the contact zones of fтординитроэтилметилфуроксан systems with furoxan and furazanyl, as well as monitoring the processes of crystallization and melting, indicating the formation of eutectics.

---

2-69

### АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ НЕРАЗРУШАЕМЫХ ТРАНСЛЯТОРОВ ДЕТОНАЦИИ

А. В. Васильев, С. А. Душенок, А. А. Котомин,  
С. И. Миткалинный, В. В. Харченко

Специальное конструкторско-технологическое бюро  
«Технолог», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: V. V. Harchenko@mail.ru

Транслятор неразрушаемый детонационный (далее по тексту «транер») предназначен для передачи детонационного импульса в системах разделения космических аппаратов.

Основной силовой оболочкой транера является трубка из нержавеющей стали марки 12X18H10T, наружным диаметром 4,5 мм и толщиной стенки 0,9 или 1,0 мм. Внутри трубки находится слой сверхвысокомодульного волокна (СВМ) типа «Kevlar». Внутри СВМ находится медная трубка с толщиной стенки ~0,15 мм, в которой расположен шнуровой заряд диаметром 0,65 мм из взрывчатого состава «транелит» с заданными параметрами взрывчатого превращения.

При функционировании транера должна сохраняться его целостность и обеспечена прочность конструкции с заданным коэффициентом запаса. Необходимо также максимально уменьшить вес конструкции. Эти противоречивые требования можно выполнить, в частности, при оптимизации толщины стенки трубки.

Целью настоящей работы является расчетно-экспериментальное обоснование работоспособности и прочности многослойной конструкции транера.

Задача по прочности цилиндрической трубки, полностью находящейся в пластичном состоянии, в гидродинамическом приближении решена по теории Мизеса. Определены пределы прочности трубки с различной толщиной стенки.

В работе выполнены расчеты теплоты, температуры взрыва и объема газообразных продуктов взрыва транелита. Приведены расчеты давления продуктов взрыва в замкнутом объеме, т. е. давления, воздействующего на силовую оболочку транера.

Выполнены уточненные расчеты по программе BKW-T по определению тех же параметров, а также изоэнтропы продуктов детонации транелита. Проведен их сравнительный анализ. В результате моделирования определено также расчетное давление продуктов взрыва при заданной степени их расширения.

Подготовлена и проведена серия экспериментов по подтверждению работоспособности и прочности конструкции транеров, в том числе с мажорирующей оценкой избыточного давления в трубке при детонации транелита с большим, по сравнению с рабочим (0,65 мм), диаметром заряда – до 0,85 мм.

Экспериментально определены остаточные деформации силовой оболочки, которые составили величину около 4%.

Установлено, что при толщине стенки трубки 1,0 мм, конструкция транера является более прочной и отвечает требованиям, регламентированным техническими условиями.

#### OPTIMIZATION OF THE SHELL THICKNESS OF «TRANER»

A. V. Vasilev, S. A. Duschenok, A. A. Kotomin,  
S. I. Mitkalinniy, V. V. Kharchenko

Special Design and Technology Bureau “Technolog”,  
St. Petersburg, Russia

E-mail: V.V.Kharchenko@mail.ru

Splitless, confined in shell detonating fuse (hereinafter referred to as «traner»), is applied for passing the detonation pulse in compartmentation system of spaceships.

The stainless steel (quality 12Cr18Ni10Ti) shell, major diameter 4,5 mm, thickness of wall 0,9 or 1,0 mm is the

main pressure shell of «traner». There is a layer of high modulus fiber (HMF) «Kevlar» inside of stainless steel shell. Inside of HMF there is copper shell (thickness of wall ~0,15 mm). Inside of copper shell there is a detonation fuse made of «tranelit», the explosive compound with parameters of explosive transition.

High momentum energy, outputting in case of detonation and high impact, can break the «traner». With that, it is necessary to decrease the «traner» weight. These conflicting objectives can be carried out, for example, in case of improvement shell wall thickness.

The aim of this work is the calculation and experimental support (proof) of «traner» stage conduit efficiency and strength.

The Mises theory was used to solve a problem of cylindrical shell in plastic stage in hydrodynamic approximation. Strength limit was determined for shells with different wall thickness.

The calculation of explosive temperature, explosive heat and gaseous products for «tranelit» was done. The calculations of explosion product pressure in enclosed volume i. e. pressure, influencing on main pressure shell of «traner», is listed.

The same characteristics and isentropes of «tranelit» detonation product was calculated BKW-T code. All data were compared. The calculation pressure of detonation product in level of expansion desired was determined by simulation.

The set of experiments were prepared and done to confirm the efficiency of «traner» design, including the case with majorize valuation of manometric pressure in stainless steel shell (diameter up to 0,85 mm) under «tranelit» detonation.

Plastic yields were determinate by experiments and was ~4 %.

It was found that the «traner» design is more strength and meet a requirement of specification when the shell wall thickness is 1,0 mm.

---

2-70

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В РАМКАХ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ

Т. А. Хмель, А. В. Федоров

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

E-mail: khmel@itam.nsc.ru

Ключевые слова: газовзвеси, ударные волны, диспергирование, столкновительная динамика, математическое моделирование

Процессы диспергирования пылевзвесей при воздействии ударных волн представляют интерес, как в отношении взрыво-пожаро-безопасности запыленных производств, так и в связи с развитием порошковых технологий. Анализ столкновений частиц в процессах взаимодействия ударных волн с облаками и слоями пылевых отложений мало изучен. Ранее нами была разви-

та модель двухфазной среды, основанная на молекулярно-кинетических подходах для описания хаотического движения и столкновений частиц. Модель верифицировалась по данным экспериментов Б. Е. Гельфанда по зависимости равновесной скорости звука от размера частиц и перепада давления в камере. Численная технология основана на применении явных консервативных схем класса TVD (Harten) для газа и модифицированной схемы Gentry-Martin-Daly для частиц с аналогичной аппроксимацией дополнительных членов, связанных с давлением в фазе частиц. В настоящей работе на основе численного моделирования двумерных течений анализируется вклад столкновительной динамики в процессы диспергирования при взаимодействии ударных волн со слоями инертных частиц. В процессах межфазного взаимодействия учитываются силы сопротивления, силы Саффмана и силы Магнуса. Модель и численный метод тестировались на задаче о прохождении ударной волны по слою соответственно условиям экспериментов Fan et al (2007). Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными по форме ударной волны и параметрам формирующихся в слое структур: угле сжатия слоя, угле преломления УВ и картинам дисперсии частиц. Рассматривалась также задача о взаимодействии взрывной волны с гладким или шероховатым слоем частиц высокой плотности. Влияние шероховатости практически не сказывается на картине дисперсии. Показано относительно слабое влияние сил Саффмана и определяющая роль сил Магнуса на поднятие частиц из верхнего слоя. Установлено влияние столкновений частиц на распределение плотности за ударной волной. При значительном начальном уровне хаотизации взвеси эффекты столкновительной динамики частиц сопоставимы с эффектом сил Магнуса. Таким образом, развитие хаотического движения и столкновений частиц является дополнительным фактором диспергирования слоев при ударно-волновых процессах.

#### INVESTIGATION OF SHOCK-WAVE DISPERSION PROCESSES WITHIN MOLECULAR-KINETIC MODEL OF COLLISIONAL DYNAMICS OF PARTICLES

T. A. Khmel, A. V. Fedorov

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

E-mail: khmel@itam.nsc.ru

Key words: gas suspension, shock waves, dispersion, collisional dynamics, mathematical simulation

Dust-suspension dispersion induced by shockwaves is of interest both for explosive-fire-safety of dusty production facilities, and in view of the development of powder technologies. Particle collisions during shock waves interaction with clouds and beds of dust deposits are poorly analyzed. Earlier, the two-phase medium model based on the molecular-kinetic approaches was developed to describe random motion and collisions of particles. The model was verified with B. E. Gelfand's experimental data on the dependence of the sound equilibrium velocity on the particle size and chamber differential pressure. The numerical method is based on the application of explicit conser-

vative TVD schemes (Harten) for a gas and the modified Gentry-Martin-Daly scheme for particles with similar approximation of the additional terms related to pressure in the particle phase. Based on the numerical simulation of two-dimensional flows, this work analyzes contribution of collisional dynamics to dispersion processes at shock-waves interaction with the layers of inert particles. Resistance forces, the Saffman and Magnus forces are considered in the interfacial interaction processes. The model and numerical method were tested with the problem of shock wave passage through a layer according to conditions of the Fan experiments (2007). Calculation data agree with experimental data on the shock wave shape and parameters of the structures forming in the layer: angle of the layer compression, angle of shock wave refraction, and patterns of the particle dispersion. Consideration was also given to the problem of explosion wave interaction with a smooth or rough layer of high-density particles. Roughness has practically no impact on the dispersion pattern. Rather weak effect of the Saffman forces and the determining role of the Magnus forces on the particles rising from the upper layer is demonstrated. Effect of the particle collisions on the density distribution behind the shock wave is established. At significant initial level of suspension chaotization, the effects of collisional dynamics of particles are comparable to the effect of Magnus forces. Thus, development of random motion and collisions of particles is an additional factor of layer dispersion at shock wave processes.

2-71

#### СОЗДАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ВЗРЫВНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЯХ

С. В. Хомик<sup>1</sup>, Б. Вейссьер<sup>2</sup>, С. П. Медведев<sup>1</sup>,  
В. Монтассьер<sup>2</sup>, Г. Л. Агафонов<sup>1</sup>, М. В. Сильников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт ППрим, Отдел жидкостей, термодинамики  
и горения, Пуатье, Франция

E-mail: khomik2000@yahoo.com

Возможность образования больших масс водорода при развитии аварий на атомных электростанциях, а также его использование в качестве перспективного топлива в двигателях и энергетических установках обуславливает интерес к исследованию взрывных процессов в водородсодержащих смесях. Одновременно следует отметить отсутствие надежных данных о механизме реагирования этих смесей при невысоких температурах (<1000 К) и повышенных давлениях (>0,1 МПа). Такие параметры реализуются на начальном этапе развития взрывных процессов, в частности при возникновении детонации. В работе описан метод создания нестационарных (переходных) режимов взрывного превращения, приводящих к инициированию детонации или распаду детонационноподобного комплекса.

Для создания различных нестационарных режимов взрывного превращения приводящих к возникновению детонации используется расположенная поперек

цилиндрического канала проникаемая преграда в виде перегородки с отверстиями. По одну сторону от перегородки располагалась исследуемая горючая смесь. С другой стороны к перегородке подходила или детонационная волна, или ударная волна в воздухе. В экспериментах использовались смеси водорода с воздухом и обогащенные кислородом смеси с азотом при начальном давлении от 0,01 до 0,2 МПа. Одновременной синхронизированной регистрацией профилей давления, следовых отпечатков и высокоскоростной шпирен видеосъемкой показана возможность реализации определенного набора взрывных процессов. Прямое инициирование детонации наблюдается на расстояниях не более 10 размеров отверстий в перегородке. Уменьшение чувствительности смеси приводит к воспроизводимому ре-инициированию и распаду детонации вдоль канала с шагом до нескольких его поперечных размеров. Дальнейшее уменьшение чувствительности смеси ведет к возникновению детонации в результате объемного взрыва между лидирующей ударной волной и следующим за ней фронтом пламени. Описаны условия возникновения наблюдаемых процессов и определена зависимость длины преддетонационного участка от чувствительности смеси и интенсивности ударной волны взаимодействующей с преградой.

Работа выполнена при поддержке Национального центра научных исследований Франции (CNRS), РФФИ (проект 12-03-00963-а), и по Государственному контракту № Н.4х.44.90.13.1106 Российской Федерации.

#### **GENERATION OF THE TRANSITIONAL EXPLOSIVE MODES IN HYDROGENOUS MIXTURES**

S. V. Khomik<sup>1</sup>, B. Veysiere<sup>2</sup>, S. P. Medvedev<sup>1</sup>, V. Montassier<sup>2</sup>, G. L. Agafonov<sup>1</sup>, M. V. Silnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>N.N. Semenov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institut PPRIME P' (UPR 3346 CNRS), Département Fluide-Thermique-Combustion ENSMA, Poitiers, France  
E-mail: khomik2000@yahoo.com

The possibility of generation of large masses of hydrogen during an accident at nuclear power station and the utilization of hydrogen as a prospective fuel in engines and power plants raise the interest for investigation of the explosive processes in hydrogenous mixtures. Simultaneously, it should be pointed on an absence of the reliable data of the reaction mechanism for such mixtures at moderate temperatures (<1000 K) and elevated pressures (>0.1 MPa). Such parameters can be realized at the beginning stage of the evolution of an explosion processes, particularly at detonation onset. The paper reports a method of generation of unsteady transitional explosive regimes that cause the detonation initiation or the failure of detonation-like complex.

The permeable obstacle in the form of an orifice plate placed across a cylindrical channel was used for the generation of the different unsteady explosive processes that can lead to detonation onset. The mixture under investigation was placed on one side of the partition. The detonation or air shock wave impacts the partition from the opposite side. Hydrogen – air or oxygen-enriched mixtures containing ni-

trogen at initial pressure from 0.01 to 0.2 MPa were used. The possibility of generation of the proper explosive regimes was demonstrated by means of simultaneous records of pressure profiles, soot traces and high-speed schlieren visualization as well. Direct detonation initiation is possible at distances of about 10 diameters of the holes in the partition. The decrease of mixture sensitivity leads to the reproducing process of detonation re-initiation and failure along a duct with a step of several duct diameters. Further decrease of detonability leads to the volumetric explosion of shocked mixture between leading shock wave and flame front. It is described the conditions of the onset of the investigated processes and it is determined the dependence of the detonation initiation length on the mixture sensitivity and the intensity of the shock wave that interacts with the partition.

The support by the National Center for Scientific Research (CNRS, France), Russian Foundation for Basic Research (project no. 12-03-00963-a) and State contract no H.4x.44.90.13.1106 (Russia) is gratefully acknowledged.

2-72

#### **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ K008 ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ФОТОХРОНОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

И. А. Ахлюстин, М. М. Банников, К. В. Еганов,  
А. Н. Киселёв, К. М. Мирошкин, К. М. Просвирнин,  
Е. Б. Смирнов, В. Н. Щербakov

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

В докладе представлены результаты экспериментальных работ по оценке возможности использования электронно-оптической камеры с щелевой разверткой БИФО K008 при реализации фотохронографического метода исследования ударно-волновых и детонационных процессов.

#### **APPLICATION OF THE ELECTRO-OPTICAL CAMERA K008 FOR THE REGISTRATION SHOCK WAVE AND DETONATION'S PROCESS USING PHOTOCRONOGRAPHIC METHODS**

I. A. Ahlyustin, M. M. Bannikov, K. V. Eganov,  
A. N. Kiselev, K. M. Miroshkin, K. M. Prosvirmin,  
E. B. Smirnov, V. N. Shcherbakov

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

The report represent the results of the experiments estimating the possible to use streak camera under realization of photochronographic methods of investigation of shock wave and detonation's processes.

2-73

**АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ДИСЛОКАЦИЙ В ТЭНЕ**

А. В. Янилкин

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

E-mail: aleyanilkin@gmail.com

Работа посвящена исследованию методом молекулярной динамики механизмов и кинетики пластического деформирования молекулярных кристаллов энергетических материалов на примере ТЭНа. Для описания взаимодействия атомов внутри молекул ТЭНа, а также между различными молекулами используется реакционный потенциал (REAXFF), позволяющий описывать химические превращения.

Рассмотрено деформирование монокристалла в отсутствие дислокационной системы. Определены пределы текучести такого кристалла и механизм пластического деформирования.

Для определения влияния движения дислокаций на пластическое деформирование исследуется подвижность одиночной дислокации в монокристалле. Для этого разработана молекулярно-динамическая модель, позволяющая создавать одиночную краевую дислокацию в молекулярном кристалле. Суть такой модели заключается в специальном построении кристалла

и последовательности различных методов релаксации. С помощью такой модели исследуется зависимость скорости движения дислокаций вдоль различных систем скольжения от приложенных напряжений.

**ATOMISTIC SIMULATION OF DISLOCATIONS  
IN PETN**

A. V. Yanilkin

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: aleyanilkin@gmail.com

The work is devoted to investigation of the mechanisms and kinetics of plastic deformation of energetic molecular crystals by means of molecular dynamics simulation. As an example PETN crystal is considered. The interatomic and intermolecular interactions are described by the reactive potential (REAXFF), which is suitable for bond break and formation.

The deformation of single crystal without dislocations is considered. The mechanism of plastic deformation and flow stress are obtained.

In order to investigate the influence of dislocations on plastic deformations the crystal with dislocation is considered. The molecular dynamics model is proposed to create single edge dislocation in crystal. The process consists of several steps, which include the special crystal generation and successive steps of relaxation. The mobility of dislocations along different slip systems is obtained in the dependence of applied shear stress.



**Секция 3**

**ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ**

---

**Section 3**

**DENSE PLASMA PHENOMENA**





## РОСТ СКОРОСТИ РЕАКЦИЙ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ ЗА СЧЕТ КВАНТОВЫХ ПОПРАВК

В. К. Грязнов<sup>1</sup>, И. В. Ломоносов<sup>1</sup>,  
Ю. В. Петрушевич<sup>2</sup>, А. Н. Старостин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН,  
Черноголовка, Россия

<sup>2</sup>Государственный научный центр РФ «Троицкий институт  
инновационных и термоядерных исследований»,  
Москва, Россия

Скорости нерезонансных ядерных реакций, в частности реакций синтеза в плазме, определяются кинетической энергией взаимодействующих частиц в системе их центра масс, а также их распределением по энергии и импульсам. При не слишком высокой температуре основной вклад в реакции синтеза будут давать частицы с энергией в несколько раз превышающей температуру плазмы. При этом 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. Это обстоятельство для значительных плотностей среды должно отражаться в появлении степенной поправки к функции распределения частиц по импульсам. Отдельный интерес к данной проблеме заключается в исследовании реакций синтеза легких элементов в условиях неидеальной плазмы при умеренных температурах – около нескольких эВ и плотностях около  $1 \text{ г/см}^3$ .

Рассматривается влияние квантовых эффектов на равновесную скорость реакций ядерного синтеза, и получены точные выражения для скоростей этих реакций. Проведенные расчеты показывают, что квантовые эффекты существенно влияют на скорости реакции  $D+D$ , которая может возрасти на несколько порядков по сравнению с расчетами по общепринятым моделям в условиях, которые могут быть получены в лабораторных условиях. Обсуждается возможность наблюдения теоретических предсказаний в лабораторных условиях.

Показано, что в рамках созданной модели резко возрастают также скорости таких реакций, как  $p + ^7\text{Be}$ ,  $^3\text{He} + ^4\text{He}$ ,  $p + ^7\text{Li}$  и  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ . Уточненные величины скоростей реакций могут быть значительно выше, чем их классические значения для условий, ожидаемых в недрах Солнца и сверхновых звезд.

## INCREASING THE RATE OF NUCLEAR FUSION REACTIONS IN NONIDEAL PLASMA BY QUANTUM CORRECTIONS

V. K. Gryaznov<sup>1</sup>, I. V. Lomonosov<sup>1</sup>,  
Yu. V. Petrushevich<sup>2</sup>, A. N. Starostin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> The Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian  
Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

<sup>2</sup> State Research Center of RF “Troitsk institute for innovation&  
Fusion Research”, Moscow, Russia

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 the particles with energies several times larger than the plasma temperature.

It is well known that in dense environments the quantum uncertainty in the energy of the particles associated with their frequent collisions leads to disruption of the unambiguous relationship between the energy and momentum of particles. This fact is significant for the large density of the medium and it should be reflected in the appearance of the power corrections to the distribution function of the particle momentum. The particular interest to this problem is to study the reactions of light elements of nonideal plasma at moderate temperatures – around a few eV and densities of about  $1 \text{ g/cm}^3$ .

The influence of quantum effects on equilibrium rates of fusion reactions in dense plasmas is discussed.

The modelling shows that quantum effects can significantly affect the rate of the reaction  $D + D$ , which can increase by several orders of magnitude compared with calculations, obtained by conventional models in conditions that can be prepared in the laboratory. The possibility to observe the theoretical predictions in the laboratory conditions is discussed.

Our calculations show that quantum effects significantly influence on the reaction rates of  $p + ^7\text{Be}$ ,  $^3\text{He} + ^4\text{He}$ ,  $p + ^7\text{Li}$ ,  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ , etc. type reactions and new reaction rates may be much higher than the classical ones for the interior of the Sun and supernova stars.

## ДИНАМИКА НЕПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ДВОЙНОЙ ИОНИЗАЦИИ (NSDI) АТОМОВ В МОЩНОМ ЛАЗЕРНОМ ИМПУЛЬСЕ

Ц. Лю, Х. Ли, С. Вэй, Н. Дин

Институт прикладной физики и вычислительной математики  
(IAPCM), Пекин, Китай

В кругах сообщества в области физики поля высокой напряженности наблюдается возрастающий интерес к непоследовательной двойной ионизации (NSDI), вызываемой электрон-электронным взаимодействием. Эксперименты последних десятилетий демонстрируют большое разнообразие необычных явлений. Тем не менее, теоретическое объяснение и интерпретация данного процесса по-прежнему далеки от завершения. Наиболее точно определенное представление процесса, а именно точное решение зависящих от времени уравнений Шредингера для двух электронов в лазерном поле, представляется дорогостоящим в вычислительном отношении. В настоящем докладе описываются наши последние работы по применению полуклассической модели возвратного рассеяния с целью исследования динамики подциклов NSDI атомов. В нашей модели туннельная ионизация самого удаленного кванта электронов выполняется механически в соответствии

с теорией ADK, внутренний электрон выбирается из микроканонического распределения, а затем два электрона выделяются с помощью уравнений Ньютона. С помощью данной модели мы успешно объяснили различные явления NSDI, в том числе, избыточный выход DI, распределение импульса отдачи двукратно ионизированных ионов, корреляция импульса между двумя испускаемыми электронами, энергетические спектры и угловое распределение фотоэлектронов. Недавно модель была одобрена для выявления физического механизма в основе пальцевидной структуры, найденной независимо двумя группами, в соотнесенных моментах импульсов электронов, а также в основе перехода от корреляции к антикорреляции, и кроме того была расширена до молекулярного случая и надбарьерного режима. Расчет модели воспроизводит экспериментальные результаты для магния и объясняет очевидно противоречивые экспериментальные результаты посредством аналитической формулы, разграничивающей диаграмму состояния для непоследовательной двукратной ионизации в циркулярно-поляризованных лазерных полях. Очевидное преимущество нашей модели заключается в том, что она позволяет рассмотреть сложную динамику NSDI в последовательные моменты времени, от включения лазерного поля до окончательного убегания электронов, позволяя тем самым выявить и детально проанализировать вышеописанные механизмы.

### DYNAMICS OF THE NONSEQUENTIAL DOUBLE IONIZATION (NSDI) OF ATOMS IN AN INTENSE LASER PULSE

J. Liu, H. Li, S. Wei, N. Ding

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics (IAPCM), Beijing, China

Within the strong-field physics community, there has been increasing interest on nonsequential double ionization (NSDI) induced by electron-electron correlation. A large variety of novel phenomena has been revealed in experiments during the past decades. However, the theoretical understanding and interpretation of this process is still far from being complete. The most accurate representation of the process, i. e., the exact solution of the time-dependent Schrodinger equation for two electrons in a laser field is computationally expensive. In the present talk, we report our recent works of applying semiclassical rescattering model to investigate the subcycle dynamics of NSDI of atoms. In our model, we treat the tunneling ionization of the outmost electron quantum mechanically according to the ADK theory, sample the inner electron from microcanonical distribution and then evolve the two electrons with Newton's equations. With this model, we have successfully explained various NSDI phenomena, including the excessive DI yield, the recoil momentum distribution of doubly ionized ions, the momentum correlation between two emitted electrons, the energy spectra and angular distribution of photoelectrons. Very recently, it is adopted to reveal the physical mechanism behind the finger-like structure found independently by two groups in the correlated electron momentum spectra and behind the transition from correlation to anticorrelation, and has also been extended to the molecular case and over-the-barrier regime. The model

calculation reproduces the experimental results for magnesium and explains the apparently conflicting experimental results in terms of an analytical formula that demarcates the phase diagram for the nonsequential double ionization in circularly polarized laser fields. The obvious advantage of our model is that it gives time-resolved insights into the complex dynamics of NSDI, from the turn-on of the laser field to the final escape of the electrons, thus allows us to disentangle and thoroughly analyze the above-stated mechanisms.

3-3

### ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОЙ ИМПЛОЗИИ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ

Н. Дин, Х. Ли, У. Чжан, Ч. Сюэ, Ц. Хуан, Ш. Сун, С. Вэй, Ц. Лю

Институт прикладной физики и вычислительной математики, Пекин, Китай

Для повышения температуры излучения Z-пинч динамического хольраума («двойного лайнера») (ZPDH) использовалась квазисферическая имплозия, при которой динамическая энергия концентрируется в центре, и оказывает трехмерное воздействие на концентрический пенный конвертор. Однако, использование многопроволочного лайнера на слаботочной установке затруднительно. Вместо модификации массы был успешно разработан новый метод достижения квазисферической имплозии путем корректировки формы первоначальной нагрузки, что действительно осуществимо для многопроволочных лайнеров. Проведено численное исследование динамики имплозии, а также воздействие на пенный конвертор. Результаты численного моделирования позволяют сделать предположение, что корректировка формы при достижении квазисферических имплозий эффективна, и их конечная кинетическая энергия одинакова. Недавние эксперименты на установке QiangGuang-I (1,5 MA) подтвердили, что с контролируемой первоначальной формой в квазисферическом многопроволочном лайнере можно осуществить сферическую имплозию, и качество имплозии является чувствительным к соотношению H/d (высота/диаметр нагрузки). Впервые успешно разместили сжимаемую пенную мишень в центре лайнера в качестве индикатора. Изображения, полученные в эксперименте, показывают, что устойчивые имплозии достижимы, и плазменный многопроволочный лайнер сферически действует на мишень. Однако осевое сжатие пенной мишени более интенсивное, возможно, динамическая энергия квазисферической имплозии увеличивается при возрастании длины нагрузки, в связи с этим для квазисферического Z-пинч динамического хольраума требуется пенный конвертор специального назначения (специальный пенный конвертор).

## NUMERICAL RESEARCHES OF QUASI-SPHERICAL WIRE-ARRAY IMPLOSIONS

N. Ding, H. Li, Y. Zhang, C. Xue,  
J. Huang, S. Sun, S. Wei, J. Liu

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics,  
Beijing, China

In order to increase the radiation temperature of the Z-pinch dynamic hohlraum (ZPDH), a quasi-spherical implosion has been used to concentrate its dynamic energy to the center and impact the concentric foam convertor in three dimensions. However, it difficult to practice with a wire array on the low current facility. Instead of mass modification, a new method of gaining quasi-spherical implosion via adjusting the initial load shape is developed successfully, and is found particularly feasible for wire arrays. Implosion dynamics, as well as the impact on the foam convertor, is investigated numerically. Simulation results suggest that shape-adjustment is effective in achieving quasi-spherical implosions, and their final kinetic energy is similar with each other. Recent experiments on the Qiang Guang-I facility (1.5 MA) have confirmed that, with a controllable initial shape, a quasi-spherical wire array can implode spherically, and the implosion quality is susceptible to the ratio of H/d (load height/diameter). A compressible foam target is placed successfully at the center of the array as an indicator for the first time. Experimental images show that stable implosions can be achieved and wire-array plasma impact the target spherically. However, the axial compression to the foam target is more severe, may be the dynamic energy of a quasi-spherical implosion increases with the load latitude, which calls for a special designation of foam convertor for the quasi-spherical ZPDH.

3-4

## ЭНТАЛЬПИЙНЫЕ И ЭНТРОПИЙНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ВЕЩЕСТВЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

И. Иосилевский

Объединенный институт высоких температур, МФТИ (ГУ),  
Москва, Россия

E-mail: iosilevskiy@gmail.com

Обсуждается возможность разделения изоструктурных фазовых переходов 1-го рода на два подкласса: энтальпийных и энтропийных. Основным признаком, отличающим эти подклассы, является различие «движущего» механизма, приводящего к рассматриваемому фазовому переходу (ФП), например при изотермическом сжатии. В энтальпийных ФП (например, в обычном переходе газ–жидкость) этим механизмом является выигрыш (понижение) энтальпии при конденсации пара, в то время как в энтропийных ФП, например в ионизационном (ionization-driven), напротив – выигрыш (рост) в энтропии из-за скачка ионизации. Ситуация рассмотрена на примере пары GLPT (газ–жидкость) и QHPT

(кварк–адронный) ФП в физике сверхплотной ядерной материи с высокой концентрацией энергии в сравнении с такой же парой ФП в «обычной» неидеальной плазме [1, 2]. При кажущейся эквивалентности GLPT и QHPT в координатах температура – барионный химический потенциал, оба перехода принадлежат разным подклассам: GLPT – типичный энтальпийный ФП, в то время как QHPT – это энтропийный ФП. Существенные различия в строении фазовых диаграмм и структуре их бинальных и спинодальных зон анализируются на базе сравнения обычного (Ван-дер-Ваальсового) перехода газ–жидкость с различными вариантами «делокализационных» ФП (плазменного, диссоциативного и др.) [3]. Подчеркивается принципиальная связь энтропийных ФП с другой малоизученной термодинамической аномалией – наличием зон с отрицательным знаком целого набора (обычно положительных) перекрестных термодинамических производных, таких как коэффициент Грюнайзена, термический коэффициент давления, коэффициент термического расширения и др.

### Литература

1. Iosilevskiy I. “Physics of Extreme States of Matter”, Eds. V. Fortov et al. – Chernogolovka: IPCP RAS, Russia, 2013, pp. 136–140.
2. Iosilevskiy I. Enthalpic and entropic phase transitions in high energy density nuclear matter / 4th Int. Conference on Nuclear Fragmentation (NUFRA–2013), Kemer, Turkey, October 2013.
3. Gryaznov V., Iosilevskiy I. // J. Phys. A, 42, 214007, (2009) Thermodynamics of deuterium plasma.

## ENTHALPIC AND ENTROPIC PHASE TRANSITIONS IN HIGH ENERGY DENSITY NUCLEAR MATTER

I. Iosilevskiy

Joint Institute for High Temperature  
(Russian Academy of Science),

Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
Moscow, Russia

E-mail: ilios@orc.ru

New differentiation between two separate subclasses, enthalpic and entropic, is under discussion for iso-structural 1<sup>st</sup>-order phase transitions (PT). The basic feature for such differentiation is main “driving” mechanism, which leads to this phase transformation in low-density phase at, for example, isothermal or isobaric compression. It is just decreasing of enthalpy, which is the main benefit at vapor condensation into liquid state in typical enthalpic PT of gas-liquid type, while it is benefit (increasing) in entropy, which is the main driving mechanism for typical entropic PT, for example, for ionization-driven phase transition. The basic difference between enthalpic and entropic PTs is considered on comparative analysis of contrast between two most discussing phase transition in ultra-dense nuclear matter at high energy density: namely, of gas-liquid one (GLPT) and quark-hadron type (QHPT) and similar interrelation of typical enthalpic and entropic PTs in “ordinary” non-ideal (strongly coupled) plasmas [1, 2]. Both, GLPT and QHPT, when being represented in widely accepted T- $\mu$  plane, are

often considered as similar, i.e. amenable to one-to-one mapping by simple scaling. We argue that this impression is illusive and that GLPT and QHPT belong to different classes: GLPT is typical enthalpic (VdW-like) PT while QHPT (“deconfinement-driven”) is typical entropic PT (like hypothetical ionization- and dissociation-driven phase transitions in shock compressed hydrogen and nitrogen in megabar pressure range). Principal difference in structure of phase diagrams and topology of binodal and spinodal regions between enthalpic and entropic PTs is considered and illustrated on the base of comparison of ordinary (Van-der-Waals-like) PT of gas-liquid type and different variants of “delocalization-driven” PTs like “plasma” PT, “dissociative” PT etc. (e.g. [3]). Intrinsic connection of entropic character of PT with another poorly recognized thermodynamic anomaly is stressed, namely, anomalous lost of positiveness and transition to negative sign for combination of several (infinite number, strictly speaking) second thermodynamic derivatives, such as Gruneisen coefficient, thermal pressure coefficient and isobaric thermal expansion coefficient etc.

### References

1. Iosilevskiy I., in “Physics of Extreme States of Matter”, Eds. V. Fortov et al. (Chernogolovka: IPCP RAS), Russia, 2013. – P. 136–140.
2. Iosilevskiy I. Enthalpic and entropic phase transitions in high energy density nuclear matter, 4th Int. Conference on Nuclear Fragmentation (NUFRA-2013), Kemer, Turkey, October 2013.
3. Gryaznov V., Iosilevskiy I., J. Phys. A, 42, 214007, (2009) Thermodynamics of deuterium plasma.

---

3-5

### ТЕРМОДИНАМИКА ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ ПРИ МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

В. К. Грязнов<sup>1</sup>, И. Л. Иосилевский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

<sup>1</sup>Томский национальный исследовательский университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (госунiversитет), Долгопрудный, Россия

E-mail: grvk@fcp.ac.ru

Представлены результаты новых расчетов уравнения состояния динамически сжатых водорода и гелия в мегабарном диапазоне давлений. Для вычисления уравнения состояния и термодинамических функций ударно и изэнтропически сжатых дейтерия и гелия использовалась термодинамическая модель SAHA-D, основанная на квазихимической модели плазмы. Представлено сравнение результатов расчета с новыми экспериментальными данными терапаскального диапазона давлений по ударному и квазиизэнтропическому сжатию дейтерия и гелия высокой начальной плотности и сравнение результатов расчета SAHA-D с новыми данными первопринципных расчетов дейтерия и гелия высокой плотности.

### THERMODYNAMICS OF HYDROGEN AND HELIUM AT MEGABAR PRESSURES

V. K. Gryaznov<sup>1</sup>, I. L. Iosilevskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka, Russia

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, (National Research University), Dolgoprudny, Russia

E-mail: grvk@fcp.ac.ru

New results of calculations of equation of state of dynamically compressed hydrogen and helium at megabar pressure range are presented. Thermodynamic model SAHA-D based on chemical picture was used for calculations of composition, equation of state and thermodynamic functions of shock and isentropically compressed deuterium and helium. Comparison of the calculations with new experimental results of terapascal pressure range on pre-compressed deuterium and helium of high initial density and new ab initio calculations of high density are presented and discussed.

---

3-6

### КВАНТОВЫЕ ПОПРАВКИ К КОНСТАНТАМ СКОРОСТЕЙ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ СОЛНЦА

А. Н. Старостин, М. Г. Гладуш, Ю. В. Петрушевич

Институт спектроскопии РАН (ИСАН), Троицк, Москва, Россия

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, Россия

E-mail: mglad@isan.troitsk.ru

Произведено исследование влияния квантовых эффектов на скорости реакций ядерного синтеза и на полное энергосодержание реакций протон-протонного (p-p) цикла во внутренних областях Солнца. Выполнены расчеты обобщенных констант скоростей для шести термоядерных реакций p-p цикла для центральной области:  $1\text{H}(p, e^+ \nu)2\text{H}$ ,  $2\text{H}(p, \gamma)3\text{He}$ ,  $3\text{He}(3\text{He}, 2p)4\text{He}$ ,  $3\text{He}(\alpha, \gamma)7\text{Be}$ ,  $7\text{Li}(p, \alpha)4\text{He}$ ,  $7\text{Be}(p, \gamma)8\text{B}$ . Вычисления основываются на функции распределения частиц по импульсам, представляющей собой равновесную функцию распределения с аддитивной поправкой, обусловленной принципом неопределенности Гейзенберга для энергии частиц, упруго взаимодействующих с частицами неидеальной среды, и обеспечивающей в асимптотической области степенную зависимость функции распределения от кинетической энергии. В расчетах использовались данные о составе, плотности и температуре солнечного вещества, полученные из стандартной модели Солнца. Сравнение величин классической и квантовых слагаемых констант скорости термоядерной реакции показало, что для реакций синтеза  $1\text{H}(p, e^+ \nu)2\text{H}$  и  $2\text{H}(p, \gamma)3\text{He}$  величина квантовой поправки незначительна. В то же время для реакций  $3\text{He}(3\text{He}, 2p)4\text{He}$ ,  $3\text{He}(\alpha, \gamma)7\text{Be}$ ,  $7\text{Li}(p, \alpha)4\text{He}$

и  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  квантовая составляющая скорости процесса оказывается определяющей. С учетом значительного увеличения констант произведена оценка влияния квантовых эффектов на каналы энерговыделения. Показана возможность сильного подавления процессов по ветви цикла ppI ( ${}^3\text{He}({}^3\text{He},2p){}^4\text{He}$ ), что влечет за собой изменение концентрации ионов  ${}^3\text{He}$  и, как следствие, изменение направления протекания реакций в отличие от стандартной модели. С учетом значений обобщенных констант практически все ионы  ${}^3\text{He}$ , наработанные в реакциях  ${}^2\text{H}(p,\gamma){}^3\text{He}$ , сгорают по каналам ppII и ppIII, начиная с реакции  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ . Показано, что значительные изменения констант скорости реакций для  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$  и  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  приводят к изменению концентраций соответствующих ионов  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$  при сохранении суммарной скорости реакций, которая определяется скоростью реакции  ${}^1\text{H}(p,e+\nu){}^2\text{H}$ , лежащей в основе цикла. Продемонстрирована возможность изменения парциальных и полного ядерного энерговыделения за счет изменения стационарных концентраций. Сформулированы отличия результатов проведенных расчетов от предсказаний стандартной солнечной модели с учетом близкого значения полного энерговыделения p-p цикла для измененной функции распределения частиц по импульсу в плотной плазме солнечного ядра и показана необходимость дальнейшего изучения влияния квантовых эффектов на ядерные процессы при оценке глобальных параметров солнечной модели.

#### QUANTUM CORRECTIONS TO FUSION RATES AND THEIR EFFECT IN ENERGY RELEASE PATHS FOR A DENSE PLASMA OF THE SUN

A. N. Starostin, M. G. Gladush, Yu. V. Petrushevich

Institute of spectroscopy RAS, Troitsk, Moscow, Russia

FSUE "SRC RF TRINITI", Troitsk, Moscow, Russia

E-mail: mglad@isan.troitsk.ru

We have studied the effect of quantum corrections on the rate of fusion reactions and modifications in the total energy release for the proton-proton (p-p) chain in the inner region of the Sun. We performed calculations of the generalized rate constants for six fusion reactions in the p-p chain for the central region:  ${}^1\text{H}(p,e+\nu){}^2\text{H}$ ,  ${}^2\text{H}(p,\gamma){}^3\text{He}$ ,  ${}^3\text{He}({}^3\text{He},2p){}^4\text{He}$ ,  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ . In calculations we use the particle momentum distribution which is the equilibrium distribution function with an additive correction arising due to the Heisenberg uncertainty principle for the particles interacting elastically with a non-ideal environment. The latter provides the power dependence of the distribution function on the kinetic energy in the asymptotic region. The data on the composition, density and temperature of the solar medium is taken from the standard solar model. Comparison of classical and quantum terms of the rate constants shows that for the fusion reactions  ${}^1\text{H}(p,e+\nu){}^2\text{H}$  and  ${}^2\text{H}(p,\gamma){}^3\text{He}$  the magnitude of the quantum correction is negligible. At the same time for the reactions  ${}^3\text{He}({}^3\text{He},2p){}^4\text{He}$ ,  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$  and  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  the quantum term is shown to be crucial. With the substantial increase of the rate con-

stants we show a possibility for redistribution of the energy release channels. It becomes possible that the processes in the ppI branch are suppressed greatly ( ${}^3\text{He}({}^3\text{He},2p){}^4\text{He}$ ), which gives a change in the concentration of  ${}^3\text{He}$  and subsequent change in direction of the reactions in contrast to the standard model. Given the corrected values of the generalized constants almost all  ${}^3\text{He}$  generated in reactions  ${}^2\text{H}(p,\gamma){}^3\text{He}$  is now burned in ppII and ppIII starting with  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ . It is shown that significant changes in the rate constants for the reactions  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$  and  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  may lead to changes in the concentrations of  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^7\text{Li}$  and  ${}^8\text{B}$  maintaining the total rate determined by the rate of the reaction  ${}^1\text{H}(p,e+\nu){}^2\text{H}$  which underlies the cycle. We demonstrate the possibility of changes in the partial and complete nuclear energy release due to changes in the steady-state concentrations. The differences from the predictions of the standard solar model have been formulated and discussed taking into account that the total energy release is close the standard value for the pp-chain considered with the corrected momentum distribution in the dense plasma of the solar core. We show the need for further study of the quantum effects in nuclear processes crucial in the evaluation of the global parameters used in the solar model.

3-7

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В. Б. Фокин, П. Р. Левашов,

М. Е. Поварницын, К. В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН,  
Москва, Россия

E-mail: Vladimir.Fokin@phystech.edu

Проведено численное моделирование процесса воздействия мощных фемтосекундных лазерных импульсов на металлы в рамках комбинированной модели, которая была нами разработана, чтобы корректно описать эффекты взаимодействия лазерного излучения с веществом. Мы используем модификацию подхода [1], в результате наша модель более точно учитывает поглощение лазерной энергии (путем решения уравнения Гельмгольца с заданной функцией комплексной диэлектрической проницаемости), электрон-фононное взаимодействие и электронную теплопроводность [2]. Для расчета электронной теплоемкости используется модель Томаса-Ферми, взаимодействие между ионами описывается с помощью межчастичного потенциала EAM.

Представленная комбинированная модель эффективна для теоретического исследования динамики лазерной абляции, плавления, испарения, ионизации, нуклеации, распространения ударных волн и волн разрежения, а также формирования наночастиц. В настоящей работе мы проводим моделирование абляции алюминия под действием импульса длительностью 100 фс с интенсивностью вплоть до 20 Дж/см<sup>2</sup> и находим

зависимость глубины кратера от плотности энергии лазерного излучения. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

### Литература

1. Ivanov D. S., Zhigilei L. V. Combined atomistic-continuum modeling of short-pulse laser melting and disintegration of metal films // *Phys. Rev. B.* – 2003. – V. 68. – P. 064114.
2. Povarnitsyn M. E. et al. // *Appl. Surf. Sci.* – 2012. – V. 258. – P. 9480.

### SIMULATION OF PROPERTIES OF METALS UNDER THE ACTION OF INTENSE FEMTOSECOND LASER PULSES

V. B. Fokin, P. R. Levashov,  
M. E. Povarnitsyn, K. V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures RAS,  
Moscow, Russia

E-mail: Vladimir.Fokin@phystech.edu

A numerical simulation of process of interaction of femtosecond powerful laser pulses with metals is performed using a combined model, which was developed to describe effects of laser-matter interaction correctly. We use the approach [1] with modifications, which provide more precise consideration of laser energy absorption (by solving the Helmholtz equation with a given complex dielectric function), electron-phonon coupling, and electronic heat transfer in our model [2]. The Thomas-Fermi model is used to calculate the electronic heat capacity, the inter-ions interaction is described using inter-particle EAM-potential.

This combined model is useful for theoretical investigation of the dynamics of laser ablation, melting, evaporation, ionization, nucleation, shock and rarefaction wave propagation, as well as nanoparticles formation. In the present work, we perform simulation of laser ablation of aluminum by 100 fs pulses with fluence up to 20 J/cm<sup>2</sup> and find out the ablation crater depth as a function of laser fluence. Results of modeling are in good agreement with experimental data.

### References

1. Ivanov D. S., Zhigilei L. V. Combined atomistic-continuum modeling of short-pulse laser melting and disintegration of metal films // *Phys. Rev. B.* – 2003. – V. 68. – P. 064114.
2. Povarnitsyn M. E., et al. // *Appl. Surf. Sci.* – 2012. – V. 258. – P. 9480.

[1, 2], а также электропроводности и теплопроводности в приближении времени релаксации для уравнения Больцмана [3]. Сечение электрон-ионного рассеяния, необходимое для расчета транспортных характеристик, вычисляется с использованием волновых функций свободных электронов, полученных по модели Либермана [4], реализованной в программе RESEOS [5, 6]. Результаты сравниваются с данными других авторов, а также с результатами более простой модели Ли и Мора [3]. Рассмотрена зависимость числа Лоренца, связывающего электропроводность и теплопроводность, от температуры и плотности для различных веществ. Показано, что значения электропроводности, полученные по формуле Займана и в приближении среднего времени релаксации, могут заметно отличаться.

### Литература

1. Perrot F., Dharma-Wardana M.W.C. *Phys. Rev. A* 36, 238 – 246 (1987).
2. Sterne P. A., Hansen S. B., Wilson B. G., Isaacs W.A. *HEDP* 3, 278 – 282 (2007).
3. Lee Y. T., More R. M. *Phys. Fluids* 27, 1273–1286 (1984).
4. Liberman D. A. *Phys. Rev. B* 20, 4981–4989 (1979).
5. Новиков В. Г., Овечкин А. А. // *Математическое моделирование* 22, 69 – 82 (2010).
6. Sinko G. V., Smirnov N. A., Ovechkin A. A., Levashov P. R., Khishchenko K.V. *HEDP* 9, 309–314 (2013).

### TRANSPORT PROPERTIES OF DENSE PLASMAS BASED ON AVERAGE-ATOM MODELS

A. A. Ovechkin, P. A. Loboda

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

E: mail: a.a.ovechkin@vniitf.ru

The calculations of electrical and thermal conductivities using the extended Ziman formula [1, 2] and the relaxation-time approximation for the Boltzmann equation [3] are presented. Free-electron wave functions from the Liberman model [4] implemented in the RESEOS code [5, 6] are used to evaluate the electron-ion scattering cross-sections entering transport-coefficient calculations. The results are compared with other theoretical data including the data provided by Lee-More model [3]. The dependence of thermal-to-electrical conductivity ratio (Lorentz number) on temperature and material density is considered. It is shown that the Ziman formula and the mean relaxation-time approximation can yield noticeably different conductivity values.

### References

1. Perrot F., Dharma-Wardana M. W. C. *Phys. Rev. A* 36, 238 – 246 (1987).
2. Sterne P. A., Hansen S. B., Wilson B. G., Isaacs W.A. *HEDP* 3, 278 – 282 (2007).
3. Lee Y. T., More R. M. *Phys. Fluids* 27, 1273–1286 (1984).
4. Liberman D. A. *Phys. Rev. B* 20, 4981–4989 (1979).
5. Novikov V. G., Ovechkin A.A. *Math. Models and Comp. Simulations* 3, 290 – 299 (2011).
6. Sinko G. V., Smirnov N. A., Ovechkin A. A., Levashov P. R., Khishchenko K.V. *HEDP* 9, 309 – 314 (2013).

3-8

### ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СРЕДНЕГО АТОМА

А. А. Овечкин, П. А. Лобода

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

E: mail: a.a.ovechkin@vniitf.ru

Представлены результаты расчетов электропроводности плазмы по обобщенной формуле Займана

3-9

3-10

**ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ УПРУГИХ  
И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ  
ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ НАГРЕВЕ  
И РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ СЖАТИЯ ВЕЩЕСТВА**

Н. А. Смирнов

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

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

В работе представлены расчеты из первых принципов полноэлектронным методом FP-LMTO упругих констант алюминия в случае, когда газ электронов нагрет до температур порядка десятка электронвольт, а ядра покоятся в узлах кристаллической решетки. Расчеты выполнены для нескольких сжатий алюминия в интервале плотностей  $\rho_0 \leq \rho \leq 1,6\rho_0$ . Показан нетривиальный характер изменения упругих свойств алюминия при росте электронной температуры  $T_e$ , который напрямую связан с электронной структурой этого кристалла. Приводится детальный анализ полученных результатов. Проведенные расчеты показывают, что кристалл алюминия может смягчаться либо упрочняться в зависимости от того, какие электронные оболочки алюминия возбуждены. На основе рассчитанных данных, в работе определены зависимости температуры Дебая и температуры плавления алюминия (по теории Линдемана) от  $T_e$  для различных степеней сжатия кристалла.

**AB INITIO CALCULATIONS OF THE ELASTIC  
AND THERMODYNAMIC PROPERTIES  
OF ALUMINUM CRYSTAL UNDER  
NON-EQUILIBRIUM HEATING  
AND DIFFERENT COMPRESSIONS**

N. A. Smirnov

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

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

The paper presents aluminum elastic constants from ab initio calculations with all-electron FP-LMTO method for the case when electron gas is heated to temperatures about ten electron-volts and nuclei are at rest in lattice nodes. The calculations were done for several compressions within the density range  $\rho_0 \leq \rho \leq 1.6\rho_0$ . Aluminum was shown to change its elastic properties in a non-trivial manner as the electron temperature  $T_e$  grows. This behavior is directly related to the electronic structure of the crystal. Our calculations show that aluminum either softens or hardens depending on which electron shells are excited. Calculated data were used to determine the  $T_e$ -dependencies of the Debye temperature and the melting temperature (by Lindemann theory) at different compressions. A detailed analysis of the obtained results is presented.

**О ВЛИЯНИИ УЧЕТА ПОПРАВОК ПЕРВОГО  
ПОРЯДКА К ЭНЕРГИЯМ ЭЛЕКТРОННЫХ  
КОНФИГУРАЦИЙ НА ИОНИЗАЦИОННОЕ  
РАВНОВЕСИЕ ПЛАЗМЫ МНОГОЭЛЕКТРОННЫХ  
ИОНОВ В СУПЕРКОНФИГУРАЦИОННОМ  
ПРИБЛИЖЕНИИ**

П. А. Лобода, А. А. Овечкин,  
В. В. Попова, А. А. Шадрин

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

E-mail: A.A.Shadrin@vniitf.ru

Представлены результаты расчетов статсумм ионов в суперконфигурационном приближении [1–3] и ионизационного равновесия плазмы многоэлектронных ионов, проведенных по химической модели плотной плазмы CP-SC [4–5] с учетом поправок 1-го порядка к энергиям электронных конфигураций.

Исследовано влияние учета поправок 1-го порядка к энергиям электронных конфигураций на ионизационное равновесие плазмы многоэлектронных ионов при различных способах группировки электронных оболочек в супероболочки.

**Литература**

1. Bar-Shalom A., Oreg J., Goldstein W.H., Shvarts D., Zigler A. // Phys. Rev. A. – 1989. – 40. – 3183–3193.
2. Oreg J., Bar-Shalom A., Klapisch M. // Phys. Rev. E. – 1997. – 55. – 5874.
3. Gilleron F., Pain J. C. Phys. Rev. E. – 2004. – 69. – 056117.
4. Loboda P. A., Shadrin A. A., Popova V.V. Chemical-Picture-Based Modeling of Thermodynamic Properties of Dense Multi-charged-Ion Plasmas Using the Superconfiguration Approach. Contrib // Plasma Phys. – 2009. – 49. P. 738–747.
5. Лобода П. А., Овечкин А. А., Шадрин А. А. Расчет УРС и ударных адиабат металлов по теоретическим моделям плотного ионизованного вещества с учетом оболочечных эффектов // Труды Международной конференции «XIII Ха-ритоновские тематические научные чтения», Саров, 2011. – С. 297–308.

**THE EFFECT OF THE FIRST-ORDER  
CORRECTIONS TO ELECTRON  
CONFIGURATION ENERGIES ON THE  
IONIZATION EQUILIBRIUM OF DENSE  
MULTIELECTRON-ION PLASMAS USING THE  
MODIFIED SUPERCONFIGURATION APPROACH**

P. A. Loboda, A. A. Ovechkin, V. V. Popova, A. A. Shadrin

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

E-mail: A.A.Shadrin@vniitf.ru

Using the improved version of the CP-SC model [1, 2] utilizing the modified superconfiguration approach [3–5] initially implemented with the zero-order configuration energy approximation, we present calculations of partition functions of multielectron ions and the effect of the first-order

corrections to electron configuration energies on the ionization equilibrium of dense multielectron-ion plasmas.

We also demonstrate the comparison of ion-charge distributions calculated with the accounting of the first-order corrections to the electron configuration energies and also improved by refining the definition of the supershells.

## References

1. Bar-Shalom A., Oreg J., Goldstein W.H., Shvarts D., Zigler A. // Phys. Rev. A. – 1989. – 40. – 3183–3193.
2. Oreg J., Bar-Shalom A., Klapisch M. / Phys. Rev. E. – 1997. – 55. – 5874.
3. Gilleron F., Pain J. C. Phys. Rev. E. – 2004. – 69. – 056117.
4. Loboda P. A., Shadrin A. A., Popova V. V. Chemical-Picture-Based Modeling of Thermodynamic Properties of Dense Multi-charged-Ion Plasmas Using the Superconfiguration Approach. Contrib // Plasma Phys. – 2009. – 49. – P. 738–747.
5. Loboda P. A., Ovechkin A. A., Shadrin A.A. Calculations of equations of state and Hugoniot of metals using theoretical models of dense ionized matter allowing shell structure effects // Proc. Int. Conf. “13<sup>th</sup> Khariton scientific talks”, Russia, Sarov. – 2011. – P. 297–308.

3-11

## К КИНЕТИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ ФОРМИРОВАНИЯ 3D МАГНИТОСФЕРОПОДОБНЫХ СТРУКТУР ЗАМАГНИЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

В. М. Губченко

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

Для верификации численных расчетов методами 3D PIC, развиваемых для ряда задач ФВПЭ, космической плазмы и плазменной аэродинамики, на основе кинетического уравнения Власова и уравнений Максвелла дано аналитическое линейное самосогласованное рассмотрение формирования элементарной 3D магнитосфероподобной электромагнитной (э.м.) плазменной токнесущей структуры. Формирование обусловлено индукционным диссипативным э.м. взаимодействием источника намагниченности с внешним потоком плазмы.

Внешний поток – это горячая и плотная сверхзвуковая бесстолкновительная плазма, которая замагничена внешним (ведущим) магнитным (ВМ) полем и которая характеризуется формой функции распределения частиц (ФРЧ) по скоростям. В зависимости от скорости потока выделяются «горячие» э.м. кинетические режимы, к которым относятся дозвуковые и сверхзвуковые режимы, где скорость потоков остается меньше тепловой электронной и «холодные» МГД режимы, где скорость потока становится больше тепловой электронной скорости.

По величине ВМ поля, характеризуемого критическими значениями плазменного бета потока, определяемых из решения, выделяются потоки с немагнитными заряженными частицами («Чепмен»), потоки с замагниченными электронами – немагнитными ионами («минимангнитосфера») и потоки с замагниченными электронами и ионами («Данжи»).

Решение уравнения Власова выражается через компоненты тензора диэлектрической проницаемости для пролетных частиц, формирующих «внешнюю» магнитосферу токами диамагнитной и резистивной природы. Захваченные частицы формируют «внутреннюю» магнитосферу и определяют заданный источник намагниченности с магнитодипольной и тороидальной компонентами, генерирующими широкополосное э.м. поле в потоке.

Возбужденные широкополосные электромагнитные «волновые» поля, образуют «магнитосферу» как фазированный 3D э.м. «волновой пакет». Он состоит из «излучаемых» источником и формирующим волновой конус полей, распространяющихся в областях МГД прозрачности плазмы и нераспространяющихся «неизлучаемых» волновых полей, скинированным вблизи источника из-за эффектов непрозрачности и бесстолкновительной диссипации на «резонансных» частицах плазмы. Эти эффекты определяются по положительным и отрицательным значениям квадрата показателя преломления  $N$  холодной МГД плазмы, а также по сингулярностям показателя преломления, соответствующим плазменным резонансам.

В «холодном» МГД рассмотрении описывается диссипация только в излучаемую часть поля. В кинетическом рассмотрении возможно самосогласованное описание диссипативных и поляризационных свойств потока «горячей» плазмы, связанных с временной и пространственной дисперсиями, проявляющимся в э.м. плазменных резонансах.

Черенковский резонанс в немагнитном потоке определяет широкую линию поглощения для э.м. полей линейной поляризации, возбуждаемых источником. Здесь кинетические эффекты пространственной дисперсии приводят к появлению диамагнитных и аномальных скиновых масштабов, через которые описываются 3D крупномасштабные структуры и эффект магнитного пересоединения с формированием «магнитного хвоста», и обратный эффект «диполизации». Вводимый параметр «э.м.» добротности потока  $G$ , зависящий от формы ФРЧ, определяет э.м. свойства потока пролетных частиц как проводящего металла или как поляризуемого диамагнетика.

В замагниченном ВМ полем потоке наблюдаются узкие линии резонансного поглощения полей источника. Черенковский резонанс модифицируется, а также проявляется поглощение на ионном циклотронном резонансе. Резонансы, необходимые для формирования 3D диссипативных токовых систем магнитосферы, проявляют себя по-разному для полей возбуждения с необыкновенной и обыкновенной компонентами поляризации в спектре источника. При этом кинетическое рассмотрение позволяет получить эффекты бесстолкновительного поглощения и аномальной дисперсии э.м. полей вблизи резонансов.

Ref.: <http://www.vniitf.ru/images/zst/2012/s3/3-13.pdf>.

Работа поддержана частично РФФИ (проекты No 13-02-97074 и No 14-02-00133), Программой No 22 Президиума РАН, Ведущей научной школой (проект НШ No 1041.2014.2) и Министерством образования и науки РФ (контракт No 14.Z50.31.0007).



**TO KINETIC DESCRIPTION  
OF THE 3D MAGNETOSPHERE-LIKE  
STRUCTURES FORMATIONS BY MAGNETIZED  
FLOWS OF DENSE PLASMA**

V. M. Gubchenko

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

To verify calculations by 3D PIC methods, which were developed for some problems in HED physics, space physics and plasma aerodynamic we provide on the basis of the Vlasov kinetic and Maxwell equations an analytic linear self consistent consideration of the elementary 3D magnetosphere-like electromagnetic (e.m.) current-carrying collisionless plasma (CCCP) structure. The CCCP structure formation is stipulated by inductive dissipative e.m. interaction of the magnetization source (MS) with the external plasma flow.

The external flow is a hot and dense supersonic collisionless plasma characterized by the particle velocity distribution function (PVDF) and which is magnetized by the external (guide) magnetic (GM) field. In relation to the flow velocity there are “hot” e.m. kinetic subsonic and supersonic regimes where flow velocity remains less than the thermal velocity of electrons and supersonic “cold” MHD regime where the flow velocity exceed the thermal velocity of electrons.

By the value of the GM field characterized by the critical values of critical of plasma betas determined from the solutions we single out flows with nonmagnetized charged particles (“Chapman mag.”), flows with magnetized electrons and unmagnetized ions (“minimagnetosphere”), and flows with magnetized particles (“Dungey mag.”).

Solution of the Vlasov equation is expressed via components of the tensor of the dielectric permittivity of the “flyby” particles plasma flow forming the “outer” magnetosphere by the eddy electric diamagnetic and resistive currents. Trapped particles form the “internal” magnetosphere and define a prescribed MS which can be divided on magneto-dipole and toroidal components. The MS generates a wideband e.m. field in the flow due to relative motion.

The excited wideband e.m. “wave” fields form the magnetosphere as a phased 3D e.m. “wave packet”. It consist of the fields “radiated” by the MS and forming the “wave cone”, which propagate in the regions of MHD transparency and the “nonradiating” fields skinned near the source due to the effects of nontransparency and collisionless dissipation by the “resonant” particles. These effects are defined by the positive and negative values of the squared refractive index  $N$  of the “cold” MHD plasma and via singularity of the refractive index which is related with plasma resonances.

In the cold MHD consideration, only the radiated part of dissipation can be described. In the kinetic consideration of the hot plasma flow, selfconsistent description of the non-radiative part of dissipation (resistivity) and diamagnetic properties which are related with time and spatial dispersion near plasma resonances is possible.

Cherenkov resonance in the nonmagnetized flow defines a wide absorption line for the linear polarized e.m. fields which are excited by the MS. Here, the kinetic effects

of spatial dispersion leads to the appearance of diamagnetic and skinned scales which are described by 3D large scale CCCP structures. We obtain the effects of magnetic reconnection with the formation of “magnetotail” and the opposite effect of the magnetosphere “dipolization”. We invented the parameter of the e.m. quality of flow  $G$ , which depends on the shape of the PVDF. It defines the e.m. properties of the flow of flyby particles as a metal or a diamagnetic.

In the flow magnetized by the GM field, we operate with narrow absorption lines. Cherenkov resonance is modified by the GM field and is manifested by absorption near the cyclotron resonances. The resonances are required for the formation of 3D dissipative CCCP systems, and these resonances behave differently for the ordinary and extraordinary field polarizations which are excited by the MS. Here, the kinetic approach yields the effects of collisionless absorption and anomalous dispersion of the excited fields near resonances.

Ref.: <http://www.vniitf.ru/images/zst/2012/s3/3-13.pdf>.

This work was supported in part by RFBR (projects Nos. 13-02-97074 and № 14-02-00133), the Programs No 22 of the Presidium of the RAS, by the Leading Scientific School (project NSh No 1041.2014.2) and by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under Contract No.14.Z50.31.0007.

---

3-12

**МАГНИТОАКТИВНЫЕ ЛАЗЕРНАЯ  
И АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ПЛАЗМЫ**

В. С. Беляев, А. П. Матафонов

Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения, Королев, Россия

E-mail: belyaev@tsniimash.ru

В рамках магнитной гидродинамики исследовано подобие лазерной релятивистской плазмы астрофизической плазме. Определены критерии подобия этих физических объектов. Показано, что релятивистская лазерная интенсивность ( $>10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) обеспечивает принципиально новые механизмы трансформации энергии в лазерной плазме. Среди них – генерация сверхсильных магнитных полей, образование электрон-ионных структур высокой энергии, потоков частиц и др.

Приведены результаты экспериментальных исследований ряда процессов вихревой магнитной гидродинамики в плазме, образованной воздействием на мишень лазерного излучения  $\sim 3 \times 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Показано, что в условиях генерации магнитных полей существует прямой эффективный механизм трансформации энергии вихревой электронной структуры в энергию поступательного движения электрон-ионной квазилинейной структуры.

Формирование таких структур с их сверхсильным магнитным полем также является релятивистским эффектом.

Показано, что время жизни таких структур может намного ( $>100$  раз) превышать длительность лазерного импульса.

Пинчевание магнитного поля в такой структуре приводит к высокой ( $>100$  кэВ) плазменной (ионной) температуре.

Исследована пространственная структура электронных вихрей, генерируемых в лазерной плазме, и связанных с ними магнитных полей. Показано подобие потенциальных вихрей классической гидродинамики возникающим электронным вихревым структурам. Исследованы механизмы ускорения заряженных частиц, связанные с рассматриваемой вихревой структурой и квазинейтральными электромагнитными полями, генерируемыми в лазерной плазме. Исследованы бетатронный и циклотронный резонансные механизмы ускорения электронов. Найдено, что дрейф заряженных частиц в электромагнитном поле является эффективным механизмом ускорения заряженных частиц. Предложена и исследована модель генерации высокоэнергетических потоков ионов (протонов) с аномально малой расходимостью.

Полученные результаты указывают на возможности и перспективы их использования в исследованиях термоядерных реакций. Представленные результаты экспериментов при интенсивности  $3 \times 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> хорошо согласуются с полученными теоретическими выводами.

Показано, что магнитогидродинамические процессы в лазерной плазме, реализуемые в условиях гигантских магнитных полей на микромасштабах, подобны магнитогидродинамическим процессам, наблюдаемым при слабых магнитных полях на космических масштабах.

Показаны перспективы и возможности «лазерной лабораторной астрофизики» – нового быстро развивающегося научного направления.

Работы поддержаны грантами РФФИ №№ 12-02-00489, 13-02-00878.

## MAGNETO-ACTIVE LASER AND ASTROPHYSICAL PLASMAS

V. S. Belyaev, A. P. Matafonov

Central Research Institute of Machine Building, Korolev, Russia

E-mail: belyaev@tsniimash.ru

The similarity of laser relativistic plasmas to astrophysical plasmas has been investigated in frames of magnetic hydrodynamics. The similarity criteria of these physical objects was determined. It was shown that relativistic laser intensity ( $>10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>) provides principal new mechanisms of energy transformation in laser plasma. Among them super strong quasi-stationary magnetic fields generation, production of electron-ion vortex structures, high energy particle beams formation and so on.

The results of experimental investigations of number of processes of vortex magnetic hydrodynamics in the plasmas produced by action on solid target of laser radiation intensity  $\sim 3 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> have been presented.

It has shown that in the magnetic field generation conditions there are direct effective mechanism of vortical energy of electrons transformation in the energy of their translatory motion.

Formation of such structure so much connected with it super strong quasi-stationary magnetic fields generation have also relativistic character.

It has been shown that the lifetime of such structures may be more ( $>100$  times) then laser pulse duration.

Magnetic field pinching in these structures result in high ( $>100$  keV) plasma (ion) temperature.

The spatial structure of the electron vortexes and related magnetic fields produced in laser plasmas has been investigated. Qualitative similarity of potential vortexes in classical hydrodynamics with the electron vortex structures occurs. Mechanisms of acceleration of charged particles have been investigated which are related with the above considered structure of the quasi-stationary electromagnetic fields generated in laser plasmas. The betatron and cyclotron resonance acceleration mechanisms of electron acceleration have been investigated. It was found that the particle drift presents an effective mechanism for production of high-energy charged particles. The model for the generation of high-energy ion (proton) beams with very small divergence angles has been suggested and investigated.

The obtained results indicate its possibilities and perspective for thermonuclear research. The presented results of experiments at  $3 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> intensity favour the obtained theoretical conclusions.

It is established that magneto-hydrodynamic processes in laser produced plasma realized in the conditions of huge magnetic fields on micro scale are similar of magneto-hydrodynamic processes observed in weak magnetic fields on cosmic scale.

The possibilities and perspectives of “laser laboratory astrophysics” as new quickly progressing scientific direction was shown.

This research has been supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects NN 12-02-00489, 13-02-00878.

3-13

## КОНИЧЕСКИЕ МИШЕНИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО ИНЕРЦИАЛЬНОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ (ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ)

С. Ю. Гуськов<sup>1</sup>, И. К. Красюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,  
Москва, Россия

E-mail: krasyyuk@kapella.gpi.ru

В ряду мишеней для реализации инерциального термоядерного синтеза особое место занимают конические мишени, впервые предложенные Ф. Винтербергом [1]. Конические мишени являются привлекательными ввиду простоты их изготовления и тем результатам, которые могут быть получены с их использованием. Они представляют собой полость конической формы в сплошном материале большой плотности, заполненную газообразным дейтерием или его смесью с тритием.

Газ удерживается тонкостенной плоской или выпуклой оболочкой. В процессе взаимодействия с концентрированным потоком энергии оболочка мишени движется внутрь мишени с большой скоростью, сжимая и нагревая содержащийся в мишени газ. Интерес к коническим мишеням вызван рядом причин. Во-первых, являясь частью сферического объема, конические мишени, заполненные термоядерным горючим, могут быть удобной моделью для изучения физических процессов в оболочечных сферических мишенях, которые в настоящее время нашли широкое применение в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу [2].

При этом, предположительно, процессы, протекающие в сферических мишенях, могли бы быть смоделированы с помощью конических мишеней при потоках энергии в  $\Omega/4\pi$  раз меньшей величины ( $\Omega$  – телесный угол, занимаемый конической мишенью). Во-вторых, используя коническую мишень, можно инициировать термоядерную реакцию в небольшом объеме, а, затем, использовать выделяющуюся энергию для зажигания основной массы горючего предварительно сжатой сферической мишени [3].

И, наконец, конические мишени представляют собой перспективный объект для реализации кумулятивных явлений, с помощью которых можно изучать физические свойства вещества в экстремальных условиях. В докладе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по генерации термоядерной плазмы в конических мишенях при взрывном и лазерном воздействии, начиная с 1976 г. и по настоящее время.

#### Литература

1. Winterberg F. // Plasma Phys., 1968. – 10 (1), 55.
2. Красюк И. К., Семенов А. Ю., Чарахчян А. А. Использование конических мишеней в исследованиях по инерциальному термоядерному синтезу // Квантовая электроника. – 2005. – 35(9). – С. 769–777.
3. Гуськов С. Ю. Быстрое зажигание мишеней инерциального синтеза // Физика плазмы. – 2013. – 39(1). – С. 3–59.

### CONICAL TARGETS IN RESEARCH ON INERTIAL CONFINEMENT FUSION (HISTORY AND CURRENT STATUS)

S. Y. Guskov<sup>1</sup>, I. K. Krasnyuk<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS,  
Moscow, Russia

\*E-mail: krasnyuk@kapella.gpi.ru

Among of targets for the implementation of inertial thermonuclear fusion conical target, first proposed by F. Vinterberg [1], occupy a special place. Conical targets are attractive due to their ease of fabrication and those results that can be obtained from their use. They are conically shaped cavity in a solid material of high density, filled with gaseous deuterium or mixtures thereof with tritium.

Gas is held by means of thin-walled flat or convex shell. During interaction with the concentrated energy flow the shell of the target moves inside the target with great velocity, compressing and heating the gas contained in the target. Interest in conical targets is due to several reasons. First, as part of a spherical volume, conical target filled thermonu-

clear fuel may be a suitable model for the study of physical processes in the shell spherical targets, which are currently widely used in experiments on laser fusion [2].

In this expectation, the processes occurring in spherical targets could be modeled using conical targets at energy flows in  $\Omega/4\pi$  time's smaller magnitude ( $\Omega$  – solid angle occupied by the conical target). Second, using a conical target, you can initiate a thermonuclear fusion in a small volume, and then use the released energy to ignite the pre-compressed spherical target [3].

And finally, conical targets represent a promising object for the implementation of cumulative effects that can be used to study the physical properties of matter under extreme conditions. The report presents the results of experimental and theoretical studies on the generation of fusion plasmas in conical targets under explosive and laser action, starting from 1976 year up to now.

#### References

1. Winterberg F. Achieving high-gain fusion microexplosions // Plasma Phys. 1968. – 10 (1), 55.
2. Krasnyuk I. K., Semenov A. Yu., Charakhchan A. A. Use conical targets in research on inertial thermonuclear fusion // Russian Quantum Electronics. 2005. – 35 (9). – P. 769–777.
3. Guskov S. Yu. Fast ignition of inertial confinement fusion targets // Russian Plasma Physics. – 2013. – 39 (1). – P. 3–59.

3-14

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЛАКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ОПЫТАХ НА СТЕНДЕ «МКВ-4» И ИХ РАСЧЕТНО- ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Д. О. Ананьин, А. В. Бессараб, Г. А. Бондаренко,  
А. В. Гусаков, Г. В. Долголёва, В. А. Жмайло,  
И. Н. Никитин, Е. А. Новикова, Е. А. Салатов,  
В. П. Стаценко

Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия  
E-mail: n\_yanilkina@vniief.ru

Исследования взаимодействия облака плазмы (ОП) с магнитным полем представляет интерес для многих задач физики магнитосферы. Одним из направлений этих исследований является лабораторное моделирование основных физических эффектов: как динамических, так и связанных с взаимной диффузией плазмы и магнитного поля. Ранее, в работе [1] были представлены первые результаты таких опытов, проведенных со сферическим облаком лазерной плазмы в камере «МКВ-4» установки «Искра-5». Там же были приведены некоторые результаты их расчетно-теоретического моделирования.

В данной работе приводятся результаты ряда новых экспериментов, которые уточняют и дополняют результаты работы [1]. В частности, расширен (до 1 кГс) диапазон изменения магнитного поля в камере, добавлены новые точки (в пространстве вокруг мишени) для измерений поля и потоков плазмы, добавлены результаты оптических измерений формы и размеров ОП.

Результаты экспериментов сравниваются с данными расчетов, проведенных с использованием газодинамических численных методик [2, 3]. Были рассмотрены данные о влиянии поля на форму и размеры ОП, а также на распределение яркости по его площади. Кроме того, были проведены расчеты, в которых варьировались различные модели диффузии поля в разлетающуюся плазму, в частности, модели турбулентной диффузии. Для проведения таких расчетов методики [2, 3] были дополнены блоками для расчета МГД эффектов, а также эффектов ТП (вариант  $k-\varepsilon$  модели с учетом магнитного поля [4]). По результатам такого сравнения удалось определить ряд параметров, введенных в эту полуэмпирическую модель.

### Литература

1. Бессараб А. В., Бондаренко Г. А., Долголева Г. В. и др. Исследование механизмов диффузии магнитного поля в разлетающуюся лазерную плазму // Физика плазмы. – 2007. – Т. 33, № 9. – С. 1–14.
2. Бельков С. А., Долголева Г. В. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 1992. – Вып. 1. – С. 59–61.
3. Янилкин Ю. В., Шанин А. А., Ковалев Н. П. и др. Комплекс программ ЭГАК для расчета двумерных течений многокомпонентной среды // Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов. – 1993. – Вып. 4. – С. 69–75.
4. Gubkov E. V., Zhmailo V. A., Yanilkin Yu. V. A Semi-Empirical Model for Turbulent Diffusion of Magnetic Field to Accelerated Plasma / 8thIWPCTM, Pasadena, 2001.

### RESEARCH ON INTERACTION OF A LASER PLASMA CLOUD AND MAGNETIC FIELD IN THE EXPERIMENTS ON “MKV-4” TEST BENCH AND THEIR INTERPRETATION IN THEORY AND CALCULATIONS

D. O. Ananyin, A. V. Bessarab, G. A. Bondarenko,  
A. V. Gusakov, G. V. Dolgoleva, V. A. Zhmailo,  
I. N. Nikitin, E. A. Novikova, E. A. Salatov, V. P. Statsenko  
Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research  
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia  
E-mail: n\_yanilkina@vniief.ru

Research on the interaction of the plasma cloud (PC) with the magnetic field is of special interest when solving many problems of the magnetospheric physics. One of the directions in the research is laboratory simulation of the basic physical effects, both dynamic ones and the ones related to the inter-diffusion of plasma and magnetic field. Earlier the first results of these experiments with a spherical plasma cloud in “MKV-4” chamber of “Iskra-5” facility were presented in [1]. It also described some of the outcomes of theoretical simulation and calculations.

This work shows the results of a new series of experiments that amend and replenish the results provided in [1]. In particular, the range of the magnetic field variation in the chamber is expanded (to 1 kGs), new points are added close to the target to measure the field and plasma streams; and the results of optic measurements of the PC shape and size are provided.

The results of the experiments are compared with the calculated data produced with the help of gas-dynamic numerical methods [2, 3]. The data that testify to the influence of the field on the PC shape and size were analyzed, as well as the effect on intensity distribution across its area. Besides, there were carried out the calculations where different models of the field diffusion into the plasma spread varied (in particular, the models of turbulent diffusion). To carry out these calculations, methods [2, 3] were complimented with blocks for MHD effects and TM effects calculations (a version of the  $k-\varepsilon$  model with the account for the magnetic field [4]). Using these comparative results we managed to find some parameters introduced into this semi-empirical model.

### References

1. Bessarab A. V., Bondarenko G. A., Dolgoleva G. V. et al. Research on mechanisms of magnetic field diffusion into the laser plasma spread. Plasma Physics. – 2007. – Vol. 33, № 9. – P. 1–14.
2. Bel'kov S. A., Dolgoleva G. V. // Issues of atomic science and engineering. / Ser. Mathematical Simulation of Physical Processes. – 1992. – #1. – P. 59–61.
3. Yanilkin Yu. V., Shanin A. A., Kovalev N. P. et al. A set EGAK programs to calculate 2D flows in multi-material environment. Issues of Atomic Science and Engineering, Ser. Mathematical Simulation of Physical Processes. – 1993. – # 4. – P. 69–75.
4. Gubkov E. V., Zhmailo V. A., Yanilkin Yu. V. A Semi-Empirical Model for Turbulent Diffusion of Magnetic Field to Accelerated Plasma/ 8thIWPCTM, Pasadena, 2001.

3-15

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МЕДНОЙ МИШЕНЬЮ

П. А. Лобода, Д. О. Замураев, Н. Г. Карлыханов,  
Е. А. Лобода, 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

E-mail: p.a.loboda@vniitf.ru

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 линеаризованных маффин-тин орбиталей (FP-LMTO) [2, 3] и квантово-статистической модели Либермана [4], реализованной в программе RESEOS [5, 6], а также по химической модели плазмы, построенной с использованием суперкофигурационного подхода (CP-SC) [7].

Измерения коэффициентов поглощения лазерных импульсов  $A(I_L)$  длительностью  $\tau_L = 40\text{--}50$  фс (FWHM) медной мишенью проводились на основной гармонике Ti:Sa лазера с длиной волны  $\lambda_L = 800$  нм в диапазоне интенсивностей лазерного излучения на мишени  $I_L \sim 10^{12}\text{--}10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>. Приведены результаты исследований параметров лазерного излучения, которое взаимодействовало с мишенью при интенсивностях на мишени  $I_L \sim 10^{14}\text{--}10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>. Представлено сравнение теоретических зависимостей  $A(I_L)$  с результатами измерений, проведенных в РФЯЦ–ВНИИТФ, а также в более ранних работах других авторов [8, 9]. Исследовано проявление эффекта упрочнения металлической связи меди при фемтосекундном нагреве на зависимости  $A(I_L)$ .

Показано, что (i) упрочнение металлической связи с ростом электронной температуры приводит к значительному увеличению коэффициента поглощения лазерных импульсов при длительности 150 фс и улучшению согласия с экспериментом; (ii) из-за упрочнения металлической связи слои медной мишени, поглощающие фемтосекундные лазерные импульсы, остаются в металлическом состоянии в течение более чем половины длительности лазерного импульса даже при  $\tau_L$  фс и  $I_L = 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>.

#### Литература

1. Барышева Н. М. и др. ЖВММФ, **22**, 401 (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. JQSRT, **27**, 335 (1982).
5. Новиков В. Г., Овечкин А. А. Мат. Моделирование, **22**, 69 (2010).
6. Sinko G. V., Smirnov N. A., Ovechkin A. A. et al. HEDP **9**, 309 (2013).
7. Loboda P. A., Popova V. V., Shadrin A. A. Contrib. Plasma Phys., **49**, 738 (2009).
8. Fisher D. et al. LPB **23**, 391 (2005).
9. Kirkwood S. E. et al. Phys. Rev. B, **79**, 144120 (2009).

#### THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF ABSORPTION OF FEMTOSECOND LASER PULSES IN SOLID-DENSITY COPPER

P. A. Loboda, N. G. Karlykhanov, E. A. Loboda,  
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  
E-mail: p.a.loboda@vniitf.ru

We performed theoretical and experimental studies of absorption of 800 nm normal-incidence femtosecond laser pulses by a metal copper target. Numerical simulations were performed with a modified version of the 1D ERA hydrocode [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], quantum-statistical Liberman's model [4] implemented in the RESEOS code [5, 6], and a chemical-picture-based model

of dense plasmas utilizing the superconfiguration approximation (CP-SC) [7].

The measurements of absorption coefficients  $A(I_L)$  of 40–50 fs FWHM laser pulses in copper were performed at the fundamental frequency of Ti:Sa laser in the range of laser light intensities on the target  $I_L \sim 10^{12}\text{--}10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>. The results of laser-pulse parameter characterization at  $I_L \sim 10^{14}\text{--}10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> are presented. Theoretical dependences  $A(I_L)$  are compared both to the data measured at RFNC–VNIITF and to other published experimental data [8, 9]. We also analyze the effect of metal-bond hardening in copper heated by femtosecond laser pulses on the absorption coefficients  $A(I_L)$ .

It is shown that (i) metal-bond hardening displays a pronounced effect on the absorption with growing electron temperature and drives the 150-fs modeling into better agreement with the experiment;

(ii) due to metal-bond hardening copper target layer absorbing fs-laser light remains in the metallic state more than the half-time of the total laser-pulse action even at  $\tau_L = 150$  fs and  $I_L = 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>.

#### References

1. Barysheva N. A. et al. Zh. Vychislit. Mat. I Mat. Fiz. (Sov. J. of Comput. Math. & Math. Phys) **22**, 401 (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. Liberman D. A. JQSRT, **27**, 335 (1982).
5. Novikov V. G., Ovechkin A. A. Math. Models & Comput. Simulations **3**, 290 (2011).
6. Sinko G. V., Smirnov N. A., Ovechkin A. A. et al. HEDP **9**, 309 (2013).
7. Loboda P. A., V. V. Popova, Shadrin A. A. Contrib. Plasma Phys., **49**, 738 (2009).
8. Fisher D. et al. LPB, **23**, 391 (2005).
9. Kirkwood S. E. et al. Phys. Rev. B, **79**, 144120 (2009).

---

3-16

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИШЕНЕЙ С НЕПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ НА МЕГАДЖОУЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

В. А. Лыков, М. И. Авраменко,  
Е. С. Андреев, Л. И. Ардашева, Н. Г. Карлыханов,  
М. Ю. Козманов, С. Н. Лебедев, В. А. Мурашкина,  
Г. Н. Рыкованов, В. Н. Селезнев, Л. В. Соколов,  
М. С. Тимакова, В. Е. Черняков, М. Н. Чижекков,  
А. А. Шестаков, А. Н. Шушлебин

Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия  
E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

Представлен обзор работ РФЯЦ–ВНИИТФ по моделированию мишеней с непрямым воздействием для термоядерного зажигания на мегаджоульных лазерных установках. Расчеты проводились с использованием одно- и двумерных программ радиационной газовой динамики, разработанных в РФЯЦ–ВНИИТФ [1]. По программе

СИНАРА [2] с использованием  $S_n$ -метода для моделирования переноса излучения в спектральном кинетическом приближении [3] проведены двумерные расчеты холлраума в форме мяча для игры в регби [4]. Полученные зависимости температуры и асимметрии излучения на поверхности мишени, помещенной в центр холлраума, использовались для проведения расчётной оптимизации различных типов мишеней: криогенных одно-оболочечных мишеней с аблятором из пластика и бериллия, а также некриогенных двух-оболочечных мишеней. Оптимизация проводилась по программе ЭРА (см, например [1]) с учетом переноса излучения в приближении спектральной квазидиффузии и включала выбор радиусов и толщин оболочек, состава и количества примесей в абляторах для обеспечения требуемого режима сжатия термоядерных мишеней. Требования к точности изготовления мишеней и влияние асимметрии облучения изучались с помощью двумерной программы ТИГР-ОМЕГА-3Т [1, 5]. Влияние турбулентного перемешивания на сжатие и горение двух-оболочечной мишени моделировалось по программе ЭРА с учетом турбулентного перемешивания по ке-модели [6]. Актуальность исследований обусловлена строительством в России мегаджоульной лазерной установки УФЛ-2М для термоядерного зажигания мишеней с прямым и непрямым воздействием [7].

#### Литература

1. Аврорин Е. Н. и др. «Обзор теоретических работ по ИТС, проведенных в РФЯЦ-ВНИИТФ», Сборник «Вопросы современной технической физики» под редакцией Г. Н. Рыкованова, стр. 252–276, Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск (2002).
2. В. В. Гаджиева и др., ВАНТ (серия Мат. моделирование физ. процессов) 3, 25–35, (2000)
3. А. Д. Гаджиев и др., ВАНТ (серия Мат. моделирование физ. процессов) 4, 33–46, (2003)
4. M. N. Chizhkov, et al, Journal of Physics: 244, 022073 (2010).
5. А. Н. Шушлебин и др. «Расчеты с учетом больших деформаций термоядерных мишеней непрямого облучения для лазерной установки ИСКРА-6». Доклад на Международной конференции «VIII Забабакхинские научные чтения», Снежинск, 2007 /<http://www.vniitf.ru/>
6. М. И. Авраменко. «О ке-модели турбулентности». 2-ое издание, переработанное и дополненное. Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск (2010).
7. С. Г. Гаранин. УФН, 181, 434 (2011).

#### THE NUMERICAL SIMULATIONS OF INDIRECT – DRIVE TARGETS FOR THERMONUCLEAR IGNITION ON MEGAJOULE LASERS

V. A. Lykov, M. I. Avramenko, E. C. Andreev,  
L. I. Ardasheva, N. G. Karlykhanov, M. Yu. Kozmanov,  
S. N. Lebedev, V. A. Murashkina, G. N. Rykovanov,  
V. N. Seleznev, L. V. Sokolov, M. C. Timakova,  
V. E. Chernyakov, M. N. Chizhkov,  
A. A. Shestakov, A. N. Shushlebin

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

E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

of 1D- and 2D- radiation hydrodynamic codes developed in RFNC-VNIITF [1]. The 2D- SINARA code [2] calculations with use of a  $S_n$ -method for radiation transfer in spectral kinetic approach [3] were performed for hohlraum in the form of a rugby ball [4]. The received time-dependences of temperature and radiation asymmetry on a surface of the target placed in the center of hohlraum were used for a numerical optimization of various types of targets: cryogenic one-shell targets with plastic and beryllium ablaters, and non-cryogenic two-shell targets. The optimization was performed with the use of the 1D- ERA code [1] taking into account a radiation transfer in spectral quasi-diffusion approach and included a choice of a radii and thicknesses of shells, a composition and a quantity of impurities in ablaters for maintenance of an optimum compression of thermonuclear targets. The requirements for an accuracy of manufacturing of targets and symmetry of its irradiation were studied by means of the 2D- TIGR-OMEGA-3T code [1, 5]. The influence of a turbulent mixing on a compression and thermonuclear burn of a two- shell targets was studied by the ERA code with using of ke-model for turbulent mixing [6]. The necessity of performed researches is caused by the construction of the megajoule laser “UFL-2M” in Russia to achieve a thermonuclear ignition of direct- and indirect-drive targets [7].

#### References

1. Avrorin E. N. et al. The review of theoretical works on ICF carried out at RFNC-VNIITF in «The problems of modern technical physics», 252–276, Editor: G.N.Rykovanov, Published by RFNC-VNIITF, Snezhinsk, (2002).
2. Gadzhieva V. V. et al. The SINARA code package for modeling dynamics of abnormal processes in fast reactor, VANT (A series: Mathematical modeling of physical processes), 3, 25–35, (2000) in Russian.
3. Gadzhiev A. D. et al. DS<sub>n</sub>-method with artificial dissipation and VDM-method of iteration acceleration for the numerical solution of 2D kinetic radiation transfer equations. VANT (A series: Mathematical modeling of physical processes), 4, 33–46, (2003) (in Russian).
4. Chizhkov M. N. et al. Journal of Physics: 244, 022073 (2010).
5. Shushlebin A.N. et al. Calculations taking into account the big deformations of thermonuclear targets of an indirect irradiation for laser installation ИСКРА-6, Report at International conference «VIII Zababakhin Scientific Talks», Snezhinsk, (2007) /<http://www.vniitf.ru/>
6. Avramenko M. I. “About ke-model of turbulence”, the 2-nd edition processed and added. Published by RFNC-VNIITF, Snezhinsk, (2010).
7. Garanin S. G., Physics-Uspexhi, 181, 434 (2011).

The results of numerical simulation of indirect-drive targets for thermonuclear ignition with megajoule lasers are presented. The calculations were performed with use

3-17

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯРКИХ ИСТОЧНИКОВ EUV-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЫ ОЛОВА И ЛИТИЯ

Д. А. Ким, В. Г. Новиков,  
Г. В. Долголева, А. Д. Соломянная

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

E-mail: dima83ipm@yandex.ru

Для EUV-литографии требуется яркий источник излучения с длиной волны  $13,5 \text{ нм} \pm 1\%$  [1]. Таким источником может быть, например, полученная с помощью лазера плазма некоторых веществ. Наиболее сильные линии в этом диапазоне имеют литий и олово (также в качестве источника используют ксенон). Критически важными параметрами при этом являются мощность и эффективность конверсии такого источника.

Для моделирования излучения EUV-источника требуется модель нестационарной неравновесной излучающей плазмы с учетом детальной поуровневой кинетики и переноса излучения в спектральных линиях. Такая модель построена и включена в двухтемпературный 1D Лагранжев радиационно-гидродинамический (РГД) код SND\_RUSAM, в котором поле излучения и поуровневая кинетика учитывались самосогласованным образом с детализацией в EUV-диапазоне [2–4]. Вероятности радиационных и столкновительных процессов, входящие в систему уравнений поуровневой кинетики, рассчитаны на основе атомных данных, полученных с помощью программы FAC [5], проверены с использованием банка данных NIST [6] и экспериментальных данных из Института спектроскопии РАН [7]. Детальные атомные данные были усреднены с использованием методики RUSAM [3], что позволило существенно сократить время счета. Спектральные коэффициенты поглощения и излучения вычислялись по программе THERMOS [8].

В рамках данной работы было исследовано влияние учета нестационарности системы уравнений поуровневой кинетики на спектр излучения плазмы. Получен эффект заморозки ионизации при остывании низкоплотной плазмы. Проведены расчеты с широким набором параметров лазера и мишени и определены условия оптимума эффективности конверсии.

### Литература

1. Bakshi V. "EUV source technology: Challenges and status", EUV Sources for Lithography, V. Bakshi, Ed. SPIE Press, Bellingham, WA, 3, 4–21 (2006).
2. Ким Д. А., Новиков В. Г., Долголева Г. В., Кошелев К. Н., Соломянная А. Д. Моделирование источников EUV-излучения с учетом детальной кинетики, включенной in-line в программу радиационной газодинамики // Математическое моделирование. № 7, 2013. – С. 89–102
3. 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.
4. 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. Сер. Методики и программы

численного решения задач математической физики. – Вып. 1, 1992.

5. Gu M. F. FAC: <http://kipac-tree.stanford.edu/fac>, Stanford University.

6. Ralchenko Yu., Kramida A. E., Reader J. and NIST ASD Team (2011). NIST Atomic Spectra Database (ver. 4.1.0), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2012, June 22]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

7. Tolstikhina I. Yu., Churilov S. S., Ryabtsev A. N., Koshelev K. N. Atomic Tin Data, in the book EUV Sources for Lithography, V. Bakshi, Ed., 113, SPIE Press, Bellingham, WA, 2005.

8. Nikiforov A. F., Novikov V. G. and Uvarov V. B. Quantum-statistical models of hot dense matter: methods for calculation opacity and equation of state. – Birkhauser, Basel-Boston-Berlin, 2005.

## MODELING OF BRIGHT EUV SOURCE BASED ON TIN AND LITHIUM PLASMAS

D. A. Kim, V. G. Novikov,  
G. V. Dolgoleva, A. D. Solomyannaya

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Russia, Moscow

E-mail: dima83ipm@yandex.ru

EUV-lithography requires bright EUV source with a wavelength of  $13.5 \text{ nm} \pm 1\%$  [1]. Such materials as Li, Sn, Xe can be the candidates for laser produced plasma emitting at this wavelength. Critical parameters in this case are the power and conversion efficiency of such a source.

For EUV-source simulation the model of nonstationary non-equilibrium radiative plasma with accounting for detailed level kinetics and radiation transport in spectral lines is required. This model is constructed and included in the two-temperature 1D Lagrangian radiative hydrodynamics (RHD) code, named SND\_RUSAM [2–4]. Radiation field and level kinetics are accounted self-consistently with EUV-range detailing. The probabilities of radiative and collisional processes included in the system of level kinetics equations were calculated on the basis of atomic data, obtained by applying FAC [5] code and were corrected using NIST data bank [6] and experimental data from Institute of Spectroscopy RAS [7]. Detailed atomic data were averaged using RUSAM [3] methods to reduce significantly calculation time. Spectral emissivity and absorption coefficients were calculated by means of THERMOS code [8].

Influence of level kinetics nonstationarity on radiated spectra was investigated. Freezing ionization effect for low-density cooling plasma was obtained. Calculations with a wide range of laser parameters and target types were performed and the conditions for optimum conversion efficiency were obtained.

### References

1. Bakshi V. "EUV source technology: Challenges and status", EUV Sources for Lithography, V. Bakshi, Ed. SPIE Press, Bellingham, WA, 3, 4–21 (2006).
2. Kim D. A., Novikov V. G., Dolgoleva G. V., Koshelev K. N., Solomyannaya A. D. The modeling of EUV sources by considering detailed kinetics, including in-line in the gasdynamics calculation, Mathematical Models and Computer Simulations, January 2014. – Volume 6, Issue 1. – P. 46–55.
3. 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.

4. Belkov S. A., Dolgoleva G. V. The average ion model for calculation ionization kinetics, occupancies of exited states and spectral coefficients of radiation transport in the code SINDY. Problems of Atomic Science and Technology. Methods and programs of mathematical physics tasks numerical solution. – V. 1, 1992.
5. Gu M. F. FAC: <http://kipac-tree.stanford.edu/fac>, Stanford University.
6. Ralchenko Yu., Kramida A. E., Reader J. and NIST ASD Team (2011). NIST Atomic Spectra Database (ver. 4.1.0), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2012, June 22]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
7. Tolstikhina I. Yu., Churilov S. S., Ryabtsev A. N., Koshelev K. N. Atomic Tin Data, in the book EUV Sources for Lithography, V. Bakshi, Ed., 113, SPIE Press, Bellingham, WA, 2005.
8. Nikiforov A. F., Novikov V. G., and Uvarov V. B. Quantum-statistical models of hot dense matter: methods for calculation opacity and equation of state. Birkhauser, Basel-Boston-Berlin, 2005.

3-18

**НЕПРЕРЫВНОЕ ПОДДЕРЖАНИЕ  
ПРОТЯЖЕННОЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ  
В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ  
ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРОВ  
БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА**

В. П. Зимаков, В. А. Кузнецов, Н. Г. Соловьев,  
А. Н. Шемякин, А. О. Шилов, М. Ю. Якимов

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского,  
Москва, Россия

E-mail: yakimov@lantanlaser.ru

В настоящее время происходит бурное развитие промышленных технологий твердотельных лазеров ближнего ИК-диапазона. Сочетание высокого КПД и качества излучения этих лазеров создает возможности для новых неожиданных применений, таких как генерация плотной высокотемпературной плазмы в оптических разрядах. До недавнего времени для поддержания непрерывного оптического разряда (НОР) в научных исследованиях и разработках использовались почти исключительно газовые CO<sub>2</sub>-лазеры с длиной волны 10,6 мкм. Новые возможности поддержания НОР, предоставляемые в настоящее время твердотельными лазерами диапазона 1 мкм, интересны как с практической стороны, так и с точки зрения дальнейшего изучения НОР как физического явления.

В данной работе на основе анализа широкого экспериментального материала ранних исследований НОР, а также проведенных в последние годы в ИПМех РАН экспериментов по поддержанию НОР волоконными итербиевыми лазерами в ксеноне при высоком давлении, представлены новые явления, характерные для поддержания НОР излучением лазеров ближнего ИК-диапазона.

Во-первых, было обнаружено, что пороговые мощности поддержания НОР «коротковолновым» излучением 1 мкм в ксеноне (десятки ватт) и аргоне (сотни ватт) оказались значительно ниже, чем можно было ожидать с учетом квадратичной зависимости коэффициента по-

глощения лазерного излучения в плазме от длины волны. Этот результат свидетельствует о различии механизмов поглощения лазерного излучения ближнего и среднего ИК-диапазона в плазме.

Кроме того, оказалось, что «коротковолновой» НОР стабилен в более широком диапазоне параметров фокусировки лазерного излучения ( $f/d$ ), что свидетельствует о меньшем влиянии рефракции лазерного излучения в плазме на ее формирование, и позволяет поддерживать протяженные плазменные каналы с относительным удлинением 10/1 и выше. Углубленное исследование механизмов рефракции также показало существенные отличия «коротковолнового» НОР, приводящие при определенных условиях к бистабильности плазмы, ранее не наблюдавшейся в экспериментах с НОР.

В работе также представлены оригинальные экспериментальные результаты по характеристикам плазмы НОР, полученной с помощью волоконных итербиевых лазеров в аргоне и ксеноне высокого давления.

Работа выполнена по гранту РФФИ 13-08-00141.

**CONTINUOUS SUSTAINING OF ELONGATED  
DENSE PLASMAS IN HIGH PRESSURE  
RARE GASES BY MEANS  
OF NEAR-IR LASER RADIATION**

V. P. Zimakov, V. A. Kuznetsov, N. G. Solovoyov,  
A. N. Shemyakin, A. O. Shilov, M. Yu. Yakimov

A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics,  
Moscow, Russia

E-mail: yakimov@lantanlaser.ru

At present time one can see widespread development of the industrial laser technologies based on newly designed near-IR solid-state lasers. Modern diode lasers, and to a great extent diode pumped fiber and disk lasers demonstrate perfect combination of high efficiency, high power and perfect beam quality, so that they may be successfully used also in some new unexpected fields like plasma generation in optical discharges. Up to quite a recent time high power gas discharge CO<sub>2</sub> lasers operated at 10.6  $\mu\text{m}$  were merely used for sustaining of the continuous optical discharge (COD) in scientific and R&D studies. New possibilities of sustaining COD provided now by solid-state lasers at 1  $\mu\text{m}$  band are very interesting both from practical point of view and for further studies of COD as a physical effect.

This work represents newly obtained effects specific for COD sustained by lasers of near-IR band, analyzed on the base of wide embracing earlier COD studies together with recent experimental results on sustaining COD in high pressure rare gases by ytterbium fiber lasers obtained last years in IPMech.

First, it was found that threshold laser power required for sustaining COD by a “short wavelength” laser radiation near 1  $\mu\text{m}$  in high pressure Xe (tens watts) and Ar (hundreds watts) appeared to be considerably lower, as it could be expected on the base of quadratic dependence on the wavelength of laser radiation absorption coefficients in plasma. This result revealed the importance of different plasma absorption mechanisms of mid- and near-IR laser radiation.



Then “short wavelength” COD appeared to be stable at a wider range of F-number ( $f/d$ ) of the laser beam focusing system than at mid-IR band, which indicates lower influence of laser beam refraction in plasma on plasma formation and enables to sustain extended plasma channels of relative elongation 10/1 and more. Detailed investigation of the refraction mechanisms have also revealed substantial differences of a “short wavelength” COD behavior, leading under certain condition to plasma bistability not observed previously in experiments with CODs.

Original results on COD plasma characteristics in high pressure argon and xenon obtained from recent experiments with ytterbium fiber lasers are also presented.

The work was supported by RFBR grant #13-08-00141.

---

3-19

### **ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МИШЕНЕЙ: ОТ УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНОК ДО ТОЛСТЫХ НИЗКОПЛОТНЫХ МИШЕНЕЙ**

А. В. Брантов, В. Ю. Быченко

Центр фундаментальных и прикладных исследований, ВНИИА, Росатом, Москва, Россия

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук», Москва, Россия

E-mail: brantov@sci.lebedev.ru

Вопросы повышения эффективности лазерных методов ускорения ионов привлекают повышенное внимание вот уже более десятка лет. В последнее время наметилась тенденция использования для этого сложных мишеней, таких как ультратонкие пленки с толщиной в несколько нанометров, структурированных мишеней или мишеней со структурированной передней поверхностью, низкоплотных мишеней с плотностью в несколько критических плотностей. Вместе с тем перспективы использования подобных мишеней для ускорения ионов все еще недостаточно изучены.

В представленной работе с использованием трехмерного полностью релятивистского параллельного кода «Мандор» изучено ускорение ионов из тонких фольг и малоплотных мишеней оптимальной толщины при воздействии на них лазерных импульсов релятивистской интенсивности. Энергия лазерного излучения изменялась в широком диапазоне от нескольких мДж до сотен Дж. Сначала для определенного значения энергии лазерного импульса определялась оптимальная для ускорения ионов толщина фольги (или плотность низкоплотной мишени), а затем для этих оптимальных параметров находилась энергия ускоренных ионов (протонов). Это позволило получить универсальную зависимость максимальной энергии ускоренных ионов от энергии лазерного излучения для оптимальных условий взаимодействия. Эта зависимость показывает, что в широком диапазоне мощностей лазера, энергия ускоренных протонов из мишеней с большой концентрацией водорода пропорциональна энергии лазерного излучения в степени 0,7.

Показано, что использование низкоплотных мишеней (с плотностью порядка критической плотности) позволяет поднять энергию ускоренных протонов по сравнению со случаем использования тонких фольг оптимальной толщины для той же энергии лазерного импульса. Продемонстрирована возможность увеличения энергии протонов с использованием сложных поверхностно-структурированных мишеней для лазеров умеренной энергии (до нескольких джоулей).

С использованием обновленной версии кода, учитывающей ионизацию атомов мишени лазерным полем, исследовано влияние туннельной ионизации на ускорение ионов, которое в ряде случаев приводит к повышению энергии ускоренных частиц.

Работа выполнена при частичном финансировании грантами РФФИ (проекты 13-02-00426-а, 12-02-00231-а) и грантом Президента РФ по господдержке ведущих научных школ (НШ-1424.2014.2).

### **OPTIMIZATION OF LASER PROTON ACCELERATION FROM DIFFERENT TARGETS: THIN FOILS AND LOW-DENSE TARGETS.**

A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov

Center for Fundamental and Applied Research, VNIIA, Rosatom, Moscow, Russia

P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: brantov@sci.lebedev.ru

The recent trend in laser acceleration of ions is to use an advanced modern technology for target design to increase efficiency of the laser based ion sources. The effects of utilization ultra-thin foil, micro-structured targets or targets with micro-structured front side surface, and low dense targets on ion acceleration are widely studied elsewhere.

In this paper, by using 3D PIC code MANDOR we have studied acceleration of protons from ultrathin foils and low dense targets of the optimum thickness interacting with short relativistically strong laser pulses. The laser energy was varying from several mJ to hundred joules. At first, we have been finding the optimum foil thickness or optimum low-dense target density for given energy of the laser pulse and then we have been computing corresponding energy of the accelerated protons. This allows one to derive a universal dependence of the maximum proton energy on laser energy for the optimum laser-target interaction. The obtained dependence shows that for a wide range of laser intensities the energy of accelerated protons from the targets with high concentration of hydrogen scales as the laser energy to the 0.7 power.

It has been shown that utilization of low dense target results in increase of maximum proton energy as compared to the case of optimal thickness foil. It has also been demonstrated that for moderate laser energies (upto several joules) there can be some increase in the ion energy with using of surface-structured targets.

We have studied the field ionization effect on ion acceleration with updated version of MANDOR code which includes tunnel ionization of atoms and demonstrated that in certain cases this effect increases energy of the accelerated particles.

This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grants Nos. 13-02-00426-a, 12-02-00231-a) and the Program for Supporting Leading Scientific Schools of the Russian Federation (Grant No. NSh-424.2014.2)

3-20

### УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ТОНКИХ МИШЕНЕЙ

Е. А. Говрас, В. Ю. Быченков, А. В. Брантов

Центр фундаментальных и прикладных исследований,  
ВНИИА, Росатом, Москва, Россия

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

E-mail: egovras@sci.lebedev.ru

Взаимодействие коротких мощных лазерных импульсов с твердотельными мишенями позволяет получать рекордные значения энергии ионов в лабораторных масштабах. Было показано, что существенное увеличение максимальной энергии происходит при взаимодействии лазерных импульсов с ультратонкими фольгами субмикронного масштаба. Недавние успехи в улучшении контраста лазерных импульсов и развитие технологий получения ультратонких мишеней обуславливают практический интерес к оптимизации взаимодействия лазерных импульсов с субмикронными фольгами. При таких условиях электроны фольги могут быть нагреты до МэВ-ных энергий и формируют протяженное гало вблизи ионного остова фольги. В возникающих полях разделения заряда и происходит разлет плазменного слоя в вакуум, приводящий к ускорению ионной компоненты. Очень сильное лазерное поле может даже привести к полной эвакуации электронов из тонкой мишени, и ее разлет будет проходить в режиме кулоновского взрыва.

Квазинейтральный разлет и разлет плазмы в вакуум при наличии полей разделения зарядов были подробно изучены для бесстолкновительной изотермической полубесконечной плазмы. Однако, при высоких энергиях электронов модель полубесконечной плазмы для экспериментов по облучению тонких мишеней становится неприменима: когда дебаевский радиус электронов сопоставим с толщиной фольги. Этим обусловлен интерес к построению аналитической теории разлета плазменного слоя конечной толщины в вакуум.

Выходя за рамки предыдущих исследований, мы разработали теорию разлета плазменного слоя в вакуум с бальмановскими электронами для произвольных значений их температуры, которая является управляющим параметром нашей теории и непосредственно связана с интенсивностью лазерного импульса. С ее увеличением наша теория описывает переход от квазинейтрального разлета к случаю кулоновского взрыва. Были получены энергетические характеристики ускоренных ионов для произвольных значений электронной температуры. В пределах больших и малых дебаевских радиусов

электронов результаты модели согласуются с полученными ранее результатами для квазинейтрального разлета и разлета в режиме кулоновского взрыва. Точность теории контролировалась сравнением с численным кинетическим моделированием. Мы также сопоставили полученные результаты с трехмерными кинетическими расчетами по ускорению ионов при лазерном воздействии релятивистски сильных лазерных импульсов на тонкие мишени и обнаружили качественное согласие теории с расчетами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 12-02-00231-а, 13-02-00426-а, 14-02-31407-мол\_а) и программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (грант № НШ-1424.2014.2).

### ION ACCELERATION FROM LASER-IRRADIATED THIN TARGETS

E. A. Govras, V. Yu. Bychenkov, A. V. Brantov

Center for Fundamental and Applied Research, VNIIA,  
Rosatom, Moscow, Russia

Lebedev Physics Institute, Moscow, Russia

E-mail: egovras@sci.lebedev.ru

The interaction of short intense laser pulses with solid targets allows record-breaking ion energies to be attained at the laboratory scale. It has already been shown, that significant increase of ion energy arises in laser pulse interaction with ultrathin foil. Recent improvements of the intensity contrast ratio of pulses and advances in the technology of producing ultrathin targets warrant laser pulse interaction with ultrathin foils to be of practical interest. The electrons of the foil are capable of being heated up to MeV energies and form extended halo near the ion core. This triggers plasma expansion into a vacuum that provides acceleration of ions. A strong laser field can even knock out all electrons from a thin target that causes Coulomb explosion.

Quasineutral plasma outflow and the regime of plasma expansion with charge separation effects in collisionless isothermal expansion of a semi-bounded plasma have been theoretically studied in great detail. However, at high electron energy (temperature) the model of semi-bounded plasma becomes inapplicable as far as the electron Debye length approaches the foil thickness. This is why analytical theory of expansion into a vacuum of a plasma slab with finite thickness is of high demand.

Going beyond previous studies we have developed a theory of plasma slab expansion into a vacuum with the Boltzmann's electrons for arbitrary electron temperature. The electron temperature is a controlling parameter of our theory and matches laser intensity. By increasing it our theory smoothly switches from the quasineutral expansion approach to the Coulomb explosion limit. We derived energetic characteristics of the accelerated ions for arbitrary value of electron temperature. In the limits of very small Debye radius and very large ones our theory agrees with known results for quasineutral outflow and Coulomb explosion. The validity of the theory is proven by comparison with kinetic simulations. We also compared theoretical results with 3D kinetic PIC simulations of ion acceleration triggered by relativistic laser interaction with thin foils. Qualitative agreement has been demonstrated.

This work was supported by the RFBR (Grants # 12-02-00231-a, 13-02-00426-a, 14-02-31407-mol\_a), the Program for Supporting Leading Scientific Schools of the Russian Federation (Grant # NSh-1424.2014.2).

3-21

### УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕННОЙ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЕ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ МОЩНОСТЬЮ 200 ТВт

И. В. Глазырин, А. В. Карпеев, О. Г. Котова,  
К. С. Назаров, В. В. Плохой, А. В. Потапов,  
К. В. Сафронов, А. Н. Слесарева

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

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

В лазерном кильватерном ускорителе интенсивный короткий лазерный импульс формирует плазменную волну, при этом образуется электронный пучок, распространяющийся вместе с кильватерной волной [1, 2]. Наиболее перспективной является схема самоинжекционного захвата, предполагающая взаимодействие лазерного импульса с газовой мишенью однородной плотности.

С помощью 3D3V PIC кода PICNIC численно анализируется одна из подобных схем – схема ионизационной инжекции, в которой основную роль играет ионизация полей. Электроны с внутренних оболочек рождаются вблизи максимума интенсивности, инжектируются в область ускорения и захватываются кильватерной волной. При использовании примесей другого газа процессами инжекции можно управлять [3].

В работе анализируется роль пучковых неустойчивостей, которые могут разрушить ускоряющие структуры. Исследуется отношение между характерными длинами: дифракционной, релеевской, длинами ускорения и дефазировки кильватерной структуры.

#### Литература

1. Pukhov A. and Meyer-ter-Vehn J. Laser wake field acceleration: the highly nonlinear broken-wave regime // *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 74(4):355–361, 2002.
2. Faure J., Glinec Y., Pukhov A. et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams // *Nature*. – 431(7008):541–544, 2004.
3. McGuffey C., Thomas A. G. R., Schumaker W. et al. Ionization Induced Trapping in a Laser Wakefield Accelerator. – *PRL* 104, 025004 (2010).

### ELECTRON ACCELERATION IN PLASMA WAKEFIELD USING 200 TW LASER FACILITY

I. V. Glazyrin, A. V. Karpeev, O. G. Kotova,  
K. S. Nazarov, V. V. Plokhoy, A. V. Potapov,  
K. V. Safronov, A. N. Slesareva

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

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

In a laser wakefield accelerator an intense ultrashort laser pulse generates a plasma wave and a relativistic electron beam copropagating with the wakefield is formed [1,2]. The most promising scheme is the scheme of self-injection trapping which suppose laser pulse interaction with gas target of uniform density.

One of such schemes is numerically analyzed by 3D3V PICNIC code. The scheme utilizes the ionization induced injection where the field ionization plays the main role. Electrons from inner shells were tunnel ionized near the maximum of the laser pulse and were injected into and trapped by the wake. If the impurities of different gases are used the injection process can be controlled [3].

The study of the role of beam instabilities, able to destroy the accelerating structures, is supported by theory and simulation. The relationships between the characteristic lengths are investigated: diffraction, Rayleigh, accelerating, and dephasing length of the wakefield structure.

#### References

1. Pukhov A. and Meyer-ter-Vehn J. Laser wake field acceleration: the highly nonlinear broken-wave regime // *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 74(4):355–361, 2002.
2. Faure J., Glinec Y., Pukhov A. et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams // *Nature*. – 431(7008):541–544, 2004.
3. McGuffey C., Thomas A. G. R., Schumaker W. et al. Ionization Induced Trapping in a Laser Wakefield Accelerator. – *PRL* 104, 025004 (2010).

3-22

### РАСЧЕТЫ РАЗЛЕТА ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ, НАГРЕТОЙ ПРЕДИМПУЛЬСОМ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

А. В. Карпеев, Д. С. Гаврилов, И. В. Глазырин,  
А. Г. Какшин, О. Г. Котова, Е. А. Лобода,  
Н. А. Михайлов, А. В. Потапов, К. В. Сафронов

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

E-mail: a.v.karpeev@vniitf.ru

В работе представлено численное моделирование облучения алюминиевой пластины толщиной 1 мкм лазерным импульсом мощностью  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Радиус лазерного пятна 10 мкм, длительность импульса 30 пс. Область перед мишенью заполнена азотом плотностью  $10^{-5}$  г/см<sup>3</sup>.

В численной программе учитывались: трехтемпературность (электроны, ионы, фотоны), электронная теплопроводность описывалась спитцеровским выражением, для энерговыделения рассчитывалась процедура трассировки лазерного импульса с механизмом обратного-тормозного поглощения. Для переноса излучения решались диффузионные уравнения с табулированными коэффициентами поглощения. Уравнения состояния использовались широкодиапазонные, позволяющие учитывать переход от твердого тела к газовому состоянию с учетом ионизации вещества. Магнитное поле не учитывалось.

Получены двумерные распределения газодинамических величин – плотности, температур, средней степени ионизации и т. д. Эти результаты позволяют проанализировать экспериментальные данные по разлету плазмы на предимпульсе лазера. В будущем результаты будут использоваться PIC-кодом для расчетов переноса быстрых частиц при взаимодействии основного лазерного импульса с веществом.

#### NUMERICAL SIMULATION OF SOLID TARGET EXPANSION HEATED BY LASER PREPULSE

A. V. Karpeev, D. S. Gavrilov, I. V. Glazyrin,  
A. G. Kakshin, O. G. Kotova, E. A. Loboda,  
N. A. Mikhaylov, A. V. Ponapov, K. V. Safronov

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

E-mail: a.v.karpeev@vniitf.ru

The simulation of  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> laser beam illuminating a 1  $\mu$ m aluminum plate has been performed. The radius of the laser spot is 10  $\mu$ m, and the pulse duration is 30 ps. The region in front of the target is filled by nitrogen with density of  $10^{-5}$  g/cm<sup>3</sup>.

In the numerical code has been accounted: three (electron, ion and photon) temperatures treatment, the Spitzer model to describe electron-ion equilibration, ray tracing coupled with the process of inverse bremsstrahlung for the laser energy deposition, the radiation transfer with the tabulated opacities, wide range equations of state accounting the transition from solid to gas state and the ionization. Magnetic field is not accounted.

2D distributions of hydrodynamic values (density, temperature, average stage of ionization, etc) have been simulated. One can allow to analyze the experimental data on plasma expansion during laser prepulse. In the future these results would be taken to calculate fast particle transport due to the interaction of main laser pulse with the target using PIC code.

3-23

#### ГЕНЕРАЦИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ В (P,N)- И (D,N)-РЕАКЦИЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УСКОРЕННЫХ ЛАЗЕРОМ ЧАСТИЦ

К. В. Сафронов, Д. А. Вихляев, Д. С. Гаврилов,  
С. А. Горохов, А. Г. Какшин, А. В. Липин, Е. А. Лобода,  
С. Н. Пахомов, А. В. Потапов, А. В. Савельев,  
П. А. Толстоухов, В. А. Флегентов

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

В последние годы растет интерес к генерации быстрых нейтронов под действием лазерно-ускоренных частиц. Лазерный источник нейтронов для некоторых применений обладает рядом преимуществ: высокой яркостью (из-за малых размеров и короткой длительности), возможностью получения частиц с энергиями свыше 14 МэВ, а также радиационной чистотой из-за отсутствия трития. Такой источник может быть использован для резонансной нейтронной спектроскопии [1], калибровки диагностик для установок инерциального термоядерного синтеза [2], обнаружения специальных материалов в закрытых транспортных контейнерах [3] и др.

На пикосекундной лазерной установке в РФЯЦ–ВНИИТФ [4] проведены эксперименты по генерации нейтронов в двойных мишенях: ионы, ускоренные с тыльной поверхности первичной мишени, при взаимодействии с вторичной мишенью (кэтчером) вызывали ядерные реакции с образованием нейтронов. В экспериментах изучались следующие конфигурации первичных (вторичных) мишеней:  $H_8C_{10}O_4$  (LiF),  $CD_2$  (LiF) и  $CD_2$  (LiD). Нейтроны регистрировались сцинтилляционными детекторами методом затянутой регистрации [5] и методом времени пролета. Кроме того, количество реакций  ${}^7Li(p,n){}^7Be$  восстанавливалось по измерениям активности облученных кэтчеров в окрестности линии 479 кэВ.

В экспериментах зарегистрированы нейтроны с энергией свыше 10 МэВ, что является свидетельством реакции  ${}^7Li(d,n){}^8Be$ . Суммарный выход превысил  $5 \cdot 10^8$  нейтронов/выстрел.

#### Литература

- Higginson D. P. et al. Laser generated neutron source for neutron resonance spectroscopy // Phys. Plasmas 17, 2010. – 100701.
- Welch D. R., Kislev H. and Miley G. H. Tertiary fusion neutron diagnostic for density-radius product and stability of inertial confinement fusion // Rev. Sci. Instrum. – 1988. – 59, 610.
- Buffler A. Contraband detection with fast neutrons. Rad. Phys. Chem. – 2004. – 71, 853.
- Гаврилов Д. С. и др. Забабахинские научные чтения: сборник материалов. – 2012. – С. 136.
- Горбачев В. М. и Замятин Ю. С. Определение интенсивности кратковременных импульсов быстрых нейтронов // Атомная энергия. – 1957. – № 8. – С. 101.

**FAST NEUTRON PRODUCTION  
FROM (P,N) AND (D,N) REACTIONS  
DRIVEN BY LASER-ACCELERATED PROTONS  
AND DEUTERONS**

K. V. Safronov, D. A. Vikhlyayev, D. S. Gavrilov,  
S. A. Gorokhov, A. G. Kakshin, A. V. Lipin,  
E. A. Loboda, S. N. Pakhomov, A. V. Potapov,  
A. V. Saveliev, P. A. Tolstoukhov, V. A. Phlegentov  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia  
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia  
E-mail: dep5@vniitf.ru

Attention to generation of fast neutrons under the action of laser accelerated particles is increasing over the last years. There are some advantages of such neutron source: high brightness (because of small source size and short pulse duration), high particle energy (over 14 MeV) and radiation purity. Laser neutron sources have potential applications for neutron-resonance spectroscopy [1], calibration of diagnostics for ICF facilities [2], non-destructive inspection of cargo containers for special nuclear materials [3] and others.

Experiments on fast neutron generation were carried out at a picosecond laser facility in RFNC–VNIITF [4] using double (pitcher – catcher) targets: laser accelerated ions from the first (pitcher) target interact with the second (catcher) target and cause neutron nuclear reactions. Several combinations of pitcher (catcher) targets were tested during experiments:  $H_8C_{10}O_4$  (LiF),  $CD_2$  (LiF) and  $CD_2$  (LiD). In this experimental series, on-target intensity of laser pulse exceeded  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>. Time-of-flight method and delayed registration method were used for neutron detection. In addition, the yield of  ${}^7Li(p,n){}^7Be$  reactions was estimated from measurement of irradiated catchers activity at 479 keV.

Fast neutrons with energies of over 10 MeV were detected during experiments. This proved  ${}^7Li(d,n){}^8Be$  reaction. Overall neutron yield exceeded  $5 \cdot 10^8$  shot<sup>-1</sup>.

гии, перестают адекватно описывать наблюдаемые явления [1].

В данной работе разработана и реализована новая континуальная модель нагрева ультрадисперсной среды в поле лазерного или корпускулярного излучения, а также ее охлаждения с учетом течений ее компонент в 2D осесимметричной геометрии. В основе данной модели лежит предположение, что давление в системе остается постоянным и равно давлению атмосферы инертного газа, в среде которого осуществляется процесс спекания. В данной модели учтены процессы плавления и кристаллизации, релаксация компонент к внешнему давлению, движение расплава под действием силы тяжести и капиллярных сил. Для описания состояния конденсированной фазы используются широкодиапазонные уравнения состояния. Система уравнений включает уравнения непрерывности для компонент (твердотельной фазы, расплава и инертного газа), уравнения для внутренней энергии и уравнение движения для расплава.

Проведены численные исследования формирования температурных полей в ультрадисперсной среде и динамики объемной доли конденсированной фазы в процессе нагрева и охлаждения. Показано, что движение расплава под действием силы тяжести является определяющим фактором в формировании фазового состава (конденсированная фаза и газовые поры). Роль капиллярных сил проявляется на границе расплава и твердотельной фазы и заключается в интенсивном заполнении пор расплавом.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (№ 130800037-а).

**Литература**

1. И. В. Шишковский // Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.

**MODELING OF POWDER MEDIUM EVOLUTION  
DURING LASER SYNERGING**

V. V. Pogorelko, A. P. Yalovets

South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia  
E-mail: vik\_ko83@mail.ru, yalovets.alex@rambler.ru

In recent years the technology of volumetric products laser synthesis are intensively developing [1]. One of the most perspective applications is a method of selective laser sintering. There are large temperature gradients ( $10^3$ – $10^4$  K/m), high heating and cooling rates ( $10^3$ – $10^6$  K/s), as well as plasma-chemical phenomena in case of laser irradiation during selective laser sintering. Under these conditions classical approaches and models used in powder metallurgy cease adequately describe the observed phenomena [1].

In this paper we have developed and implemented new continuum model of heating and cooling for ultradispersed medium in time of laser or corpuscular irradiation. The basis of this model is the assumption that pressure in the system remains constant and equal to pressure of ambient inert gas used for sintering. This model takes into account melting and crystallization processes, relaxation of medium to external pressure, movement of the under the force of

3-24

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ  
ПОРОШКОВОЙ СРЕДЫ В ПРОЦЕССЕ  
ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ**

В. В. Погорелко, А. П. Яловец

Южно-Уральский государственный университет,  
Челябинск, Россия

E-mail: vik\_ko83@mail.ru, yalovets.alex@rambler.ru

В последнее время во всем мире интенсивно ведутся исследования по созданию технологий послойного лазерного синтеза объемных изделий [1]. Одним из наиболее перспективных способов реализации данной технологии является метод селективного лазерного спекания. При лазерном воздействии в процессе селективного лазерного спекания наблюдаются большие градиенты температур ( $10^3$ – $10^4$  К/м), высокие скорости нагрева и охлаждения ( $10^3$ – $10^6$  К/с), а также плазмо-химические явления. Классические подходы и модели, применяемые в порошковой металлур-

gravity and action of capillary forces. The wide-range equation of state is used to describe condensed phase. The system of equations is written for 2D cylindrical geometry and includes continuity equation for components (solid phase, melt and inert gas), equation for internal energy and equation of motion for melt.

Numerical studies of the formation of temperature fields in ultradispersed medium and dynamics of the volume fraction of condensed phase in the process of heating and cooling were performed. It is shown that the movement of melt under the force of gravity is the determining factor in the formation of phase composition (condensed phase and gas pore). The role of capillary forces manifests at the boundary of melt and solid phase. This role is an intensive filling of pores by melt.

This work was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 130800037-a).

#### References

1. I. V. Shishkovsky // Laser synthesis of functionally graded mesostructures and volumetric products. – M.: FIZMATLIT, 2009.

3-25

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРНЫХ ЯДЕР ИЗЛУЧЕНИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

М. Б. Агранат, А. В. Овчинников, В. П. Петровский,  
А. Б. Савельев-Трофимов, А. А. Юркевич, О. В. Чегонов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Объединенный институт высоких температур Российской  
академии наук» (ОИВТ РАН), Москва, Россия

E-mail: oleg.chefonov@gmail.com

В работе обсуждаются возможности возбуждения атомных ядер на низколежащие изомерные состояния излучением лазерной плазмы и вопросы диагностики как собственного излучения горячей лазерной плазмы, так и излучения, связанного с девозбуждением изомерного уровня. Возбуждение изомерных ядер осуществлялось рентгеновским и корпускулярным излучением плазмы, созданной на поверхности твердотельной мишени мощным фемтосекундным лазерным излучением с интенсивностью  $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>. Экспериментально измерены спектры электронов, образованных вследствие релаксации низколежащего изомерного состояния  $3/2^-$  (14,41 кэВ; 98 нс) в основном при облучении внешней мишени, содержащей ядра изотопа  $^{57}\text{Fe}$ , и изомерного состояния  $9/2^-$  (6,24 кэВ; 6,05 мкс) при облучении мишени из  $^{181}\text{Ta}$ .

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ISOMERIC NUCLEI EXCITATION BY FEMTOSECOND LASER-PRODUCED PLASMA RADIATION

O. V. Chefonov, M. B. Agranat, A. V. Ovchinnikov,  
V. P. Petrovsky, A. B. Savel'ev-Trofimov, A. A. Yurkevich

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy  
of Sciences (JIHT), Moscow, Russia

E-mail: oleg.chefonov@gmail.com

The possibility of atomic nuclei excitation to low-lying isomer states and diagnostic problems of hot laser plasma self-radiation as well as radiation associated with the de-excitation of isomer level are discussed in this paper. Excitation of isomer nuclei by radiation of plasma generated at the surface of the solid target by high-power femtosecond laser radiation with intensity of  $10^{17}$  W/cm<sup>2</sup> was performed. Electron spectra produced as a result of relaxation of the low-lying isomer state  $3/2^-$ , (14.41 keV, 98 ns) by irradiating target containing nuclei of the isotope  $^{57}\text{Fe}$  and of relaxation of the isomeric state  $9/2^-$  (6.24 keV, 6.05  $\mu\text{s}$ ) by irradiating the  $^{181}\text{Ta}$  target are measured experimentally.

3-26

### КРИВЫЕ ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ НА ОСНОВЕ ПЕРВОПРИНЦИПНЫХ РАСЧЕТОВ

Д. В. Минаков\*, П. Р. Левашов

Объединенный институт высоких температур РАН,  
Москва, Россия

Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный, Россия

E-mail: \*minakovd@inbox.ru

В данной работе мы с помощью первопринципных расчетов [1] воспроизвели кривые плавления некоторых металлов до 20 Мбар. Для расчета термодинамических свойств кристаллической фазы использовалось квазигармоническое приближение, а для построения кривых плавления — критерий Линдемана [2]. В продолжение более ранних исследований [3, 4] нами также было исследовано влияние температуры электронной подсистемы на положение кривой плавления на фазовой диаграмме. Оказалось, что температура плавления возрастает с ростом электронной температуре на изохоре нормальной плотности; на изохорах более высокой плотности, однако, температура плавления может вести себя немонотонно в зависимости от электронной температуры.

Расчеты были выполнены для алюминия, меди и золота. Полученные результаты отлично совпадают с доступными экспериментальными данными.

#### Литература

1. Kresse G., Hafner J. // Phys. Rev. B. – 1993. – V. 47. – P. 558.
2. Lindemann F.A. // Phys. Z. – 1910. – V. 11. – P. 609.
3. Recoules V., Clerouin J., Zerah G., Anglade P.M., Mazevet S. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 96. – P. 055503.
4. Loboda P.A., Smirnov N.A., Shadrin A.A., Karlykhanov N. G. // High Energy Density Physics. – 2011. – V. 7. – P. 361.

### MELTING CURVES OF METALS IN QUASI-HARMONIC APPROXIMATION BY AB INITIO CALCULATIONS

D. V. Minakov\*, P. R. Levashov

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia  
Moscow Institute of Physics and Technology,  
Dolgoprudny, Russia  
E-mail: \*minakovd@inbox.ru

In this work we reproduced melting curves for some metals up to 20 Mbar using *ab-initio* pseudopotential density functional theory calculations [1]. We applied the quasi-harmonic approximation to determine thermodynamic properties and the Lindemann criterion [2] to build melting curves. We also investigated the influence of electron temperature on the location of melting curves on the phase diagram in continuation of earlier studies [3, 4]. It turned out that the melting temperature increased with the rise of electron temperature at normal density; at isochores of higher density, however, non-monotonic behavior of the melting temperature vs. electronic one observed.

Calculations were performed for aluminum, copper and gold. Results of our calculations agreed excellently with available experimental data.

#### References

1. Kresse G., Hafner J. // Phys. Rev. B. – 1993. – V. 47. – P.558.
2. Lindemann F.A. // Phys. Z. – 1910. – V. 11. – P. 609.
3. Recoules V., Clerouin J., Zerah G., Anglade P.M., Mazevet S. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 96. – P. 055503.
4. Loboda P.A., Smirnov N.A., Shadrin A.A., Karlykhanov N.G. // High Energy Density Physics. – 2011. – V. 7. – P. 361.

---

3-27

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Д. К. Ильницкий<sup>1</sup>, Н. А. Иногамов<sup>2</sup>,  
В. В. Жаховский<sup>1</sup>, К. П. Мигдал<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт  
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт Теоретической Физики им. Л. Д. Ландау,  
Черноголовка, Россия

E-mail: denisilnitskiy@gmail.com

Генерация ударных волн ультракороткими лазерными импульсами позволяет исследовать поведение металлов вблизи атомных пределов прочности относительно упруго-пластических деформаций и откольного разрушения. При таких воздействиях достигается очень большая скорость деформации – до  $10^9$ – $10^{10}$  с<sup>-1</sup>. В данной работе приведены результаты моделирования деформаций металлов при фемтосекундном лазерном воздействии с учетом образования двухтемпературного состояния среды, электронной теплопроводности, электрон-ионных столкновений, широкодиапазонного уравнения состояния и различных моделей упруго-пластических превращений. Проведено сравнение результатов

моделирования с экспериментальными данными и молекулярно-динамическими расчетами.

### MODELING OF PLASTO-ELASTIC DEFORMATION OF METALS UNDER FEMTOSECOND LASER IMPACT

D. K. Ilnitskiy<sup>1</sup>, N. A. Inogamov<sup>2</sup>,  
V. V. Zhakhovsky<sup>1</sup>, K. P. Migdal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Landau Institute of Theoretical Physics, Chernogolovka, Russia

E-mail: denisilnitskiy@gmail.com

Generation of shock waves by ultra short laser pulses permits to investigate the behavior of metals near strength atomic limits of relatively plasto-elastic deformations and spall destruction. With such impacts, a very high strain rate is achieved – up to  $10^9$ – $10^{10}$  s<sup>-1</sup>. This work gives the results of modeling of metal deformation under femtosecond impact with regard for the formation of two-temperature medium state, electron heat conductivity, electron-ion collisions, wide-range equation of state and various models of plasto-elastic transformations. We compared the results of modeling with experimental data and molecular-dynamic calculations.

---

3-28

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С УСКОРЕНИЕМ ИМПУЛЬСНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

С. Л. Роузкалл

Лос-Аламосская Национальная Лаборатория, Лос-Аламос,  
Нью-Мексико, США

Компьютерное и численное моделирование экспериментов, в которых лайнер с конденсированным веществом, ускоряется импульсным генератором, является эффективным средством проектирования и анализа. Уровень сложности может отличаться в зависимости от цели моделирования. Уравнения схемы импульсного генератора, в которых нагрузка лайнера обозначается как переменная индуктивность и сопротивление, решаются простейшими способами. Уравнения импульса и сохранения энергии нагрузки упрощаются за счет постоянной однородной массы, движущейся только радиально, и сводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям (ОДУ). Эта модель нулевой размерности подходит для предварительного анализа, в ходе которого определяются параметры оптимального функционирования системы. При более сложной обработке в процессе моделирования уравнения схемы сохраняют вид обыкновенных дифференциальных уравнений для импульсного генератора. Однако, нагрузка представлена на дискретной сетке. Здесь необходимо решить частные дифференциальные уравнения резистивной магнитной гидродинамики. В данной работе представлены результаты моделирования недавно проведенных и запланированных экспериментов с ускорением импульсным генератором.

## COMPUTER MODELING OF PULSED POWER EXPERIMENTS

C. L. Rousculp

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA

Computer modeling and simulation of pulsed power driven condensed matter liner experiments is a powerful tool for design and analysis. The level of sophistication can vary depending on the goal of the modeling. The simplest methods solve the circuit equations of the driver with the liner load represented as a variable inductance and resistance. A constant uniform mass with only radial motion simplifies the momentum and energy equations of the load into ordinary differential equations (ODE). This zero dimensional model is suitable for scoping studies to identify parameters for optimum performance of a system. A more sophisticated modeling treatment retains the circuit equations as ODE's for the driver. However the load is represented on a discrete mesh. There the partial differential equations of resistive MHD are solved. We present here the modeling results of recently conducted and planned pulsed-power experiments.

3-29

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ В ПЛАЗМЕ Z-ПИНЧА ПРИ ТОКАХ СВЫШЕ 2 МА

А. В. Шишлов<sup>1</sup>, Б. М. Ковальчук<sup>1</sup>, В. А. Кокшенев<sup>1</sup>,  
Н. Е. Курмаев<sup>1</sup>, А. Ю. Лабетский<sup>1</sup>, Н. А. Ратахин<sup>1</sup>,  
Ф. И. Фурсов<sup>1</sup>, Р. К. Чердизов<sup>1</sup>, D. Klir<sup>2</sup>, J. Cikhardt<sup>2</sup>,  
J. Kravarik<sup>2</sup>, P. Kubes<sup>2</sup>, K. Rezac<sup>2</sup>, O. Sila<sup>2</sup>, H. Orcikova<sup>3</sup>,  
K. Turek<sup>3</sup>, Г. Н. Дудкин<sup>4</sup>, Б. А. Нечаев<sup>4</sup>, В. Н. Падалко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
Томск, Россия

<sup>2</sup> Чешский технический университет в Праге, Факультет  
электротехники, Прага, Чешская Республика

<sup>3</sup> Институт ядерной физики, Академия наук Чешской  
Республики, Прага, Чешская Республика

<sup>4</sup> Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: ash@ovpe2.hcei.tsc.ru

Эксперименты с дейтериевыми газовыми лайнерами проводились на генераторе ГИТ-12, который работал в режиме прямого вывода энергии (4,7 МА, 1,7 мкс). Были исследованы несколько конфигурации многокаскадных нагрузок. Наиболее эффективной конфигурацией с точки зрения генерации нейтронов является нагрузка, состоящая из дейтериевого газового лайнера, окруженного плазменной оболочкой. Плазменная оболочка из ионов водорода и углерода формировалась с помощью 48 плазменных пушек, которые располагались на диаметре 350 мм. Внешняя и внутренняя оболочки двухкаскадного дейтериевого лайнера имели диаметры 80 и 30 мм соответственно. Полная масса дейтериевого лайнера варьировалась в пределах от 50 до 120 мкг/см, что обеспечивало время имплозии в интервале от 600 до 750 нс при пиковых токах им-

лозии 2,3-3,0 МА. Данный тип нагрузки позволил получить максимальный выход нейтронов в DD-реакции  $Y_n = (2,9 \pm 0,3) \times 10^{12}$  означает, что зависимость выхода нейтронов от пикового тока генератора для дейтериевых лайнеров  $Y_n \propto I^4$  продлена до токов порядка 3 МА.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №13-08-00479-а, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы импульсной сильноточной электроники», а также грантов GACR (Grant No. P205/12/0454), MSMТ (Project No. LH 13283 и LG 13029), IAEA (Grant No. RC 17088).

## EXPERIMENTAL STUDIES OF NEUTRON GENERATION IN Z-PINCH PLASMA AT CURRENTS ABOVE 2 MA

A. V. Shishlov<sup>1</sup>, B. M. Kovalchuk<sup>1</sup>, V. A. Kokshenev<sup>1</sup>,  
N. E. Kurmaev<sup>1</sup>, A. Yu. Labetsky<sup>1</sup>, N. A. Ratakhin<sup>1</sup>,  
F. I. Fursov<sup>1</sup>, R. K. Cherdizov<sup>1</sup>, D. Klir<sup>2</sup>, J. Cikhardt<sup>2</sup>,  
J. Kravarik<sup>2</sup>, P. Kubes<sup>2</sup>, K. Rezac<sup>2</sup>, O. Sila<sup>2</sup>,  
H. Orcikova<sup>3</sup>, K. Turek<sup>3</sup>, G. N. Dudkin<sup>4</sup>,  
B. A. Nechaev<sup>4</sup>, V. N. Padalko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical  
Engineering, Prague, Czech Republic

<sup>3</sup> Nuclear Physics Institute, Academy of Science  
of Czech Republic, Prague, Czech Republic

<sup>4</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
Tomsk, Russia

E-mail: ash@ovpe2.hcei.tsc.ru

Experiments with deuterium gas-puffs were carried out on the GIT-12 generator operated in a direct drive mode (4.7 MA, 1.7  $\mu$ s). Several multi-shell load configurations have been studied. From the point of view of neutron production, the most efficient load consisted from a deuterium gas-puff surrounded by a plasma shell. The plasma shell of hydrogen and carbon ions was formed with the help of 48 plasma guns at the diameter of 350 mm. Outer and inner shell diameters of the double-shell deuterium gas-puff were 80 and 30 mm, respectively. The total mass of deuterium gas-puff was varied from 50 to 120  $\mu$ g/cm providing the implosion time in the interval from 600 to 750 ns at the peak implosion current 2.3-3.0 MA. This load provided the peak neutron yield from DD reactions  $Y_n = (2.9 \pm 0.3) \times 10^{12}$  at the peak implosion current of 2.7 MA. In comparison with triple-shell deuterium gas-puff, the neutron yield increased by an order of magnitude. In the high yield shots, the neutrons with energies up to 15 and 22 MeV were registered by the TOF detectors in the radial and axial directions, respectively. A stack of CR-39 detectors registered up to 51 MeV deuterons (or up to 38 MeV protons) on the z-pinch axis. The experimental data suggest that the high neutron yields were caused not only by higher energies of deuterons but also by their magnetization inside plasmas. The reached neutron yield of  $(2.9 \pm 0.3) \times 10^{12}$  neutrons means that the scaling law of deuterium z-pinch  $Y_n \propto I^4$  was extended to 3 MA currents.

This work was supported by the by the RFBR (Project No. 13-08-00479-a), by the Program for Basic Research of the Presidium of RAS «Fundamental problems



of pulsed high-current electronics», by the GACR (Grant No. P205/12/0454), by the MSMT (Project No. LH 13283 and LG 13029), and by the IAEA (Grant No. RC 17088).

3-30

### СЖАТИЕ ДЕЙТЕРИЕВЫХ ЛАЙНЕРОВ НА ГЕНЕРАТОРЕ МИГ

С. А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, Томск

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

На сильноточном генераторе (МИГ 1 МВ, 1,5 МА, 80 нс) проведены эксперименты по сжатию дейтериевых газовых лайнеров. Определялось влияние начальной конфигурации лайнера на выход нейтронов DD синтеза. Применялись одно- и двухкаскадные лайнеры с различными начальными радиусами каскадов. В части выстрелов динамика сжатия лайнера стабилизировалась применением обратного токопровода спиральной конфигурации. Эксперимент показал, что выход нейтронов практически не изменяется при увеличении финальной скорости двухкаскадного лайнера с  $6 \cdot 10^7$  см/с до  $1 \cdot 10^8$  см/с, но он увеличивается с  $(1-5) \cdot 10^9$  для однокаскадного лайнера до  $(1-3) \cdot 10^{10}$  для двухкаскадного лайнера. Стабилизация лайнера спиральным обратным токопроводом снижает выход нейтронов из двухкаскадного лайнера с  $(1-3) \cdot 10^{10}$  до  $(2-5) \cdot 10^9$ . Эти результаты подтверждает сформировавшиеся в результате теоретических и экспериментальных исследований представление о том, что при токе пинча менее 10 МА нейтроны имеют не термоядерное происхождение, а генерируются в основном за счет ускорительно-мишенного механизма в результате развития перетяжек.

### DEUTERIUM GAS-PUFF LINER IMPLOSIONS ON THE MIG GENERATOR

S. A. Sorokin

Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia, Tomsk

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Experiments with deuterium gas-puff liner implosions have been performed on the MIG generator (1 MV, 1.5 MA, 80 ns). Single shell and double shell liners with different initial radii were imploded to generate DD fusion neutrons. A helical current return was used in some of shots to stabilize the liner implosions. The neutron yield was not raised by changing the implosion velocity of the double shell liners from  $6 \cdot 10^7$  cm/s to  $1 \cdot 10^8$  cm/s, but it was increased from  $(1-5) \cdot 10^9$  for the single shell shots to  $(1-3) \cdot 10^{10}$  for the double shell shots. The neutron yields of  $(1-3) \cdot 10^{10}$  with a straight current return and  $(2-5) \cdot 10^9$  with a helical current return were measured. The results of the experiments reconfirm the ideas formed as a result of theoretical and experimental studies that, at pinch currents lower than 10 MA, the neutrons produced in deuterium liner implosions have not thermonuclear origin, but are generated by a beam-target mechanism in constrictions formed as a result of  $m = 0$  instability developing.

3-31

### ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ПО НИМ СУБМИКРОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА ТОКА С ЛИНЕЙНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ БОЛЬШЕ 1 МА/СМ

С. И. Ткаченко<sup>1,2</sup>, Е. В. Грабовский<sup>3</sup>, П. В. Сасоров<sup>4</sup>,  
Г. М. Олейник<sup>3</sup>, В. В. Александров<sup>3</sup>, Ю. Г. Калинин<sup>5</sup>,  
О. Г. Ольховская<sup>4</sup>, К. В. Хищенко<sup>2</sup>, П. Р. Левашов<sup>2</sup><sup>1</sup> Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный, Россия<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
Москва, Россия;<sup>3</sup> ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Россия<sup>4</sup> Институт прикладной математики им. им. М. В. Келдыша  
РАН, Москва, Россия<sup>5</sup> РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: tkachenko@phystech.edu

Анализировалась возможность переноса мощности субмикросекундным импульсом тока с линейной плотностью больше 1 МА/см по вакуумной транспортирующей линии с магнитной самоизоляцией (МИВТЛ). В рамках одномерной МГД модели проведены численные расчеты, анализировались процессы, которые могут ограничивать эффективность транспортировки энергии к нагрузке. Аналогичная задача решалась в [1] при существенно меньших токовых нагрузках.

Показано, что при передаче электрической энергии импульса тока с линейной плотностью свыше 3 МА/см по электродам к нагрузке в них возникают экстремальные напряжения. Получены данные о динамике пространственного распределения температуры, давления и плотности в материале электродов, изготовленных из алюминия (Al), вольфрама (W) и нержавеющей стали (stainless steel, SS) как в течение действия импульса тока, так и после его окончания. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными. Рассчитаны также параметры плазменного слоя на поверхности электродов в ВТЛ при поверхностных плотностях тока порядка 3 МА/см.

Обоснована возможность транспортировки энергии субмикросекундных импульсов тока с амплитудой 50 МА по Al- и SS-электродам цилиндрического вакуумного КТФ с диаметром электрода 48 мм к нагрузке в виде излучающего Z-пинча.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Госкорпорации Росатом в рамках государственного контракта от 16.05.2013 г. № Н.4х.44.90.13.1108 и РФФИ 14-0100678.

#### Литература

Грабовский Е. В., Левашов П. Р., Олейник Г. М. и др. Физика плазмы. – 2006. – Т. 32, № 9. – С. 782.

**STUDY OF ELECTRODE PARAMETERS  
DURING POWER TRANSMISSION  
BY SUBMICROSECOND CURRENT PULSE  
WITH LINEAR DENSITY ABOVE 1 MA/CM  
VIA MAGNETICALLY INSULATED  
TRANSMISSION LINES**

S. I. Tkachenko<sup>1,2</sup>, E. V. Grabovskii<sup>3</sup>, P. V. Sasorov<sup>4</sup>,  
G. M. Olejnik<sup>3</sup>, V. V. Aleksandrov<sup>3</sup>, Yu. G. Kalinin<sup>5</sup>,  
O. G. Olhovskaya<sup>4</sup>, K. V. Khischenko<sup>2</sup>, P. R. Levashov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology,  
Dolgoprudny, Russia;

<sup>2</sup>Joint Institute for High Temperatures, RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute  
for Innovation and Fusion Research, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Russian Research Centre "Kurchatov Institute",  
Moscow, Russia

E-mail: tkachenko@phystech.edu

The possibility of power transfer by submicrosecond current pulse with linear density ( $I_l$ ) above 1 MA/cm via magnetically insulated transmission lines (MITL) was analyzed. Coaxial electrode system (CES) is used as output MITL section for transfer electromagnetic pulses from the pulse generator to the load. Similar problem was studied in [1] at much lower currents.

It is shown the electrodes are exposed to extreme stress during the electrical energy transmission in current pulse with linear density above 1 MA/cm across the electrodes. Numerical data on the dynamics of the spatial distribution of temperature, pressure and density in the electrodes made of aluminum (Al), tungsten (W) and stainless steel (SS), during the current pulse and after its completion was obtained. The numerical results are compared with experimental data. The parameters of the plasma layers on the electrode surface of MITL ( $I_l \sim 3$  MA/cm) were also calculated.

The possibility of energy transport by submicrosecond current pulses with the amplitude of 50 MA for Al- and SS-cylindrical electrodes of vacuum CES was substantiated.

This work was partially supported by State Corporation Rosatom under the state contract on 16.05.2013 № H.4x.44.90.13.1108, and the Russian Foundation for Basic Research project nos. 14-0100678.

#### References

E. V. Grabovskii, et. al. // Plasma Physics Reports. – 2006. – V. 32. – P. 718–728.

3-32

**КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ/СИСТЕМ  
НАГРУЖЕНИЯ, И НОВАЯ МОДЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА  
ИЗУЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЛАЙНЕРА**

Аарон Р. Майлс

Национальная лаборатория им. Лоуренса, Ливермор, США

Взрывомагнитные генераторы являются ценным инструментом для изучения поведения материалов в экстремальных условиях. Имитация создаваемых взрывомагнитными генераторами динамических нагрузок обычно основана на контурных моделях или источниках тока, генерируемого таким образом, чтобы соответствовать динамике генератора. И если итеративный процесс моделирования генератора или нагружения является приемлемым для получения точных результатов, то при исследовании нагружения с динамическими характеристиками широкого диапазона этот метод становится громоздким. Ввиду продолжающегося роста вычислительных мощностей компьютеров, мы считаем, что на сегодняшний день моделирование комплексных систем динамической нагрузки взрывомагнитного генератора можно выполнять более рутинно. Данный подход позволяет сравнивать относительную силу различных вариантов взрывомагнитных генераторов. В первой части данного доклада мы проиллюстрируем данный интегрированный подход примерами, включая совместный эксперимент лабораторий ВНИИЭФ/ЛАНЛ ALT-3.

Во второй части данного доклада мы представим новую модельную задачу 3, ALT-3, касающуюся изучения эффектов реальных поверхностных возмущений на непрерывности взорванного лайнера. Мы предоставим результаты двух вариантов данной модельной задачи, которые основываются на измерении шероховатости поверхности лайнеров LANL R-Damage и PHELIX. Меняя разрешение моделей, мы изучаем появляющиеся элементы спектра и пытаемся найти численную сходимость.

Данная работа выполнялась Национальной лабораторией Лоуренса Ливермора под эгидой Министерства энергетики США в рамках Контракта DE-AC52-07NA27344.

**INTEGRATED MODELING OF EMG/LOAD  
SYSTEMS, AND NEW TEST PROBLEM  
FOR STUDYING LINER INTEGRITY**

Aaron R. Miles

Lawrence Livermore National Laboratory, California, USA

Explosive magnetic generators (EMGs) are valuable tools for studying material properties under extreme conditions. Simulations of EMG-driven dynamic loads typically rely on circuit models or current sources that must be generated in a manner that ensures self-consistency with the generator dynamics. While an iterative process of generator and load modeling is sufficient to obtain accurate results, it can be cumbersome when exploring loads with wide-

ranging dynamic characteristics. Due to continued growth in computing capacity, we find it is now feasible to more routinely model integrated EMG-dynamic load systems. This approach also facilitates comparing relative strengths of different EMG variants. In the first part of this talk, we illustrate this integrated approach with examples including the jointly planned VNIIEF/LANL ALT-3 experiment.

In the second part of the talk, we introduce a new ALT-3 Test Problem 3 for studying the effects of realistic surface perturbations on imploded liner uniformity. We show results from two variants of this test problem, which are based on measured surface roughness from LANL R-Damage and PHELIX liners. By varying the resolution of the simulations, we study the addition of spectral content and look for numerical convergence.

This work was performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory under Contract DE-AC52-07NA27344.

---

3-33

**РОЛЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В ФОРМИРОВАНИИ ПЛАЗМЕННОГО  
КАНАЛА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА  
С ПИКОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ  
ПО КОАКСИАЛУ С ПРОМЕЖУТКОМ,  
РАЗОМКНУТЫМ ИЛИ ЗАМКНУТЫМ  
МИКРОПРОВОДНИКОМ**

Н. Б. Волков<sup>1</sup>, С. В. Барахвостов<sup>1</sup>,  
К. А. Нагаев<sup>1</sup>, С. И. Ткаченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электрофизики УрО РАН, Россия, Екатеринбург

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (госуниверситет),  
Долгопрудный, Россия

E-mail: nbv@ami.uran.ru; svtk.mipt@gmail.com

Цель данной работы – экспериментальное исследование роли электродинамических процессов в формировании плазменного канала при распространении электромагнитного импульса (ЭМИ) с пикосекундным фронтом по коаксиальной линии с промежутком в центральной жиле длиной  $l = 5\text{--}15$  мм, разомкнутым или замкнутым проволочками из меди ( $d = 20\text{--}300$  мкм), никеля ( $d = 25$  мкм), вольфрама ( $d = 24,5\text{--}100$  мкм), аморфного сплава FeSiB ( $d = 100$  мкм) и углерода (пучка волокон общим диаметром  $d = 100$  мкм). Для формирования ЭМИ нами использовался генератор высоковольтных импульсов напряжения (ГИН) «РАДАН-220» (с волновым сопротивлением  $Z_w = 50$  Ом и энергией  $w = 1$  Дж), который разряжался на неоднородную коаксиальную линию длиной 15 см и диаметром 10 см. Амплитуда зарядного напряжения ГИН составляла  $U_0 = 220$  кВ, длительность фронта ЭМИ –  $\tau_f = 200\text{--}500$  пкс (скорость нарастания напряжения  $\sim 1$  МВ/нс). Давление в линии изменялось в пределах от  $10^{-4}$  до 760 Торр. Напряжение на входе камеры измерялось с помощью емкостного делителя, помещенного в вакуумное масло. Электрический ток в конце линии измерялся с помощью шунта, имеющего сопротивление  $R_{sh} = 0,4$  Ом

и полюсу пропускания 5 ГГц. Для измерения поперечных токов, вызванных изменением объемного заряда и потоками заряженных частиц из канала разряда, использовался цилиндр Фарадея, открытый или закрытый пластиной из оргстекла толщиной 1 см. Сигналы с делителя, шунта и цилиндра Фарадея регистрировались цифровыми осциллографами Tektronix с полосой пропускания 0,5; 1 и 4 ГГц. 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.

Экспериментально и с помощью математического моделирования показана существенная роль волновых электродинамических процессов в формировании плазменного канала при разряде высоковольтного источника напряжения со скоростью нарастания  $\sim 1$  МВ/нс на коаксиальную линию с межэлектродным промежутком, разомкнутым и замкнутым проволочками микронного диаметра из различных материалов. Установлено, что первая полуволна тока, зарегистрированного с помощью осциллографов с различной полосой пропускания, имеет качественные и количественные характеристики, практически не зависящие от материала проводников микронного диаметра. С помощью открытого или закрытого пластиной из оргстекла цилиндра Фарадея измерен поперечный ток. Установлено, что в течение первых 50 нс, этот ток определяется изменением во времени напряжения и изменением объемного заряда плазменного канала, а на временах, больших 500 нс, – потоками частиц из плазмы. Установлено отсутствие потоков заряженных частиц из плазменного канала, образованного при разряде ГИН на коаксиальную линию с разомкнутым воздушным промежутком. Сравнение осциллограмм поперечного тока, полученных в экспериментах с разомкнутым и замкнутым воздушным промежутком, как с открытым, так и закрытым цилиндром Фарадея, показывает, что регистрируемый на больших временах ток определяется потоком заряженных частиц из разлетающейся плазмы в результате электрического взрыва либо всего проводника микронного диаметра, либо его поверхностного слоя.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект No. 13-08-00266-а, No. 14-08-31024-мол) и ФАНО в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии» (проект УрО РАН No. 12-П-2-1005, номер гос. рег. 01201266835).

**THE ELECTRODYNAMIC PROCESSES  
ROLE IN PLASMA CHANNEL FORMATION  
DURING THE ELECTROMAGNETIC PULSE  
WITH PICOSECOND FRONT PROPAGATION  
ALONG THE COAXIAL LINE CONTAINING AN  
OPEN-ENDED OR MICROWIRE-ENCLOSED GAP**

N. B. Volkov<sup>1</sup>, S. V. Barakhvostov<sup>1</sup>,  
K. A. Nagayev<sup>1</sup>, S. I. Tkachenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Electrophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (state university),  
Dolgoprudny, Russia

E-mail: nbv@ami.uran.ru; svtk.mipt@gmail.com

The objective of the present paper is experimental investigation of the electrodynamic processes role in formation of the plasma channel formation during the electromagnetic pulse (EMP) having picosecond front propagation along the coaxial line containing in the central core the 5–15 mm long gap, being either open-ended or enclosed with microwires of Cu ( $d=20\text{--}300\ \mu\text{m}$ ), W ( $d=24.5\text{--}100\ \mu\text{m}$ ), amorphous alloy FeSiB ( $d=100\ \mu\text{m}$ ) and carbon (fiber bunch of total diameter  $d=100\ \mu\text{m}$ ). For the electromagnetic pulse formation we used the high-voltage pulse generator (HVPG) RADAN-220 (self-surge impedance  $Z_w=50\ \Omega$  and energy  $w=1\ \text{J}$ ), that was discharged to the 15 cm long and 10 cm in diameter inhomogeneous coaxial line. The HVPG charging voltage was  $U_0=220\ \text{kV}$ , EMP front duration  $\tau_f=200\text{--}500\ \text{ps}$  (voltage-rise-rate  $\sim 1\ \text{MV/ns}$ ). Pressure in the line varied from  $10^{-4}$  to 760 Torr. The voltage at the chamber input was measured via the capacitance divider placed into the vacuum oil. The current at the end of the line was measured via the coaxial shunt, having  $R_{sh}=0.4\ \Omega$  resistance and 5 GHz bandwidth. For the transversal currents, caused by the volume charge variations and charged particles flows from the discharge channel, measurements the Faraday cup, staying unshielded or being shielded with 1 cm thick organic glass plate, was used. Signals from shunt, divider and Faraday cup were logged via the Tektronix digital oscilloscopes with bandwidths of 0.5, 1 and 4 GHz. Also the discharge channel self-glowing integral images were taken via DSLR cameras Canon 450D and Canon 5D Mark II, and its space-time characteristics were investigated via streak-cameras AGAT SF-3M and Cordin-173 and coaxial photodiode PEC-22SPU-M. The integral spectrum and its continuous streak were obtained via MS 257 spectrograph and Cordin-173streak-camera correspondingly.

On both the experimental and the computer simulations basis it was shown that wave electrodynamic processes act the essential part in plasma channel formation during the high-voltage source with  $\sim 1\ \text{MV/ns}$  voltage-rise-rate discharge to the coaxial line containing an inter-electrode gap, being either open-ended or enclosed with microwires of various materials. We established that the current first half-wave, registered with oscilloscopes with various bandwidths, has qualitative and quantitative characteristics that are almost independent of the microwires material or diameter. The transversal current was measured via the Faraday cup staying unshielded or being shielded with the organic glass plate. It was established that during the first 50 ns the current is defined by both voltage temporal evolution

and plasma channel volume charge variations; and at times greater than 500 ns – by the particles flows from the plasma. Charged particles from the plasma channel, generated during the HVPG discharge to the coaxial line containing open-ended air gap, flows absence was registered. The transversal current curves, acquired in experiments with either open-ended or wire-enclosed air gap for both unshielded and shielded faraday cup, comparison shows that current acquired at later times is defined by flows of charged particles from the expanding plasma, as a result of electrical explosion either of entire micron diameter conductor or just of its surface layer.

The work is carried out under the partial financial support of the RFBR (projects No. 13-08-00266-a and No. 14-08-31024-mol\_a) and FASO within the Presidium of Russian Academy of Sciences fundamental research program «Matter at high energy densities» (UB RAS project No. 12-P-1005, state registration No. 01201266835).

3-34

**НЕПРЕРЫВНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ  
В ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ В АЗОТЕ  
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

С. Н. Иванов

Институт электрофизики УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: stivan@iep.uran.ru

В докладе представлены результаты экспериментов по регистрации «быстрых» или «непрерывно ускоренных» электронов в плазме субнаносекундного искрового разряда в газе. В качестве рабочего газа использовался азот. Это наиболее широко применяемый газ в субнаносекундных газовых разрядниках высокого давления. На разрядный промежуток подавался импульс высокого напряжения амплитудой 100 кВ, длительностью на полувысоте 400–450 пс, с фронтом (по уровням 0,1–0,9 от амплитуды) 230–250 пс. Скорость нарастания напряжения на фронте импульса составляла  $(3,3\text{--}3,5)\times 10^{14}\ \text{В/с}$ . Быстрые электроны были зарегистрированы при давлениях азота в разрядном промежутке вплоть до 40 атм. При этом «быстрые» электроны регистрируются во всех пробоях газового зазора, при которых между электродами образуется искра. Ранее при таких высоких давлениях газа в разрядном промежутке быстрые электроны не регистрировались. Был обнаружен откол материала с тыльной стороны анода под действием ударной волны, возникающей при прохождении пучка быстрых электронов через анод. Анод был изготовлен из алюминиевой фольги толщиной 9 мкм. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 12-08-00282-а).

## RUNAWAY ELECTRONS IN SPARK DISCHARGE IN HIGH-PRESSURE NITROGEN

S. N. Ivanov

Institute of Electrophysics, Ekaterinburg, Russia

E-mail: stivan@iep.uran.ru

In this paper the experimental results of the registration of runaway electrons in plasma of a spark gas discharge are given. Nitrogen was used as the test gas in all experiments. This is the mostly used gas in subnanosecond high-pressure gas dischargers. The voltage pulse, with the amplitude of 100 kV, full width at half maximum (FWHM) of about 400–450 ps, and the front of about 230–250 ps at the level of 0.1–0.9 from amplitude was applied to the studied gas gap. In this case the voltage rise rate at the pulse front was up to  $(3.3\text{--}3.5)\times 10^{14}$  V/s. Runaway electrons were registered at pressures up to 40 atm. At that runaway electrons were registered at every breakdown under which the spark between cathode and anode was observed. At such high pressures runaway electrons were not observed earlier. The splitting off of the material from the backside of the anode by a beam of runaway electrons was registered. As an anode the aluminium foil 9 microns thickness was used. The beam of high-energy electrons when it passes through it causes local deformation of the anode material and pulls out metal slices from the reverse side of the foil. This study was supported by the Russian Fund for Basic Research (grant 12-08-00282-a).

3-35

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ СУБНАНОСЕКУНДНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОБРАЗЦАМИ

К. А. Нагаев<sup>1</sup>, С. В. Барахвостов<sup>1</sup>, И. Л. Музюкин<sup>1</sup>,  
И. С. Турмышев<sup>1</sup>, В. П. Тараканов<sup>2</sup>, Ю. А. Земсков<sup>1</sup>,  
Е. А. Чингина<sup>1</sup>, Н. Б. Волков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия,

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур,  
Москва, Россия

E-mail: kanagayev@iep.uran.ru; karat@tarak.msk.su

Модификация физических свойств вещества является одной из областей применения интенсивных электронных пучков, поэтому исследование быстро протекающих процессов при высоких плотностях энергии является очень интересной задачей. Если рассматривать металлы как квантовую плазму, то воздействие пучком субнаносекундной длительности может привести к возбуждению сильнонеравновесных состояний металла, в частности, к развитию в нем ионно-звуковой и ленгмюровской турбулентности, результатом которой является длительная релаксация до равновесного состояния.

Для исследования механизмов возбуждения и релаксации нами была создана экспериментальная установка EXCITOR, генерирующая электронный пучок

длительностью порядка 500 пс, энергией электронов 100–200 кэВ. Основой является компактный высоковольтный генератор РАДАН-300 с двойной формирующей линией. Наносекундный импульс генератора с помощью специального преобразователя обостряется до 115 кВ и укорачивается до 500 пс. Вакуумный диод представляет собой коаксиальную линию с самариевым или графитовым наконечником эмиттера. В качестве анода использовались медная фольга толщиной 20 мкм и стальная сетка с размером ячейки 40×40 мкм.

В работе приведены данные о характеристиках интегрального энергетического спектра, а также тока пучка, полученные на данной экспериментальной установке при помощи спектрометра Томпсона и цилиндра Фарадея соответственно. В результате проведенных экспериментов установлено, что интегральный энергетический спектр имеет гауссову форму с максимумом вблизи 105, 110, 130 кэВ для межэлектродных расстояний 1, 2 и 5 мм соответственно. В спектре наблюдаются частицы с энергией от 50 до 200 кэВ. Спектры для сетчатого и сплошного анодов слабо отличаются. Полученные экспериментальные данные качественно и количественно согласуются с результатами моделирования с помощью электромагнитного кода KARAT, в котором геометрия расчетной области была близка к реальной геометрии вакуумной камеры, причем в качестве граничного условия использовался экспериментальный импульс напряжения на входе вакуумного диода. Полученные экспериментальные значения энергии частиц также хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования.

Дальнейшая работа направлена на изучение механизмов возбуждения и релаксации сильнонеравновесных состояний металла с помощью интерферометрической системы измерения модуля и фазы коэффициента поглощения лазерного излучения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержки РФФИ (проекты №13-08-00266-а, №14-08-31024-мол\_а) и ФАНО в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии» (проект УрО РАН №12-П-1005, № гос. рег. 01201266835).

## ELECTRON BEAM CHARACTERISTICS FOR SUB-NANOSECOND PULSE INTERACTION WITH METALLIC SAMPLES

K. A. Nagayev<sup>1</sup>, S. V. Barakhvostov<sup>1</sup>, I. L. Muzyukin<sup>1</sup>,  
I. S. Turmyshev<sup>1</sup>, V. P. Tarakanov<sup>2</sup>, U. A. Zemskov<sup>1</sup>,  
E. A. Chingina<sup>1</sup>, N. B. Volkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Electrophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: kanagayev@iep.uran.ru; karat@tarak.msk.su

The matter physical properties modification is one of the intense electron beams applications area, for this reason the ultra-fast processes at high energy densities investigation is a task of great interest. If metal is taken to be quantum plasma, then a sub-nanosecond duration pulse impact can lead to generation of strongly non-equilibrium states of metal, in particular that would be ion-sound and

Langmuir turbulence, resulting into lasting relaxation to the equilibrium state.

In order to investigate the mechanisms of excitation and relaxation the EXCITOR experimental setup was built. It generates an electron beam lasting for about 500 ps and with electrons energy of about 100–200 keV. The basic element is the compact high-voltage generator RADAN-300 having the doubled formation line. The nanosecond pulse from the generator, when passing through the special converter, is refined to 115 kV and shortened to 500 ps. The vacuum diode is a coaxial line with samarium or graphite emitter tip. For the anode 20  $\mu\text{m}$  Cu foil and steel mesh with 40 $\times$ 40  $\mu\text{m}$  cell were used.

Here we report about integral energy spectrum characteristics, and also about the beam current, acquired on the experimental setup via the Thompson spectrometer and the Faraday cup respectively. In our experiments we had revealed that the integral energy spectrum has Gaussian shape and its peak is close to 105, 110, 130 keV for the inter-electrode distance being 1, 2 and 5 mm correspondingly. Particles with energies within the range from 50 to 200 keV were observed in the spectra. The beam spectrum acquired with anode mesh is quiet similar to the one acquired with solid anode. The obtained experimental data match qualitatively and quantitatively the electron beam formation numerical simulations using KARAT electromagnetic code, where the computational domain was close to the real vacuum chamber geometry, and the experimental voltage pulse from the vacuum diode input was taken to be the boundary conditions. The experimental particles energies values also are in good agreement with the calculated ones.

Further work is aimed at mechanisms of excitation and relaxation of highly non-equilibrium states of metals investigations, using interferometric measurement system for acquiring both modulus and phase of laser beam absorption ratio.

The work is carried out under the partial financial support of the RFBR (project No.13-08-00266-a, project No.14-08-31024-mol\_a) and FASO within the Presidium of Russian Academy of Sciences fundamental research program (UB RAS project No.12-P-1005, state registration No.01201266835).

правлениях, перпендикулярных направлениям колебаний [1–4]. Стабильность ядра обеспечивается осцилляцией его частиц и атмосферным давлением, потери его энергии в наиболее интересных случаях обусловлены тормозным излучением, максимальная кинетическая энергия электронов порядка 10 кэВ – 10 МэВ, максимальная объемная плотность энергии порядка 1 кДж/см<sup>3</sup>, время существования порядка 1–10 с [1–4].

Модель соответствует предположениям о высокой опасности некоторых шаровых молний для людей, самолетов и других объектов, в частности – предположению М.Т. Дмитриева [5] о радиационной опасности, и объясняет сообщение из [6] о плавлении шаровой молнией приблизительно 440 кг грунта [1, 2]. По-видимому, жесткое электромагнитное излучение некоторых шаровых молний способно вызвать короткие замыкания в электрическом и электронном оборудовании [1].

Будет рассмотрена начальная стадия формирования шаровой молнии [1, 2, 4] и проблемы идентификации атмосферных источников гамма-излучения [3, 4, 7].

Возможность ускорения электронов до высоких энергий на сравнительно малых расстояниях электрическими полями, возникающими в атмосфере Земли, подтверждается наблюдательными данными, в частности – регистрацией земных гамма-всплесков с жестким спектром [4, 8, 9]. Будет представлена модель начального ускорения электронов таких всплесков [9].

#### Литература

1. Shmatov M. L., J. Plasma Phys. 69, 507 (2003).
2. Shmatov M. L., Proc. ISBL 04, Chung-Li, Taiwan, 3-6 August 2004. – P. 51.
3. Shmatov M. L., J. Plasma Phys. 72, 277 (2003).
4. Shmatov M. L. Preprint of Ioffe Physical Technical Institute N 1809 (2014).
5. Дмитриев М. Т., Природа, № 6, 98 (июнь 1967).
6. Дмитриев М. Т. и др., ЖТФ 51, 2567 (1981).
7. Torii T. et al., Geophys. Res. Lett. 38, L24801 (2011).
8. Tavani M. et al., Phys. Rev. Lett. 106, 018501 (2011).
9. Шматов М. Л. Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе № 1808 (2013).

## BALL LIGHTNING AND TERRESTRIAL GAMMA-RAY FLASHES WITH HARD SPECTRUM

M. L. Shmatov

Ioffe Physical Technical Institute, St. Petersburg, Russia

E-mail: M.Shmatov@mail.ioffe.ru

The model of ball lightning will be presented. According to this model, ball lightning core consists of the clouds of electrons and almost totally ionized ions, the motion of its electrons is a superposition of the oscillatory motion and thermal motion in the directions which are perpendicular to those of the oscillations [1–4]. The stability of the core is provided by the oscillation of its particles and the atmospheric pressure, in the most interesting cases the losses of its energy are due to bremsstrahlung, the maximum kinetic energy of the electron is of the order of 10 keV to 10 MeV, the maximum volume density of energy is of the order of 1 kJ/cm<sup>3</sup>, the time of existence is of the order of 1 to 10 s [1–4].

3-36

## ШАРОВАЯ МОЛНИЯ И ЗЕМНЫЕ ГАММА-ВСПЛЕСКИ С ЖЕСТКИМ СПЕКТРОМ

М. Л. Шматов

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: M.Shmatov@mail.ioffe.ru

Будет представлена модель шаровой молнии, согласно которой ядро шаровой молнии состоит из облаков электронов и почти полностью ионизованных ионов, движение электронов ядра является суперпозицией колебательного движения и теплового движения в на-

The model corresponds to the assumptions about the high danger of some ball lightning for human beings, airplanes and other objects, in particular, to the assumption of M. T. Dmitriev [5] about the radiation hazard, and explains the report from [6] about melting of about 440 kg of ground by ball lightning. Probably, the hard electromagnetic radiation from some ball lightning can cause short circuits in the electric and electronic equipment [1].

The initial stage of formation of ball lightning [1, 2, 4] and the problems of the identification of the atmospheric sources of gamma-radiation [3, 4, 7] will be considered.

The possibility of the acceleration of electrons to high energies on the relatively short distances by the electric fields arising in the atmosphere of Earth is confirmed by the observational data, in particular by the registration of the terrestrial gamma-ray flashes with hard spectrum [4, 8, 9]. The model of the initial acceleration of the electrons of such flashes [9] will be presented.

### References

1. Shmatov M. L., J. Plasma Phys. **69**, 507 (2003).
2. Shmatov M. L., Proc. ISBL 04, Chung-Li, Taiwan, 3-6 August 2004. – P. 51.
3. Shmatov M. L., J. Plasma Phys. **72**, 277 (2003).
4. Shmatov M. L. Preprint of Ioffe Physical Technical Institute N 1809 (2014).
5. Dmitriev M. T. Priroda, N 6, 98 (June 1967) [in Russian].
6. Dmitriev M. T. et al., ZhTF **51**, 2567 (1981) [Sov. Phys. Tech. Phys. **26**, 1518 (1981)].
7. Torii T. et al., Geophys. Res. Lett. **38**, L24801 (2011).
8. Tavani M. et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 018501 (2011).
9. Shmatov M. L. Preprint of Ioffe Physical Technical Institute N 1808 (2013) [in Russian].

суждаемого фазового перехода оказались очень близки к аналогичному фазовому переходу в модифицированной модели однокомпонентной плазмы на *однородно-сжимаемом* фоне (ОСР(–)), а также в так называемой безассоциативной «сдвоенной модели ОСР» – суперпозиции двух моделей ОСР, электронов и ионов, без учета эффектов электрон-ионного экранирования (Double-ОСР), изучавшимся ранее [2, 3]. В частности, обе версии обсуждаемого фазового перехода предсказывают высокую степень асимметрии фазовой границы (в координатах плотность – температура) с примечательно низким значением критического фактора сжимаемости для всех значений заряда  $Z$ . Параметры указанной термодинамической неустойчивости были вычислены как в локальной, так и в глобальной формах, т.е. вдоль спинодалей и бинодалей фазового расслоения. Анализ и вычисления проведены как для случаев плазмы одного элемента, так и для плазмы так называемой бинарной ионной смеси (БИМ) в рамках приближения «Линейной смеси» (Linear Mixing Rule) рекомендованного в [1]. В работе сформулирована простейшая модель *неконгруэнтного* фазового перехода в кулоновской системе – в бинарной ионной смеси, и впервые оценены параметры неконгруэнтности этого фазового перехода, т.е. различия ионного состава в сосуществующих плотной и разреженной фазах. Также в работе проанализирована выполнимость ряда широко известных полуэмпирических закономерностей («правил») в приложении к исследуемому фазовому переходу. В частности, обсуждается новый вариант известного «правила прямолинейного диаметра» для фактора сжимаемости ( $PV/RT$ ).

### Литература

1. Potekhin A. Y. and Chabrier G. Phys. Rev. E, **58**, 4941 (1998); *ibid* **62**, 8554 (2000); *ibid* **79**, 016411 (2009).
2. Iosilevskiy I. and Chigvintsev A. “Physics of Strongly Coupled Plasmas” Eds. W. Kraeft and M. Schlanges, (World Scientific, 1996) pp. 145. / arXiv:0901.3535 / arXiv:0902.2353 /
3. Iosilevskiy I. Thermodynamics of non-ideal plasmas, in: “Encyclopedia of Low-Temperature Plasma Physics” (Suppl. B, V.III-1), Eds. A.Starostin and I. Iosilevskiy, Moscow: Fizmatlit, 2004. – P. 349–428.

### BOUNDARIES OF THERMODYNAMIC STABILITY FOR WIDE-RANGE EOS OF FULLY IONIZED ELECTRON-IONIC PLASMAS

A. Zilevich<sup>1</sup>, N. Stroeve<sup>1,2</sup>, I. Iosilevskiy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for High Temperature (Russian Academy of Science), Moscow, Russia

E-mail: ilios@orc.ru

Изучаются границы потери термодинамической устойчивости для известного и широко используемого в астрофизических приложениях аналитического интерполяционного уравнения состояния (EOS) неидеальной полностью ионизованной электрон-ионной плазмы Потехина–Шабрие [1]. Установлено, что для одноэлементной электрон-ионной плазмы ( $Z:e$ ) границы термодинамической неустойчивости имеют вид фазового перехода 1-го рода типа газ–жидкость с верхней критической точкой. Величина критической температуры этого перехода как функция заряда иона  $Z$  хорошо аппроксимируется соотношением  $T_c(Z) \approx T_c(1)Z^\gamma$  ( $\gamma \approx 3/2$  и  $kT_c(1) \approx 1,49$  эВ). Структура и параметры границ об-

Boundaries for thermodynamic instability are studied for well-known wide-range analytic equations of state (EOS) of non-ideal fully ionized electron-ionic plasmas (Potekhin & Chabrier [1]), which is widely used in astrophysical applications. It was found that for one-element electron-ionic plasmas ( $Z:e$ ) this thermodynamic instability region looks as 1<sup>st</sup>-order phase transition of gas-liquid type with upper critical point. Critical temperature as function of  $Z$  are well described by relation:  $T_c(Z) \approx T_c(1)Z^\gamma$  ( $\gamma \approx 3/2$  and

### ГРАНИЦЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛНОСТЬЮ ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ

А. И. Зилевич<sup>1</sup>, Н. Е. Строев<sup>1,2</sup>,  
И. Л. Иосилевский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (госуниверситет), Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур (Российская Академия Наук), Москва, Россия

E-mail: ilios@orc.ru

$kT_c(1) \approx 1.49$  eV). Structure and parameters of discussed phase transition proved to be very close to those for similar phase transition(s), which were studied previously by Iosilevskiy and Chigvintsev for so-called Double-OCP model [2, 3] i.e. for superposition of two OCP-models for ions and electrons without electron-ionic screening effects. In particular both phase transitions predict highly asymmetric phase diagrams with remarkably low values of critical compressibility factor for all values of  $Z$ . Parameters of mentioned above thermodynamic instability have been calculated for global and local instability conditions (i.e. binodals and spinodals). Calculations were provided for plasmas of single elements and for mixtures in Linier Mixing Rule approximation, recommended in [1]. Parameters of simplest variant for *non-congruent* phase transition are estimated for the model of “binary ionic mixture” with the use of present equations of state. Validity of some well-known semi-empirical rules for phase diagram is discussed. New variant for so-called rule of “rectilinear diameter” was discovered for compressibility factor.

## References

1. Potekhin A. Y. and Chabrier G. *Phys. Rev. E*, 58, 4941 (1998); *ibid* 62, 8554 (2000); *ibid* 79, 016411 (2009).
2. Iosilevskiy I. and Chigvintsev A. “Physics of Strongly Coupled Plasmas” Eds. W. Kraeft and M. Schlanges, (World Scientific, 1996) pp. 145. / arXiv:0901.3535 / arXiv:0902.2353 /
3. Iosilevskiy I. Thermodynamics of non-ideal plasmas, in: “Encyclopedia of Low-Temperature Plasma Physics” (Suppl. B, V.III-1), Eds. A. Starostin and I. Iosilevskiy, Moscow: Fizmatlit, 2004. – P. 349–428.

---

3-38

## О НЕКОНГРУЭНТНОСТИ, СКАЧКЕ ПЛОТНОСТИ И ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЕ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ

И. А. Мартынова<sup>1,2</sup>, И. Л. Иосилевский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
(госуниверситет), Россия, Москва

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
Россия, Москва

E-mail: martina1204@yandex.ru

На основании широко известной фазовой диаграммы пылевой плазмы в экранированном дебаевском потенциале (Хамагучи и др.): кристалл (bcc) – кристалл (fcc) – жидкость в координатах  $\Gamma - \kappa$  ( $\Gamma$  – параметр кулоновской неидеальности,  $\kappa$  – безразмерный параметр экранирования) строится фазовая диаграмма равновесной пылевой плазмы в естественных координатах плотность–температура для двух электронейтральных вариантов упрощенной модели такой плазмы: (i) двухкомпонентной системы из макро- и микроионов ( $+Z, -1$ ), и (ii) трехкомпонентной системы из макроионов и двух сортов микроионов ( $+Z, -1, +1$ ). В двулогарифмических координатах  $\ln T - \ln N$  полученная фазовая диаграмма имеет вид комбинации линейных зон кристаллического и флюидного состояний, разделенных границами  $\Gamma = \text{const}$ . Анализируются границы

и положения этих зон в зависимости от параметра модели ( $Z$ ). Обсуждается характер «расщепления» границы плавления и величина соответствующего скачка плотности между априори раздельными границами заморзания жидкости и плавления кристалла. Приводятся соотношения, позволяющие оценить величину этого расщепления. Также обсуждается характер проявления так называемой неконгруэнтности межфазных границ в трех-компонентной модели ( $+Z, -1, +1$ ) и дополнительное расщепление всех границ фазовых переходов кристалл–флюид вследствие неконгруэнтности в сравнении с обычной (принудительно конгруэнтной) версией этих границ.

## ABOUT NON-CONGRUENCE, DENSITY GAP AND A PHASE DIAGRAM OF DUSTY PLASMAS

I. A. Martynova<sup>1,2</sup>, I. L. Iosilevskiy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> MIPT(SU), Russia, Moscow

<sup>2</sup> Joint Institute for High Temperature RAS, Russia, Moscow

E-mail: martina1204@yandex.ru

Hypothetical non-congruence and a phase diagram in dusty plasma are under discussion. Two simplified variants of a dusty plasma model are considered as a thermodynamically equilibrium combination of classical Coulomb particles: (i) a two-component electroneutral system of macro- and micro-ions ( $+Z, -1$ ), and (ii) a 3-component electroneutral mixture of macro-ions and two kinds of micro-ions ( $+Z, -1, +1$ ). The base for a consideration is the well-known phase diagram of dusty plasma (Hamaguchi et al. for an equilibrium charged system with the Yukawa potential in its standard representation in the coordinates:  $\Gamma - \kappa$  ( $\Gamma$  is the Coulomb non-ideality parameter,  $\kappa$  is the dimensionless Debye screening parameter). The phase regions for the three states of the system (fluid vs. bcc and fcc crystals) from the Hamaguchi diagram are reconstructed in the density-temperature coordinates. The resulting phase diagram in the logarithmic coordinates  $\ln T - \ln N$  has the form of a linear combination of crystalline and fluid zones separated by the boundaries  $\Gamma = \text{const}$ . Parameters and locations of these zones are analyzed in dependence on the intrinsic parameter of the model, – macroion charge number  $Z$ . Parameters of a splitting the one-dimensional melting boundaries of the Hamaguchi diagram (i.e. hypothetical melting density gap between separate freezing liquid line (*liquidus*) and melting crystal line (*solidus*)) are discussed. Additional splitting of all phase boundaries in the three-component model ( $+Z, -1, +1$ ) because of so-called non-congruency of all phase transitions in this model is discussed also.



3-39

3-40

**РАСЧЕТ ПОПРАВКИ К УРАВНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОГО ПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ В ИОННОЙ ПОДСИСТЕМЕ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ**

А. Л. Фальков

Федеральное государственное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ»,  
Москва, Россия

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

E-mail: sinarit9091@mail.ru

В работе представлен метод поиска парных пространственных корреляционных функций (радиальных функций распределения вероятности реализации двухчастичных конфигураций, РФР) для ионной компоненты сильнонеидеальной плазмы (теплого плотного вещества, ТПВ). Путем численного итерационного решения системы интегроалгебраических уравнений Орнштейна–Цернике для однокомпонентной плазмы с экранирующим потенциалом Юкавы изучена зависимость получаемых РФР от температуры, плотности плазмы и от расположения химического элемента в периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Информация о РФР использована для расчета первой вириальной поправки к уравнению состояния плазмы.

**CALCULATION OF CORRECTION TO EQUATION OF STATE OF WARM DENSE MATTER DETERMINED BY SPATIAL CORRELATIONS IN IONIC SUBSYSTEM OF SINGLE COMPONENT PLASMA**

A. L. Falkov

National Research Nuclear University (NRNU MEPhI),  
Moscow, Russia

E-mail: sinarit9091@mail.ru

The paper presents technique for searching coupled spatial correlation functions (radial functions of probability distribution for two-part configurations distribution) for ionic component of strongly non-perfect plasma (warm dense matter). Using numerical iterative solution of the system of Ornstein-Zernike integro-algebraic equations for single component plasma with shielding Yukawa we have studied dependence of obtained radial distribution functions on temperature, plasma density and position of chemical element in periodic table. Data about these functions was used for computation of the first virial correction to plasma equation of state.

**УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МИКРОКАНАЛА В ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

И. А. Жвания, В. М. Гордиенко,  
И. А. Макаров, А. А. Гарматина

Физический факультет и МЛЦ МГУ им. М. В. Ломоносова,  
Москва, Россия

E-mail: Irina.zhvaniya@physics.msu.ru

Рентгеновские импульсы сверхкороткой длительности и с узким энергетическим спектром, лежащим в диапазоне 3–8 кэВ, являются уникальным инструментом, который может использоваться в задачах рентгеноструктурного анализа для изучения динамики сверхбыстрых фазовых переходов и контроля состояния кристаллической решетки [1], а также для диагностики плазмы (в том числе и термоядерной) с высоким временным разрешением [2]. При воздействии фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью более  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> на твердотельную мишень образуется высокотемпературная плазма, которая является источником таких сверхкоротких рентгеновских импульсов с энергиями квантов до десятка кэВ. Актуальной является проблема оптимизации условий и получения эффективной генерации такого характеристического рентгеновского излучения.

Ранее нами было обнаружено [3], что при воздействии в одну область твердотельной мишени последовательностью интенсивных ( $\sim 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>) фемтосекундных лазерных импульсов образуется канал, по мере формирования которого возрастает интегральный выход рентгеновского излучения. Можно ожидать, что эффективность генерации характеристических линий при формировании канала тоже будет возрастать.

В данной работе обсуждаются проведенные эксперименты по регистрации и измерению выхода характеристической линии хлора ( $K_{\alpha} \approx 2,6$  кэВ) в режиме формирования микроканала в кристаллах NaCl и KCl и приводится сравнение с выходом характеристического рентгеновского излучения из других мишеней (диэлектриков и металлов). Кроме этого, приводятся сравнительные экспериментальные данные по выходу характеристической линии хлора, генерируемой при фемтосекундном лазерном возбуждении другого типа мишени – струи нанокластеров молекул CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> [4]. Обсуждается вопрос оптимизации различных параметров, как в случае твердотельных мишеней, так и в случае кластерных, для достижения максимального выхода рентгеновского излучения.

**Литература**

1. Sokolowski-Tinten K. and Von Der Linde D. Ultrafast phase transitions and lattice dynamics probed using laser-produced x-ray pulses // *J. Phys. Condens. Matter.* – 2004. – Vol. 16, no. 49. – P. R1517–R1536.

2. Kritcher A. L., Neumayer P., Urry M. K. et al. K-alpha conversion efficiency measurements for X-ray scattering in inertial confinement fusion plasmas // High Energy Density Phys. – 2007. – Vol. 3, no. 1–2. – P. 156–162.
3. Gordienko V. M., Zhvaniya I. A., Khomenko A. S. Dynamics of plasma production and harmonic generation under microchannel drilling in solid target by intense femtosecond laser // SPIE proc. – 2010. – Vol. 7994. – P. 79940P–79940P–7.
4. Gordienko V. M., Dzhidzhoev M. S., Zhvaniya I. A. et al. Efficient X-ray line production from laser excited CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> clusters. Mixed cluster formation and control of the x-ray line yield // Laser Phys. Lett. – 2014. – Vol. 11, no. 3. – P. 036003.

### ENHANCEMENT OF X-RAY LINE YIELD UNDER MICROCHANNEL FORMATION IN A SOLID TARGET BY A SEQUENCE OF FEMTOSECOND LASER PULSES

I. A. Zhvaniya, V. M. Gordienko,  
I. A. Makarov, A. A. Garmatina

Faculty of Physics and International Laser Center  
M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: Irina.zhvaniya@physics.msu.ru

X-ray pulses with ultra-short duration and narrow energy spectrum in a range of 3–8 keV is a unique tool that can be used in various tasks. These tasks include the X-ray diffraction analysis – investigation the dynamics of ultra-fast phase transitions and control of the crystal lattice [1]; plasma diagnostics (including fusion plasma) with high temporal resolution [2]. Interaction of femtosecond laser pulses of intensity above 10<sup>15</sup> W/cm<sup>2</sup> with solid target is accompanied with high-temperature dense plasma formation. The plasma is a source of ultrashort X-ray pulses with photon energies up to ten keV. So the very important and topical issue is to optimize and to achieve maximal yield of the characteristic X-rays of ultra-short duration under interaction of intense femtosecond pulses with matter.

Previously we have found that under microchannel production in a target by a sequence of intense (~10<sup>16</sup> W/cm<sup>2</sup>) femtosecond laser pulses, an integral yield of the X-ray radiation is increased [3]. It can be expected that the energy conversion efficiency to characteristic X-ray lines in the same conditions will be also increased. In this paper, we discuss experiments on the registration and measurement of chlorine X-ray line yield ( $K_{\alpha} \approx 2.6$  keV) when the microchannel is formed in NaCl and KCl targets and compare with the X-ray line yield in the case of other solid targets (dielectrics and metals). In addition, we provide comparative experimental data on the yield of the chlorine X-ray line generated by femtosecond laser excitation of another target type – the jet of nanoclusters of molecules CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> [4]. The optimization of various parameters, in the case of a solid target as well as in the case of clusters, will be discussed.

#### References

1. Sokolowski-Tinten K. and Von Der Linde D. Ultrafast phase transitions and lattice dynamics probed using laser-produced x-ray pulses // J. Phys. Condens. Matter. – 2004. – Vol. 16, no. 49. –P. R1517–R1536.
2. Kritcher A. L., Neumayer P., Urry M. K. et al. K-alpha conversion efficiency measurements for X-ray scattering in inertial confinement fusion plasmas // High Energy Density Phys. – 2007. – Vol. 3, no. 1–2. – P. 156–162.
3. Gordienko V. M., Zhvaniya I. A., Khomenko A. S. Dynamics of plasma production and harmonic generation under microchannel drilling in solid target by intense femtosecond laser // SPIE proc. – 2010. – Vol. 7994. – P. 79940P–79940P–7.
4. Gordienko V. M., Dzhidzhoev M. S., Zhvaniya I. A. et al. Efficient X-ray line production from laser excited CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> clusters. Mixed cluster formation and control of the X-ray line yield // Laser Phys. Lett. – 2014. – Vol. 11, no. 3. – P. 036003.

3. Gordienko V. M., Zhvaniya I. A., Khomenko A. S. Dynamics of plasma production and harmonic generation under microchannel drilling in solid target by intense femtosecond laser // SPIE proc. – 2010. – Vol. 7994. – P. 79940P–79940P–7.
4. Gordienko V. M., Dzhidzhoev M. S., Zhvaniya I. A. et al. Efficient X-ray line production from laser excited CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> clusters. Mixed cluster formation and control of the X-ray line yield // Laser Phys. Lett. – 2014. – Vol. 11, no. 3. – P. 036003.

3-41

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЗАКОРОЧЕННЫМ РАДИАЛЬНОЙ ФОЛЬГОЙ СТЕРЖНЕВЫМ ПИНЧ-ДИОДОМ НА ГЕНЕРАТОРЕ МИГ

С. А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, Томск  
E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Представлены результаты экспериментов по формированию низкоимпедансного диода в конфигурации стержневого пинч-диода, предварительно заколоченного радиальной фольгой. В этих экспериментах тонкая алюминиевая фольга устанавливалась между коаксиальными электродами диода. Под действием  $J \times B$  силы импульсного тока генератора МИГ (1 МВ, 1,5 МА, 80 нс) фольга ускоряется в аксиальном направлении. Так как давление магнитного поля обратно пропорционально радиусу в квадрате, максимальное смещение фольги происходит около анодного стержня, движение фольги становится двумерным, и образуется зазор между стержнем и фольгой. Как только напряжение на зазоре становится достаточно высоким (ток диода достигает критической величины), эмитированные с катода электроны сметаются магнитным полем и фокусируются на кончик анодного стержня. С помощью нульмерных расчетов толщина фольги и расстояние от фольги до анодного кончика выбираются так, чтобы плазма фольги достигала анодного кончика около времени максимума тока генератора. В результате нескольких перезамыканий тока плазмой стержня и фольги, в эксперименте наблюдался цуг последовательных импульсов тормозного рентгеновского излучения.

### EXPERIMENTS WITH A FOIL-SHORTED ROD-PINCH DIODE ON THE MIG GENERATOR

S. A. Sorokin

Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia, Tomsk  
E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Experimental results of the low-impedance diode formation in a radial foil rod-pinch diode are presented. In these experiments, an aluminum foil is placed between concentric electrodes of a rod-pinch diode. The radial foil is subjected to the current pulse from the MIG generator (1 MV, 1.5 MA, 80 ns) and is accelerated in the axial direction by the  $J \times B$  force. The largest  $J \times B$  force at small radii close the anode rod leads to the largest foil mass axial displacement

and the formation of a radial gap between the anode rod and the remaining foil. Strongly-pinched self-magnetically-limited electrons flow to the tip of the rod, once sufficiently high gap voltage is reached. A point-like hard x-ray source is formed at the rod tip. Using 0-dimensional calculations, the foil thickness and the length of the rod extension beyond the radial foil are chosen so that the foil plasma moves past the end of the rod at the peak of generator current. Several successive intense bremsstrahlung pulses are formed as the result of current reconnections in the foil and rod plasmas.

3-42

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПЛАСТИН FUJI MS И SR

В. А. Флегентов, С. А. Горохов, К. В. Сафронов

Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия  
E-mail: dep5@vniitf.ru

Доклад посвящен изучению основных свойств фотолюминесцентных детекторов (на основе соединения  $\text{BaF}(\text{Br},\text{I}):\text{Eu}^{2+}$ ) BAS-MS и BAS-SR (Fuji Cor. Ltd.). В данной работе для активации детекторов применялась стационарная рентгеновская трубка, изображения считывались посредством сканера GE Typhoon FLA 7000 IP.

Для измерения спектральной чувствительности IP-детекторов использовался метод «селективных фильтров»: для выделения узкого диапазона из сплошного спектра рентгеновской трубки применялись фильтры, которые пропускают только кванты с энергией вблизи К-скачка поглощения материала, из которого они изготовлены. Полученная зависимость чувствительности детекторов от энергии квантов в диапазоне 5–50 кэВ хорошо описывается при помощи модели, согласно которой величина сигнала линейно пропорциональна поглощенной в чувствительном слое энергии, при этом коэффициенты пропорциональности различны для трех диапазонов, разделяемых К-скачками брома (13,47 кэВ) и бария (37,44 кэВ).

Кроме этого в данном докладе приводятся результаты измерений пространственного разрешения IP-детекторов, яркости изображений в зависимости от параметров сканирования (PMT, pixel size). Также в работе измерена зависимость скорости распада скрытых изображений на IP-пластинах от времени. Установлено, что на вид этой зависимости существенным образом влияет температура хранения детекторов.

### FUJI MS AND SR IMAGING PLATE CHARACTERISTICS INVESTIGATION

V. A. Flegentov, S. A. Gorokhov, K. V. Safronov

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

The report describes experimental study of photostimulable phosphor screens ( $\text{BaF}(\text{Br},\text{I}):\text{Eu}^{2+}$ ) characteristics. A stationary X-ray tube was used to activate imaging plates (IPs), GE Typhoon FLA 7000 IP scanner system was exploited to read activated IPs.

K-edge absorption filters were used for measurements of IPs spectral sensitivity. The measured sensitivity curves for X-ray energies 5–55 keV have a good fit to a model that assumes that the measured signal value is linearly proportional to the X-ray energy absorbed in the phosphor layer, but the proportionality constants are different in 3 energy regions separated by Br-K (13,47 keV) and Ba-K (37,44 keV) edges.

We report the results of IP spatial resolution measurement, the influence of scanning parameter settings (PMT, pixel size) on image brightness. Rates of IP image fading as a function of time were measured. These rates are shown to have significant dependence on imaging plate storage temperature.

3-43

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НА КОНДЕНСИРОВАННЫЕ СРЕДЫ

Н. А. Волошин, А. Я. Лейви, А. П. Яловец

Южно-Уральский государственный университет  
(Национальный исследовательский университет),  
Челябинск, Россия  
E-mail: 2679604@mail.ru

В настоящее время воздействие интенсивных потоков энергии на конденсированные среды широко используется для модификации свойств функциональных и конструкционных материалов, получения новых материалов. Теоретически и экспериментально широко исследуется воздействие на вещество ионных, электронных пучков, лазерного излучения и плазмы. Однако малоизученным остается вопрос воздействия на вещества высоковольтных электрических разрядов наносекундной длительности.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по воздействию на твердые тела высоковольтных электрических разрядов наносекундной длительности. Исследования проводились на установке по генерации высоковольтных импульсов напряжения с параметрами: напряжение от 150 до 300 кВ, запасенной энергией до 600 Дж, время нарастания импульса 200 нс, частота до 10 Гц. В результате воздействия наблюдается разрушение твердых тел, измельчение фракции от  $-100 + 200$  мм до  $-5 + 10$  мм. Также в работе

исследуется вопрос о влиянии параметров воздействия на конечную фракцию.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (научно-исследовательская работа ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), проводимая в рамках государственных заданий № 1030 (№ 2014105-ГЗ)).

### EXPERIMENTAL STUDY ON THE IMPACT OF ELECTRIC POWER NANOSECOND PULSES ON CONDENSED MEDIA

N. A. Voloshin, A. J. Lavie, A. P. Yalovets

South Ural State University (National Research University),  
Chelyabinsk, Russia

E-mail: 2679604@mail.ru

Currently, the impact of intense energy fluxes on condensed media is widely used to modify the properties of functional and structural materials, new materials. Extensively both theoretically and experimentally investigated the effects on the ionic substance, electron beam, laser beam and plasma. However, the question remains poorly known exposure to substances of high voltage electric discharges nanosecond.

The paper presents the results of experimental studies on the effects on solids high-voltage electrical discharges nanosecond. The studies were conducted in a plant for the generation of high-voltage pulses with the following parameters: voltage from 150 kV to 300 kV, the stored energy of up to 600 J, pulse rise time of 200 ns, the frequency to 10 Hz. As a result of observed fracture of solids, grinding fraction from  $-100$  to  $+200$  mm to  $10-5$  mm. Also in the paper investigates the influence of parameters of influence on the final fraction.

This work was partially supported by the Ministry of Education and Science (Scientific research VPO "SUSU" (NRU), held within the framework of state jobs number 1030 (№ 2014105-PP))

3-44

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПРЕССИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА НА РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ

А. Я. Лейви<sup>1</sup>, А. П. Яловец<sup>1</sup>, Д. Г. Кожевников<sup>1</sup>,  
В. М. Асташинский<sup>2</sup>, Н. Н. Черенда<sup>3</sup>, В. В. Углов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет),  
Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной  
академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет, Минск,  
Беларусь

E-mail: leyvy@mail.ru, ast@imaph.bas-net.by,  
Cherenda@bsu.by

В настоящее время обработка материалов интенсивными потоками плазмы с целью изменения физических

или химических свойств поверхности обрабатываемого объекта является одним из важных вопросов материаловедения. Плазменная обработка приводит к увеличению прочности материала, уменьшает шероховатость поверхности материала, улучшает адгезию покрытия с подложкой, используется для легирования поверхности, получение новых метастабильных соединений.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований изменения рельефа поверхности мишени из сталь 3 при обработке компрессионными плазменными потоками (КПП). Плотность поглощенной мишенью энергии варьировалась в диапазоне от 10 до 35 Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса составляла 100 мкс.

В результате воздействия КПП на сталь 3 на ее поверхности формируются, качественно отличающиеся друг от друга по рельефу, три области: центральная, на которую плазменный поток падает нормально, переходная, где имеет место радиальный разлет плазменного потока, и область, не подверженная воздействию. После обработки КПП на поверхности образцов формируется крупномасштабный волнообразный рельеф с характерными размерами отдельных структур  $200 \times 1000$  мкм.

Шероховатость после обработки КПП увеличивается. Однако на масштабе отдельных структур наблюдается сглаживание микрорельефа до амплитудных значений неровностей порядка 0,5 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (научно-исследовательская работа ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), проводимая в рамках государственных заданий № 1030 (№ 2014105-ГЗ))

### INFLUENCE OF PARAMETERS OF COMPRESSION PLASMA FLOW ON THE SURFACE RELIEF OF A METAL TARGET

A. Ya. Leyvy<sup>1</sup>, A. P. Yalovets<sup>1</sup>, D. G. Kogevnikov<sup>1</sup>,  
V. M. Astashynski<sup>2</sup>, N. N. Cherenda<sup>3</sup>, V. V. Uglov<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>South-Ural State University, Physical Department,  
Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>Stepanov Institute of Physics, National Academy  
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus

E-mail: leyvy@mail.ru, ast@imaph.bas-net.by,  
Cherenda@bsu.by

The treatment of materials with intense plasma flows in order to change the physical or chemical properties of the surface of the treated object is an important method for the modification of construction materials. Plasma treatment increases the strength of a material, reduces the roughness of the surface of a material, improves adhesion between a coating and a substrate, and is used to dope surfaces

The change in the surface relief of a steel-3 target treated by compression plasma flows is experimentally studied. The energy density absorbed by the target varies in the range of  $10-35$  J/cm<sup>2</sup> and the pulse duration is 100  $\mu$ s. The irradiation of a steel-3 sample leads to the formation of three regions qualitatively different in terms of relief on the surface. These are the central region on which the plasma flow is incident normally, the transient region where the

plasma flow is radially expanded, and the untreated region. As a result, a large scale wave like relief (wavelength of 200–1000  $\mu\text{m}$ ) appears on the surface and the roughness becomes larger than that in the initial sample.

After irradiation with compression plasma flows, the microrelief at the individual structure scale is smoothed to  $R_{\text{max}}$  about 0.5  $\mu\text{m}$ .

This work was supported in part by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (contract no. 1030 (2014105-G3) for support of research at the South Ural State University).

---

3-45

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ФОЛЬГИ НА ОДНОРОДНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА**

А. В. Павленко, А. Н. Григорьев, Е. И. Карнаухова

Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия  
E-mail: alex\_nick@mail.ru

В работе представлены результаты измерений с помощью кварцевых датчиков амплитудно-временных профилей давления в центральной и боковой (поперечно-краевой) областях плоской электрически взрывающейся фольги из металлов: меди М1, алюминия АД1М, латуни Л 63, никелевого сплава 80НХС, титана ВТ 1-00 и свинца, плакированного оловом. По результатам измерения определены коэффициенты неоднородности по амплитуде давления и разновременность взрыва. Показано, что важным параметром, влияющим на однородность и одновременность взрыва, является удельное электрическое сопротивление взрывающегося металла.

### **INVESTIGATION OF FOIL MATERIAL INFLUENCE ON UNIFORMITY OF ELECTRICAL EXPLOSION**

A. V. Pavlenko, A. N. Grigoriev, E. I. Karnaukhov

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

Temporal waveforms of pressure amplitude in central and peripheral regions of a flat electrically exploded foil (copper M1, aluminum AD1M, brass L63, nickel alloy 80NCS, titanium VT1-00 and lead) have been measured. The measurements were performed using quartz pressure sensors arranged on the free surface of a dielectric substrate glued to the foil. The coefficient of pressure heterogeneity and difference in explosion time for different foil material were defined. It is shown, the foil electrical resistivity is an important parameter that influence on foil explosion uniformity and difference in time of explosion.

---

3-46

### **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИЗОХОРИЧЕСКОМУ НАГРЕВУ ТОНКИХ ФОЛЬГ УЛЬТРАКОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ**

Е. С. Борисов, Д. С. Гаврилов,  
А. Г. Какшин, Е. А. Лобода, А. В. Потапов

Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия  
E-mail: dep5@vniitf.ru

На пикосекундной лазерной установке проведена серия экспериментов по интерферометрическому зондированию мишеней из металлических фольг толщиной  $\sim 10$  мкм. Для этой цели разработан двухканальный интерферометр, обеспечивающий регистрацию на двух длинах волн излучения 1054 нм и 527 нм. При интенсивности греющего излучения на мишени  $\sim 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> зарегистрирован ряд спектральных интерферограмм. Определены пространственные и временные зависимости коэффициента отражения и фазового сдвига зондирующего излучения, а также скорость движения поверхностей критической плотности для обеих длин волн.

### **APPLICATION OF SPECTRAL INTERFEROMETRY IN EXPERIMENTS ON ISOCHORIC HEATING OF THIN FOILS BY ULTRASHORT LASER PULSES**

E. S. Borisov, D. S. Gavrilov, A. G. Kakshin,  
E. A. Loboda, A. V. Potapov

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

Experiments on frequency-domain interferometry of thin (10  $\mu\text{m}$ ) metal foil targets have been performed on a picosecond laser facility. For this purpose double-channel interferometer with wavelengths 1054 nm and 527 nm was made. A number of spectral interferograms was recorded at main pulse intensity on a target  $\sim 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>. Spatial and temporal dependences of reflectivity, probe phase shift, and velocity of critical density surfaces for both wavelengths were deduced.

---

3-47

### ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОГО ВАКУУМА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

М. В. Астафурова<sup>1</sup>, С. Л. Добрецов<sup>2</sup>, В. И. Астафуров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ГБОУ «Гимназия 1542», Москва, Россия

<sup>2</sup> НПО «Тайфун», Обнинск, Россия

<sup>3</sup> ФГУП «Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА», Москва, Россия

E-mail: astafurova.maria@mail.ru, dobr@obninsk.ru<sup>1</sup>,  
vastafurov@mail.ru<sup>2</sup>

Представлено доказательство существования фундаментального свойства физического мира, отличного от пространства и времени. Это свойство взаимосвязано с проявлением таких явлений, как электромагнитные волны, электрический заряд, магнитное и электрическое поле. С учетом характера проявления данного свойства предложено рассматривать материальный мир как пространственно-электромагнитный континуум. На этой основе разработана соответствующая модель. Материальный мир рассматривается как волновой векторный пространственно-электромагнитный континуум и как совокупность взаимосвязанных осцилляторов, формирующих иерархические структуры. Наименьший («абсолютный») осциллятор является элементарной ячейкой физического вакуума. Число составляющих пространственного вектора соответствует мерности пространства. Число составляющих электромагнитного вектора соответствует двум видам реально наблюдаемых элементарных электрических зарядов и магнитных полюсов. Колебания электромагнитной структурной компоненты приводят к образованию электромагнитных волн, а колебания пространственной компоненты – к образованию пространственных волн. Вещество и физический вакуум являются взаимосвязанными формами континуума. Предложенная модель позволяет приблизиться к пониманию глубинной природы электрических и магнитных явлений. Составляющие электромагнитного вектора абсолютного осциллятора можно рассматривать как два противоположных по знаку элементарных магнитных заряда. Энергия взаимодействия магнитных зарядов принимается равной энергии аннигиляции электрона и позитрона. В рамках такого рассмотрения процесс рождения пары «электрон–позитрон» являет собой превращение магнитных зарядов в электрические, а процесс аннигиляции электрона и позитрона – превращение электрических зарядов в магнитные. Магнитный монополю как индивидуальная частица вещества не существует в природе. Пространственно-электромагнитная модель открывает возмож-

ность решения ряда проблемных вопросов, связанных с плазменными процессами.

### THE SPATIAL-ELECTROMAGNETIC MODEL OF PHYSICAL VACUUM AND ITS APPLICATIONS

M. V. Astafurova<sup>1</sup>, S. L. Dobretsov<sup>2</sup>, V. I. Astafurov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> High School 1542, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Research and Production Association “Typhoon”,  
Obninsk, Russia

<sup>3</sup> FSUE “Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene”, Moscow, Russia

E-mail: astafurova.maria@mail.ru, dobr@obninsk.ru<sup>1</sup>,  
vastafurov@mail.ru<sup>2</sup>

A proof is given of the existence of the fundamental property of the physical world, different from the space and time. This property is interconnected with the manifestation of such phenomena as electromagnetic waves, electric charge, magnetic field, electric field. Given the nature of manifestation of this property proposed to consider the material world as a spatial-electromagnetic continuum. On this basis, we have developed a corresponding model. The material world is considered as a vector spatial-electromagnetic continuum and as an aggregate of interconnected oscillators forming hierarchical structures. The smallest (“absolute”) oscillator is the unit cell of the physical vacuum. The number of components of the spatial vector corresponds to the observed dimension of space. The number of components of the electromagnetic vector corresponds to the two kinds of observed elemental electric charges and magnetic poles. The oscillations of the electromagnetic structural components lead to the formation of the electromagnetic waves. The oscillations of the spatial structural components lead to the formation of the spatial waves. The substance and the physical vacuum are interconnected forms of the continuum. The proposed model allows us to reveal the profound nature of the electric and magnetic phenomena. The components of the electromagnetic vector of absolute oscillator can be considered as two opposed by sign elementary magnetic charges. The energy of the interaction of the magnetic charges is accepted to be equal to the energy of the annihilation of the electron and the positron. As part of such consideration the process of the formation of a pair “electron-positron” is a conversion of the magnetic charges into the electrical charges and the process of the annihilation of an electron and a positron is the conversion of the electrical charges in the magnetic charges. Magnetic monopole, as an individual particle of substance, doesn't exist in nature. The spatial-electromagnetic model opens the possibility of solving some problem issues related to plasma processes.

3-48

**КОНТРАСТ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА  
МУЛЬТИ-ТЕРАВАТТНОЙ ПИКОСЕКУНДНОЙ  
УСТАНОВКИ НА ФОСФАТНОМ  
НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ**

Д. С. Гаврилов, А. Г. Какшин, Е. А. Лобода

Российский Федеральний Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия  
E-mail: dep5@vniitf.ru

В докладе представлены результаты исследования контраста лазерного импульса пикосекундной установки на фосфатном неодимовом стекле. Рассмотрены все типы излучения, воздействующие на мишень до прихода рабочего импульса и имеющие различную природу возникновения. Измерения проведены во всех интересных интервалах времени с требуемыми разрешением и динамическим диапазоном. Обнаружена серия

ультракоротких предимпульсов на временном участке, сопоставимом с длительностью чирпа ( $\sim 1$  нс), существование которых вызвано присутствием плоскопараллельных оптических элементов в тракте лазерной системы.

**THE PULSE CONTRAST OF THE MULTI-TW  
PHOSPHATE ND: GLASS 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

We report on the results of the phosphate Nd:glass laser facility pulse contrast investigation. All types of radiation before the main pulse arrival, having various geneses and the degree of influence on the target surface, are thoroughly studied. The measurements were carried out in all interested time intervals with necessary resolution and dynamic range. A set of ultrashort prepulses in the chirp duration time interval ( $\sim 1$  ns), originating from the optical elements with parallel surfaces in the optical system, has been detected.





**Секция 4**

**СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ  
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ  
ПРОЦЕССАХ**

---

**Section 4**

**PROPERTIES OF MATTER  
AT HIGH-INTENSITY  
PROCESSES**



## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Х. Ху, Л. Цао, Ю Чэн, Г. Ван, Ц. Юй

Лаборатория исследований физики ударной волны и детонации,  
Институт физики жидкостей, КАИФ, Маньян, Китай

В данной работе представлено экспериментальное исследование взаимодействия фронта ударной волны со свободной поверхностью и его влияние на формирование распределения однородного состояния в приповерхностной зоне. Медная метаемая пластина, разогнанная магнитным генератором, создающая ударную волну амплитудой 10–40 ГПа и длительностью фронта  $10^1$ – $10^2$  нс воздействует на образец из чистого железа субмиллиметровой толщины. Профиль скорости ударной волны, который несет информацию о характеристиках фазового перехода, измеряется на свободной поверхности и на свободной поверхности, контактирующей с окном (приблизительно эквивалентно профилю скорости внутри образца перед началом взаимодействия фронта ударной волны со свободной поверхностью). Образец, подвергшийся ударному воздействию, анализировался в ходе металлургического исследования с целью определения состояния материала, что касается, отличия состояния фазового перехода в приповерхностной зоне. В работе описывается возможность полного фазового перехода в приповерхностной зоне, особенно в отношении ударного плавления и механизма микрооткола свободной поверхности, а также анализируются результаты МК численного моделирования процесса взаимодействия фронта ударной волны со свободной поверхностью.

## INTERACTION BETWEEN SHOCK FRONT AND FREE SURFACE FROM EXPERIMENTAL VIEW

H. Hu, L. Cao, Y. Chen, G. Wangji, J. Yu

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

The interaction of shock front with the free surface and its influence on the formation of heterogeneous state distribution in the near surface region is studied experimentally. Pure iron specimen of sub-millimeter thickness is impacted by magnetically-driven copper flyer creating shock wave with the amplitude of 10–40 GPa and front duration of  $10^1$ – $10^2$  ns. The velocity profile of shock wave bearing the phase transition characteristics information is measured on free surface and on free surface in contacting with a window (approximately equivalent the velocity profile inside the specimen before shock front interacts with the free surface). The shocked specimen is given to metallurgical analyze to reveal the material state referring to the phase transition state difference in the near surface region. Discussion focused on the possibility of full phase transition in near free surface region, especially referring to shock melting and micro-spall mechanism free surface, is

introduced with the analyze of the results of МК simulation conducted for the interaction of shock front with the free surface process.

## ДИНАМИЧЕСКИЙ РАЗЛОМ ОБЪЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПРИ ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

Т. Ли, Д. Тан, Ку. Ли, Д. Фан, Х. Тан, Х. Фу

Национальная лаборатория физики ударных волн  
и детонации, Институт физики жидкости, Китай

Массивное металлическое стекло (ММС) является привлекательным материалом для потенциального военного применения, и его разрушение под ударной нагрузкой представляет безусловный интерес. Проведено исследование динамического разрушения Zr-содержащего ММС при скорости нагружения порядка  $10^6$ /с. Эксперименты с плоской ударной волной проводились с помощью электрической пушки, в которой пластиковый снаряд толщиной 0,5 мм разгонялся до высокой скорости порядка 3 км/с. В испытании с электрической пушкой образец покрывался LiF пленкой для того, чтобы получить скорость поверхностных частиц в Системе Интерферометрии Смещения от Любого Отражателя (DISAR), и после испытания образец восстанавливался в исходное состояние. Металлургический анализ этого образца выдал информацию о процессах повреждения или разрушения при высоко-скоростном нагружении. Металлографический микроскоп позволил нам проследить три различных режима разрушения: режим микропор, режим расслоения и смешанный режим. Эти наблюдения были объяснены образованием пустот в результате сдвиговой локализации в аморфной микроструктуре ММС, особенно при микропоровом разрушении, вызванным динамическим растягивающим напряжением при взаимодействии между хвостовой и отраженной волнами разрежения.

## DYNAMIC FRACTURE OF BULK METALLIC GLASSES AT HIGH STRAIN RATE

T. Li, D. Tan, Q. Li, D. Fan, X. Tan, H. Fu

National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics,  
Institute of Fluid Physics, China

Bulk metallic glass (BMG) is an attractive material for potential military application and its fracture behavior under shock loading is of obvious interest. Dynamic fracture of Zr-based BMG was investigated at high strain rate about  $10^6$ /s. Planar shock experiments were conducted by using an Electric Gun, in which a 0.5 mm thickness plastic flyer was driven to high velocity about 3 km/s. In the EG test, a sample was covered by LiF window in order to obtain interface particle velocity with a Displacement Interferometer System for Any Reflector (DISAR), and the sample was recovered intact after the test. Metallurgical analysis of the recovered sample yield information about damage or fracture processes at high strain rate. The metallograph led us to observe three modes of damage in different,

including microvoid mode, shear band mode and mixed mode. These observations were explained by the evolution of free volumes due to shear localization in the amorphous microstructure of BMG, especially for microvoids damage induced by the dynamic tensile stress under the interaction between rear and reflected rarefaction waves.

4-3

**КИНЕТИКА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА  
«ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО-ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО»  
В УДАРНЫХ ВОЛНАХ**

Дин Л. Престон

Лос-Аламосская Национальная Лаборатория, Лос-Аламос,  
США

Представлена микроструктурная модель кинетики фазового перехода в ударных волнах. Предполагается, что состояние Гюгоню лежит в области метестабильности вокруг границы равновесной фазы «твердое вещество-твердое вещество», следовательно, модель используется при переходах, возникающих на протяжении зарождения и роста. Модель учитывает как однородное, (возникающее под действием высоких температур), так и неоднородное (катализируемое дефектами кристаллов) зарождение во фронте ударной волны, дальнейший рост зародышей и их окончательное слияние. Пространственно-временная зависимость объемной доли рассчитывается с помощью кинетической теории Колмогорова-Джонсона-Мэла-Аврами. Явное выражение скорости границы раздела, которое появляется в уравнении Аврами, берется из модели фазового поля [V. I. Levitas и D. L. Preston, Phys. Rev. B 66, 134206 и 134207 (2002)]; в термодинамическую движущую силу, которая распространяет границу раздела, входит разность свободной энергии фаз, действие перехода, а также атермический порог, связанный с дефектами кристалла [V. I. Levitas, D.-W. Lee и D. L. Preston, Int. J. Plasticity 26, 395 (2010)]. Действие перехода учитывает сдвиговые напряжения, вызванные ударной волной, а также остаточные величины, связанные с двухфазной микроструктурой. Уравнение пластического состояния двухфазного материала, которое вычисляется с помощью объемной доли, полученной на основе теории Колмогорова-Джонсона-Мэла-Аврами, и теперь стандартные результаты из литературных источников (Crisfield, Eshelby и Hill), а также уравнение теплопереноса объединяются с термоупругими уравнениями. Решение данной системы уравнений дает нестационарный двухволновой ударный профиль. Мы сопоставляем эволюцию этого ударного профиля со скоростью зарождения и скоростью границы раздела. Представлено несколько примеров эволюции микроструктуры при ударном нагружении. Мы также сравниваем квазистатическое и ударно-волновое нагружение и обнаруживаем, что произведение объемной доли фазы на ударную адиабату приблизительно равно объемной доле при квазистатическом нагружении до такой же деформации, как отмечают Боеттгер и Уоллис [J. C. Boettger и D. C. Wallace, Phys. Rev. B 5, 2840 (1997)].

**SOLID-SOLID PHASE TRANSFORMATION  
KINETICS IN SHOCK WAVES**

Dean L. Preston

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA

A microstructural model of phase transformation kinetics in shock waves is presented. It is assumed that the Hugoniot state lies in the region of metastability around an equilibrium solid-solid phase boundary, hence the model applies to transformations occurring through nucleation and growth. The model accounts for both homogeneous (thermally-driven) and heterogeneous (catalyzed by crystal defects) nucleation in the shock front, the subsequent growth of the nuclei, and their eventual coalescence. The spatiotemporal dependence of the volume fraction is calculated using KJMA kinetic theory. An explicit expression for the interphase interface speed, which appears in the Avrami equation, is provided by a phase field model [V. I. Levitas and D. L. Preston, Phys. Rev. B 66, 134206 & 134207 (2002)]; the thermodynamic driving force for interface propagation includes the free energy difference of the phases, the transformation work, and an athermal threshold associated with crystal defects [V. I. Levitas, D.-W. Lee, and D. L. Preston, Int. J. Plasticity 26, 395 (2010)]. The transformation work accounts for shear stresses due to the shock wave as well as residuals associated with the two-phase microstructure. The plastic constitutive relation of the two-phase material, which is computed using the KJMA-based volume fraction and now standard results from the literature (Crisfield, Eshelby, and Hill), and the heat transport equation are coupled to the thermoelastic equations. The solution of this coupled set of equations yields a non-steady two-wave shock profile. We relate the evolution of this shock profile to the nucleation rate and interface speed. Several examples of shock-induced microstructure evolution are presented. We also compare quasi-static to shock wave loading and find that the product phase volume fraction on the shock Hugoniot is approximately equal to the volume fraction under quasi-static loading to the same strain, as noted by Boettger and Wallace [J. C. Boettger and D. C. Wallace, Phys. Rev. B 5, 2840 (1997)].

4-4

**УДАРНО-ВОЛНОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ  
УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК**

С. Ю. Ананьев<sup>1</sup>, Б. Д. Янковский<sup>1</sup>, М. Mases<sup>2</sup>,  
J. Waldbock<sup>3</sup>, М. Dossot<sup>3</sup>, X. Devaux<sup>3</sup>,  
E. McRae<sup>3</sup>, A. V. Soldatov<sup>2</sup>,  
В. В. Милявский<sup>1</sup>, А. Ю. Долгобородов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва,  
Россия

<sup>2</sup>Lulea University of Technology, Lulea, Sweden

<sup>3</sup>CNRS-University of Lorraine, Villers-les-Nancy, France

E-mail: Serg.ananьев@gmail.com

Стабильность углеродных нанотрубок при статическом сжатии зависит от их диаметра и количества стенок. Целью данного исследования было исследование структурной стабильности двустенных (ДУНТ)

и одностенных (ОУНТ) углеродных нанотрубок под воздействием высоких давлений, возникающих при ударно-волновом нагружении, и определение порога, выше которого происходят значительные повреждения структуры нанотрубок. Ранее были проведены эксперименты, продемонстрировавшие высокую структурную стабильность ДУНТ при статическом сжатии.

Ударно-волновому нагружению подвергались углеродные нанотрубки трех типов: ДУНТ с содержанием нанотрубок около 60%, ДУНТ с содержанием нанотрубок 95%, и ОУНТ, содержащие более 95% нанотрубок и исходном веществе. Пиковые давления в образцах достигались за счет многократного переотражения ударной волны между стенками ампулы и были равны 14–98 ГПа для ДУНТ и 19, 26, 36, 52 ГПа для ОУНТ. После опытов проводился анализ сохраненных образцов методами электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM) и комбинационного (рамановского) рассеяния (КРС). Результаты просвечивающей электронной микроскопии показали, что при давлениях свыше 36 ГПа происходят значительные повреждения нанотрубок – они ломаются, сплющиваются и даже разворачиваются вдоль оси, образуя листы графена. Структурные повреждения нанотрубок увеличиваются с ростом давления в ударной волне, анализ методом КР показал скачкообразное увеличение отношения интенсивностей D- и G-пикулов между 26 и 30 ГПа. Разрушение нанотрубок вследствие высокой температуры при нагружении было незначительным по сравнению с эффектом от воздействия ударной волны за короткое время в эксперименте. Порог структурной стабильности ДУНТ лежит между давлениями в 26 и 30 ГПа для ДУНТ и ниже или около 19 ГПа для ОУНТ. ДУНТ продемонстрировали более высокую устойчивость к структурным повреждениям при статическом сжатии, чем при ударно-волновом нагружении (динамическом сжатии).

### THE SHOCK WAVE COMPRESSION OF CARBON NANOTUBES

S. Yu. Ananev<sup>1</sup>, B. D. Yankovsky<sup>1</sup>, M. Mases<sup>2</sup>,  
J. Waldbock<sup>3</sup>, M. Dossot<sup>3</sup>, X. Devaux<sup>3</sup>, E. McRae<sup>3</sup>,  
A. V. Soldatov<sup>2</sup>, V. V. Milyavskiy<sup>1</sup>, A. Yu. Dolgoborodov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IIT RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lulea University of Technology, Lulea, Sweden

<sup>3</sup>CNRS-University of Lorraine, Villers-les-Nancy, France

E-mail: Serg.ananev@gmail.com

Stability of carbon nanotubes at static compression depends on their diameter and number of walls. The purpose of this study was to probe the structural stability of double wall (DWCNT) and single wall (SWCNT) carbon nanotubes under extreme pressure and to determine the threshold above which significant structural damage is induced.

A three types of carbon nanotubes were exposed to a shock-wave loading: the DWCNTs containing approximately 60% of CNTs, the DWCNTs containing 95% of CNTs, and the HiPco SWCNTs containing more than 95% of CNTs. Peak shock pressures in the specimens were achieved by several reverberations of waves between the walls of the recovery ampoules and were 14–98 GPa for

DWCNTs and 19, 26, 36, 52 GPa for SWCNTs. The recovered samples were characterized by Raman and HRTEM. HRTEM showed that at pressures above 36 GPa CNTs were crashed, flattened and deployed along the axis, forming a sheets of graphene. Structural damage of the nanotubes increases with increasing of pressure in the shock wave, Raman showed an abrupt increase in the intensity ratio of D- and G- peaks between 26 and 30 GPa. The CNT destruction due to high temperature during the shock was minor compared to that of the effect of the pressure influence for the short exposure time in the experiment. Structural stability threshold lies between of 26 and 30 GPa for DWNTs and below or at 19 GPa for SWNTs. DWCNTs demonstrated higher stability to structural damage under the static compression than under dynamic compression.

4-5

### БЕСПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ КОНДЕНСИРОВАННОЙ СРЕДЫ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ

В. Ф. Анисичкин

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

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

В практике основными являются уравнения состояния, опирающиеся на экспериментальные данные. При высоких плотностях энергии таковыми являются ударно-волновые данные, которые получены для многих представляющих интерес веществ.

В ряде задач, например при анализе распространения ударных и сейсмических волн в мантии и ядре Земли, Луны, при моделировании столкновений небесных тел или взрывов в их недрах, состав среды может быть определен лишь приблизительно. Следовательно, при решении таких задач не целесообразно строить многокомпонентные, детальные уравнения состояния, которые, не приводя к более достоверным результатам, могут существенно усложнить моделирование изучаемых процессов.

В построении уравнения состояния хорошо себя показала простая модель, основанная на понятии сжимаемого коволюма, в которой тепловое давление  $P_h$  создается частицами идеального газа, занимающего «свободный» от упругих частиц объем  $V_{id}$  [1]. Развивая модель, уравнение состояния можно представить в виде:

$$P(V, T) = P_p(V) + P_h(V_{id}, T),$$

где  $P$  – давление,  $V$  – объем,  $T$  – температура,  $P_p$  – потенциальная составляющая давления.

Дополнительно привлеченная универсальная связь между ударной адиабатой  $P_H$  и кривой потенциального сжатия среды  $P_p$  для не «очень» сильных ударных волн [2]:

$$P_H = P_p(V/V_0),$$

следующая из экспериментальных данных и соображений подобия и размерности, позволяет построить уравнение состояния без подгоночных параметров.

Расчет температуры, скорости звука, адиабатических процессов в конденсированных средах при высоких плотностях энергии и сравнение результатов с известными данными показывает вполне удовлетворительное согласие.

Благодаря простоте и физической «прозрачности» уравнение состояния может быть полезно при планировании взрывных экспериментов и для оценки основных параметров среды при высоких плотностях энергии, не требуя громоздких расчетов, но не уступая в точности в области применимости.

### Литература

1. Копышев В. П. Теория уравнений состояния / Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2009.
2. Анисичкин В. Ф. Обобщенные ударные адиабаты и нулевые изотермы элементов // Физика горения и взрыва. 1979, № 2, с. 152–157.

### PARAMETER-FREE EQUATION OF STATE OF CONDENSED MATTER UNDER HIGH DENSITY OF ENERGY

V. F. Anisichkin

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

In practice there are mainly used equations of state based on the experimental data. Under high density of energy the same are shock-wave data, which are known for many substances to be of interest.

In some problems, for example, under analysis of shock and seismic wave propagation in the Earth mantle and core, under simulation of collision of celestial bodies, or explosion in their interiors, the matter composition may be determined approximately. So, for such problem solution it is not appropriate to construct complex equation of state, which do not produce more reliable results, but complicate the simulation of the investigated processes.

In the construction of the equation of state is successful the simple model based on the idea of compressible volume, where the thermal pressure build up by the ideal gas particles placed in the “free” volume  $V_{id}$  [1]. To evaluate model it is possible to write equation of state as follows:

$$P(V, T) = P_p(V) + P_h(V_{id}, T),$$

where is  $P$  – pressure,  $V$  – volume,  $T$  – temperature,  $P_p$  – potential part of pressure.

If to use universal connection between Hugoniot curve  $P_H$  and potential compression curve  $P_p$  for the not strong shock wave:

$$P_H = P_p(V/V_0),$$

which follows from experimental data and the theory of similarity, it helps to construct equation of state without of additional parameters.

Calculation of temperature, sound velocity, adiabatic processes for condensed matters under high energy densities and comparison with the known data demonstrate good accordance.

Due to simplicity and physical “transparency” equation of state may be used for planning of the explosive experi-

ments and to evaluate the basic parameters of matter under high density of energy without of complex calculations, but with a good accuracy in the range of validity.

### References

1. Kopsishev V. P. Theory of equation of state / Sarov: “Russian Federal Nuclear Center – VNIITF”, 2009. (In Russian).
2. Anisichkin V. F. Generalized Hugoniot and 0K isotherms of elements // Combustion, Explosion and Shock Waves. 1979, № 2, p. 152–157. (In Russian).

4-6

### ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

А. Н. Ищенко, С. А. Афанасьева, Н. Н. Белов, В. В. Буркин, К. С. Рогаев, А. Н. Табаченко, Н. Т. Югов

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия

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

Одним из основных направлений повышения проникающей способности инертных ударников в металлические преграды является разработка высокоскоростных средств метания и использование новых нетрадиционных материалов с более совершенным комплексом физико-механических свойств для их изготовления.

При выполнении данной работы получены материалы на основе вольфрама с дополнительным введением в порошковые заготовки ультрадисперсных керамических порошков оксидного и/или неоксидного типов. При возможности регулировать конечную структуру и свойства композиционных материалов получены образцы ударников на основе металлической матрицы ВНЖК: пористые с окисью магния (W-Ni-Fe-Co-MgO) с содержанием наполнителя 5–20 вес.% средней плотностью 6–14 г/см<sup>3</sup> и с содержанием В<sub>4</sub>С 8 вес.% (W-Ni-Fe-Co-В<sub>4</sub>С) средней плотностью 6,3 г/см<sup>3</sup>. Экспериментальные образцы сплавов получены методом жидкофазного спекания. Для баллистических испытаний из них изготовлены ударники массой 30 г диаметром 13 мм и различной длиной в зависимости от средней плотности композита. Сравнение проникающей способности исследуемых составов проводилось с ударником из монолитного сплава ВНЖ-95. Для математического моделирования процессов высокоскоростного взаимодействия с учетом наполнителя (MgO и В<sub>4</sub>С) в составе композиционного материала построена смешанная модель. Получены результаты расчетно-экспериментальных исследований высокоскоростного взаимодействия ударников из разработанных материалов со стальными преградами в диапазоне скоростей порядка 2,8 км/с. Результаты этих исследований показали повышение проникающей способности металлокерамических ударников до ~8%. Важным результатом является характер проникания ударников с наполнителем с низкой средней плотностью. Наблюдается воронкообраз-

ный кратер с объемом, превышающим объем кратера от ударника из монолитного сплава ВНЖ-95 до ~30%.

Работа выполнена по заданию Минобрнауки РФ № 1.4336.2011 и при частичной поддержке гранта РФФИ № 12–01–00227.

### BEHAVIOR OF CERMET MATERIALS AT HIGH IMPACT

A. N. Ishchenko, S. A. Afanasyeva, N. N. Belov,  
V. V. Burkin, K. S. Rogaev, A. N. Tabachenko, N. T. Yugov

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

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

One of the main ways of increasing the penetration capability of inert metal drummers in hedge funds is to develop high-speed throwing and use of new and innovative materials with a perfect set of physical and mechanical properties to make them.

When performing this operation on the basis of the materials obtained with the additional administration of tungsten powder in the preform ultradispersed ceramic oxide powders and/or non-oxide type. With the ability to regulate the ultimate structure and properties of the composite materials obtained on the basis of samples shock metal matrix TNIC (Tungsten-nickel-iron-cobalt): a porous magnesium oxide (W-Ni-Fe-Co-MgO) with a filler content of 5–20 wt. % Of the average density of 6–14 g/cm<sup>3</sup> and B<sub>4</sub>C content of 8 wt. % (W-Ni-Fe-Co-B<sub>4</sub>C) average density 6.3 g/cm<sup>3</sup>. Experimental alloy samples were prepared by liquid phase sintering. Ballistic tests of the strikers are made mass of 30 g and of 13 mm diameter and varying in length depending on the average density of the composite. Comparison of the penetrating power of the test compounds was carried out with the drummer of monolithic alloy residence TNI-95. For mathematical modeling of high-speed interaction considering filler (MgO and B<sub>4</sub>C) as part of a composite material constructed blending model. The results calculations and experimental studies of high-speed interaction of projectiles designed materials with steel barriers between the speeds of the order of 2.8 km/s. The results of these studies showed an improvement in the ability of cermet projectiles up to ~8%. An important result is the character of penetration projectiles filled with low average density. There is a funnel-shaped crater with a volume greater than the volume of the crater from the striker of monolithic alloy residence TNI-95 to ~30%.

Work is done on the instructions of the Ministry of Education of the Russian Federation № 1.4336.2011 and supported in part by RFBR grant № 12–01–00227.

4-7

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФРАГМЕНТАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ

И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

E-mail: malgacheva@icmm.ru

Исследовалась фрагментация трубчатых керамических образцов с характерным размером  $L = d/r_2$  меньшим единицы, где  $d$  – толщина трубки,  $r_2$  – внутренний радиус трубки. Цилиндрические трубки нагружались электровзрывом коаксиального проводника на экспериментальной установке [1, 2] в дистиллированной воде. Были получены распределения фрагментов по массе  $N(m)$  в зависимости от энергии нагружающего импульса методами «взвешивания» и «фотографии», описанными в работе [2]. Установлено, что зависимости  $N(m)$  имели двойное распределение: для 3D-фрагментов – степенное распределение, для фрагментов с прямоугольной геометрической формой – экспоненциальное распределение. Похожее, двойное распределение, наблюдалось авторами в работе [3]. Точка перегиба полученных распределений двигалась в сторону меньших масштабов с увеличением энергии нагружения.

Помимо статистического исследования фрагментации трубчатых образцов были зарегистрированы профили скорости внешней поверхности трубок в момент разрушения их в жидкости с помощью системы VISAR [4].

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ (№ 14-01-96025-р\_урал\_a, № 14-01-00842-А, № 14-01-96012-р\_урал\_a).

#### Литература

1. Банникова И. А., Наймарк О. Б., Уваров С. В. Разработка методики по исследованию релаксационных свойств жидкостей с использованием электровзрывной установки. Сборник трудов международной конференции «XV Харитоновские тематические научные чтения». 2013. – С. 745–754 (в печати).
  2. Банникова И. А., Наймарк О. Б., Уваров С. В. Исследование фрагментации трубчатых керамических образцов с использованием электровзрывной установки. Материалы международной конференции «Иерархически организованные системы живой и неживой природы» 9–13 сентября 2013, Томск, Россия. Томск: ИФПМ СО РАН. – С. 206–209. (CD).
  3. Hiroaki Katsuragi, Satoshi Ihara, Haruo Honjo, Explosive Fragmentation of a Thin Ceramic Tube Using Pulsed Power. Physical Review Letters. 95, 095503, 2005. – P. 1–4.
- Bannikova Irina, Uvarov Sergey, Naimark Oleg. Self-similarity of the wave profiles in water under dynamic loading. Book of Abstracts. XXIX International Conference on Equations of State for Matter. March 1–6, 2014, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. – С. 62–63.

## STATISTICAL REGULATIONS OF CERAMIC TUBE SAMPLE FRAGMENTATION

I. A. Bannikova, S. V. Uvarov, O. B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics Russian Academy  
of Science Ural Branch, Perm, Russia

E-mail: malgacheva@icmm.ru

Fragmentation of the ceramic tube samples with the typical size of  $L = d/r_2$ , less than one, where  $d$  is the tube thickness and  $r_2$  is the tube internal radius was studied. Cylindrical tubes were loaded through the coaxial conductor electroexplosion at the experimental facility [1, 2] in distilled water. The “weighing” and “photography” methods described in paper [2] were used to obtain the fragment mass distributions  $N(m)$  versus the energy of the loading pulse. The  $N(m)$  dependencies were stated to have double distribution: as for the 3D-fragments, the distribution was “power-series” and for the rectangular ones – exponential. The authors observed a similar double distribution in paper [3]. In the obtained distributions, the inflection point moved towards less dimensions with increasing loading energy.

In addition to statistical study of the tube sample fragmentation, the velocity profiles of the tube outer surface were registered by the VISAR system at the moment of their fragmentation in the fluid [4].

The study is supported by RFBR (under grants # 4-01-96025-p\_ural\_a, # 14-01-00842-A, # 14-01-96012-r\_ural\_a).

### References

1. Bannikova I. A., Naimark O. B., Uvarov S. V. Development of the method to study relaxation properties of fluids using electrical explosion facility. Proceedings of “XV Khariton Scientific Talks”. 2013. – P. 745–754 (in press).
2. Bannikova I. A., Naimark O. B., Uvarov S. V. Studies of ceramic tube specimen fragmentation using electrical explosion facility. Proceedings of International Conference “Hierarchized Systems of Animated and Inanimate Nature” September 9–13, 2013, Tomsk, Russia. Tomsk: Institute of Physics of Strength and Material Science RAS SB. – P. 206–209. (CD).
3. Hiroaki Katsuragi, Satoshi Ihara, Haruo Honjo, Explosive Fragmentation of a Thin Ceramic Tube Using Pulsed Power. Physical Review Letters. 95, 095503, 2005. – P. 1–4.
4. Bannikova Irina, Uvarov Sergey, Naimark Oleg. Self-similarity of the wave profiles in water under dynamic loading. Book of Abstracts. XXIX International Conference on Equations of State for Matter. March 1–6, 2014, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. – P. 62–63.

4-8

## МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГРЮНАЙЗЕНА

Р. К. Бельхеева

Новосибирский государственный университет, Новосибирск,  
Россия

E-mail: rimbel@academ.org, rumia@post.nsu.ru

Исследование поведения пористых веществ при ударно-волновом нагружении представляет интерес для решения таких прикладных задач как ударно-вол-

новой синтез веществ с заданными свойствами, динамическое компактирование, горение и др. Сжимаемость пористых тел при динамическом воздействии изучается также с целью получения информации об уравнении состояния вещества.

Для описания вещества, подвергнутого ударно-волновому воздействию, используют уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена. Если ударная волна слабая, то коэффициент Грюнайзена  $\gamma$  считают постоянным, если ударная волна сильная, то используют формулу

$$\gamma = \gamma_0 \left( \frac{\rho_{T0}}{\rho} \right)^l, \quad (1)$$

где  $\gamma_0$  – коэффициент Грюнайзена при нормальных условиях,  $\rho$ ,  $\rho_{T0}$  – соответственно плотность вещества и плотность конденсированного вещества при нормальных условиях, показатель степени  $l$  для металлов приближенно равен единице.

Анализ данных, приведенных в литературе, показывает, что с ростом интенсивности ударно-волновых нагрузок величина коэффициента Грюнайзена уменьшается. При небольших пористостях  $\left( \frac{\rho_{T0}}{\rho} < h \right)$ , где  $h = 2/\gamma + 1$ , когда ход ударных адиабат нормален, зависимость (1) описывает именно такое изменение коэффициента Грюнайзена. Но при больших пористостях когда  $\frac{\rho_{T0}}{\rho} > h$ , вещество под действием ударной волны сначала уплотняется, а затем начинает расширяться. Если в этом диапазоне давлений коэффициент Грюнайзена описывать соотношением (1), то он будет увеличиваться по сравнению с нормальным значением  $\gamma_0$ . Поэтому в данной работе предлагается считать, что при низких давлениях, пока сильно пористое вещество ведет себя обычным образом и под действием ударной волны уплотняется до некоторого предельного значения плотности, зависимость коэффициента Грюнайзена от плотности описывается уравнением (1). С увеличением нагрузок, когда относительная роль теплового давления увеличивается настолько, что плотность вещества начинает уменьшаться и оказывается меньше начальной, зависимость коэффициента Грюнайзена от плотности будет описываться уравнением

$$\gamma = \gamma_0 \left( \frac{\rho_{T0}}{\rho} \right)^{-l}, \quad (2)$$

где  $l$  имеет такое же значение, как и в случае (1).

Кроме зависимости (2) также рассмотрена логарифмическая зависимость коэффициента Грюнайзена от плотности и зависимость коэффициента Грюнайзена от давления нагружения.

Для сравнения рассматриваемых моделей проведены численные расчеты ударно-волнового нагружения и изоэнтропического расширения сплошных и пористых меди, железа и углерода.

Ключевые слова: уравнение состояния, пористое вещество, ударная адиабата, изоэнтропа расширения.



## NHE MODELS FOR DESCRIPTION OF GRÜNEISEN COEFFICIENT

R. K. Belkheeva

Novosibirsk state University, Novosibirsk, Russia

E-mail: rimbel@academ.org, rumia@post.nsu.ru

The study of the behavior of porous substances under shock wave loading is of interest for solving applied problems such as shock-wave synthesis of substances with the properties set, dynamic compacting, combustion and other. Compressibility of porous substances in the dynamic impact is also being studied with the aim of obtaining information about the equation of state of matter.

To describe the material subjected to shock-wave action the equation of state in the form of Mie-Grüneisen is used. If the shock wave is of low intensity, then the Grüneisen coefficient  $\gamma$  is assumed to be constant and equal to the Grüneisen coefficient under standard conditions  $\gamma_0$ .

When the shock pressure is about 100 GPa then the dependence of the Grüneisen coefficient  $\gamma$  is approximately interpolated by the power function

$$\gamma = \gamma_0 \left( \frac{\rho_{T0}}{\rho} \right)^l, \quad (1)$$

where  $\rho$  is the substance density,  $\rho_{T0}$  is the density of condensed substance under standard conditions and the power index  $l$  is approximately equal to unity for metals.

The data presented in the literature on shock-wave loading substances indicate that the Grüneisen coefficient decreases with increasing pressure loading.

If the porosity of the substance is such that  $\frac{\rho_{T0}}{\rho} < h$ ,

where  $h = 2/\gamma + 1$ , the equations of state, in which the Grüneisen coefficient is given by the formula (1), describes the porous material under shock wave impact adequately.

But if the porosity is such that  $\frac{\rho_{T0}}{\rho} > h$ , behavior of the shock adiabat becomes abnormal: with increasing pressure the density of matter decreases.

In the case of large porosities in the abnormal behavior of the shock adiabat Grüneisen coefficient given by the formula (1) will increase with increasing pressure. In this paper for describing Grüneisen coefficient at high porosity we propose to use the following relation

$$\gamma = \gamma_0 \left( \frac{\rho_{T0}}{\rho} \right)^{-l}, \quad (2)$$

wherein  $l$  has the same meaning as in the case (1).

Besides relation (2) the Grüneisen coefficient logarithmic dependence of the density, and the Grüneisen coefficient dependence of the loading pressure are also considered.

For comparison of the considered models the numerical calculations of shock wave loading and isentropic expansion are performed for solid and porous copper, iron and carbon.

Key words: equation of state, porous substances, shock adiabat.

4-9

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТАЛЛОВ

Д. А. Билалов, М. А. Соковиков, В. В. Чудинов,  
В. А. Оборин, А. И. Терехина, О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

E-mail: ledon@icmm.ru

Исследование посвящено моделированию процесса высокоскоростного деформирования с целью изучения механизмов локализации пластического течения и стабильности процесса разрушения металлов. Рассматривались две задачи.

Первая задача посвящена моделированию процесса высокоскоростного нагружения на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского (сжатие) специальных образцов типа «сдвиг-сжатие». Это цилиндрические образцы с прямоугольным вырезом под углом  $45^\circ$ , таким образом, что при их деформировании преобладающей является сдвиговая компонента тензора деформаций, что позволяет проводить исследование процесса деформирования, близкого к чистому сдвигу.

Постановка второй задачи соответствует экспериментальной схеме, реализованной в работах А. Marchand, J. Duffy (1988) и Н. Giovanola (1988) по динамическому деформированию металлов на установке Гопкинсона-Кольского (сдвиг при кручении) полых цилиндрических образцов с регистрацией «in-situ» неоднородности деформирования оптическими методами и методом инфракрасной термографии, и последующим анализом структуры на сохраненных образцах. В данных работах были установлены три характерные стадии развития динамического разрушения: квазиоднородное пластическое течение во всем деформируемом объеме, локализация пластической деформации на характерном масштабе и формирование полос адиабатического сдвига, предшествующее разрушению образца. Модель деформируемого твердого тела, отражающая связь нелинейной кинетики формирования многомасштабных коллективных мод дефектов с релаксационными свойствами (пластичностью) и локализацией разрушения, использована для описания стадийности пластического течения и формирования полос локализованного (адиабатического) сдвига с учетом кинематических особенностей развития неоднородного пластического течения «сдвиг при кручении». С учетом геометрии образцов и способа деформирования обобщена одномерная постановка задачи. Был проведен ряд численных экспериментов, в ходе которых была установлена зона локализации деформации. Результаты численных расчетов качественно соответствуют экспериментальным данным.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы РАН 12-1-012-ЯЦ, грантов РФФИ 13-08-96025 р\_урал\_a, 14-01-00842\_a, 14-01-31193.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF LOCALIZATION OF PLASTIC STRAIN OF METALS UNDER DYNAMIC LOADING

D. A. Bilalov, M. A. Sokovikov, V. V. Chudinov,  
V. A. Oborin, A. I. Terehina, O. B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia  
E-mail: ledon@icmm.ru

The research is focused on simulation of high-strain rate loading to study the mechanisms of plastic flow localization and stages of damage-failure of metals. Solved two problems.

The first task is devoted to modeling of high-strain load (Kolsky bar compression test) of shear-compression specimens. This cylindrical samples with rectangular cut at an angle of 45°. These specimens are used to study the behavior of the material under shear.

The second task corresponds to dynamic shear loading (Kolsky bar torsion test) of hollow cylindrical specimens. The self-organization in shear band ensembles and the transformation of shear bands into the damage localization areas are described as the generation of multiscale collective modes of microshears. There are three characteristic stages of dynamic strain localization and damage-failure transition: development a quasi-uniform plastic flow, localization of plastic strain on the characteristic scales and the formation of adiabatic shear bands preceding the specimen failure. Model of solid with defects was used to simulate high-strain rate loading. Finite difference method was used for the numerical solution of kinetic equations. Characteristic stages of dynamic strain localization and failure are linked to the specific kind of loading causing inhomogeneous strain distribution along the specimen and generation of collective modes in microshear ensemble with multiscale temporal dynamics associated with self-similar solutions of evolution equation for microshear ensemble. The features of self-organization as the power law for strain localization area are discussed. According to the numerical solution, we can see that the first plastic shear strain has quasi-uniform distribution along the sample. Then there is the localization of strain at the characteristic scale. This is followed by rapid growth of plastic strain extending over smaller characteristic times.

This work was partially support RAS Program 12-1-012-ЯИЦ and RFBR grants 13-08-96025, 14-01-00842, 14-01-31193.

4-10

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛОВ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

И. Н. Бородин<sup>1,2</sup>, А. Е. Майер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Численно исследуются особенности формирования дефектных структур – дислокаций и механических двойников – при сильных динамических деформациях в тестах Тэйлора (соударение цилиндрических образцов с твердой преградой), а также на начальных стадиях процесса динамического канально-углового прессования (ДКУП) [1]. Исследуется влияние распространяющейся по материалу ударной волны на формирование структур дефектов. Для моделирования зарождения и эволюции дефектных подструктур используется пакет программ CRS [2], основанный на оригинальных моделях дислокационной пластичности [3] и двойникования [4]. Обнаружено, что микро локализация пластического течения в полосах сдвига за фронтом ударной волны [5] и образование двойников в обоих случаях приводят к формированию уникальной неоднородной дефектной структуры, не типичной для сильных деформаций в квазистатических условиях нагружения. Эта неоднородность должна приводить к большей устойчивости ультрамелкозернистой структуры, получаемой в результате ДКУП и образованию зерен размером менее 100 нм [6].

Исследования поддержаны грантом Президента Российской Федерации МД-286.2014.1 и РФФИ – проекты № 12-02-31375, 14-01-31454.

### Литература

1. V. V. Popov, E. N. Popova, D. D. Kuznetsov, A. V. Stolbovsky, E. V. Shorohov, Nasonov, P. A. Gaan, G. Reglitz, S. V. Divinski, G. Wilde // *Materials Science & Engineering A* – 2013. – 585. – 281.
2. A. E. Mayer, E. N. Borodin, V. S. Krasnikov, P. N. Mayer // *Proc. 12th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk: HCEI RAS.* – 2014 (in press).
3. A. E. Mayer, K. V. Khishchenko, P. R. Levashov, P. N. Mayer // *Journal of Applied Physics.* – 2013. – 113. – № 19–193508.
4. И. Н. Бородин, С. А. Атрошенко, А. Е. Майер // *Журнал технической физики.* – 2014. – 84. – 8.
5. A. E. Mayer, E. N. Borodin, P. N. Mayer // *Physics of Extreme States of Matter* – 2013. Moscow: JIHT RAS. – 2013. – P. 66–69.
6. И. Н. Бородин, А. Е. Майер // *Журнал технической физики.* – 2013. – 83. – 8. – 76.

## FEATURES OF THE DEFECT STRUCTURE FORMATION IN METALS AT SEVERE PLASTIC DEFORMATION

I. N. Borodin<sup>1,2</sup>, A. E. Mayer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering,  
Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Features of the defect structures (dislocations and mechanical twins) formation are numerically investigated at severe plastic deformation (SPD) realized as the Taylor rod compaction tests or dynamical equal-channel angular pressing (DCAP) [1]. Effect of the shock wave propagation on the defect structure formation is in the focus of our attention. The CRS code [2] is used for simulation of nucleation and evolution of dislocations and twins. This code is based on original models of dislocation plasticity [3] and mechanical twinning [4]. We have founded that both the microlocalization of plastic flow into shear bands [5] and the formation of twins [4] on the shock wave front lead to the appearing of unique defect structure, which is not typical for SPD processes at low strain rates. This inhomogeneity should lead to increasing of stability of the ultrafine-grained structures obtained by DCAP and formation of nanocrystalline grains with size less than 100 nm [6].

This work was supported by the Grant of the President of Russian Federation (MD-286.2014.1) and by the Russian Foundation for Basic Research (Grant Nos. 12-02-31375, 14-01-31454).

### References

1. V. V. Popov, E. N. Popova, D. D. Kuznetsov, A. V. Stolbovsky, E. V. Shorohov, Nasonov, P. A. Gaan, G. Reglitz, S. V. Divinski, G. Wilde // *Materials Science & Engineering A* – 2013. – 585. – 281.
2. A. E. Mayer, E. N. Borodin, V. S. Krasnikov, P. N. Mayer // *Proc. 12th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*, Tomsk: HCEI RAS. – 2014 (in press).
3. A. E. Mayer, K. V. Khishchenko, P. R. Levashov, P. N. Mayer // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – 113. – # 19–193508.
4. I. N. Borodin, S. A. Atroshenko, A. E. Mayer // *Journal of Technical Physics*. – 2014. – 84. – 8.
5. A. E. Mayer, E. N. Borodin, P. N. Mayer // *Physics of Extreme States of Matter* – 2013. Moscow: ИИТ RAS. – 2013. – P. 66–69.
6. I. N. Borodin, A. E. Mayer // *Journal of Technical Physics*. – 2013. – 83. – 8. – 76.

4-11

## ПОВЕДЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МЯГКИХ ГРУНТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А. М. Брагов<sup>1</sup>, В. В. Баландин<sup>1</sup>, А. Ю. Константинов<sup>1</sup>,  
В. Л. Котов<sup>1</sup>, А. К. Ломунов<sup>2</sup>, А. Р. Филиппов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт механики  
Нижегородского государственного университета  
им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород,  
Россия

Поведение грунтовых сред и горных пород при интенсивных кратковременных воздействиях ударного или взрывного характера представляет значительный научный и практический интерес. К настоящему времени опубликовано большое количество результатов исследований мягких грунтов и горных пород. Однако ввиду большого разнообразия их структурного состава и сильной зависимости физико-механических свойств от этого фактора задача определения свойств в широком диапазоне амплитуд и скоростей нагрузок остается на сегодняшний день актуальной.

В сообщении представлены результаты экспериментально-теоретического анализа высокоскоростного деформирования и разрушения некоторых мягких грунтов (песок, глина) и горных пород (туф, известняк, мрамор, гранит). Экспериментальные исследования выполнялись с использованием трех методов:

- Модифицированного метода Кольского.
- Плосковолнового ударного эксперимента.
- Баллистического эксперимента.

В результате проведенных экспериментов были получены кривые динамической сжимаемости, гидростатические кривые и сопротивление сдвигу мягких грунтов в широком диапазоне изменения нагрузок и скоростей деформаций, а также зависимости интегральных нагрузок и коэффициента сопротивления внедрения от скорости удара и формы проникающего твердого тела.

Динамические свойства ряда горных пород были исследованы с использованием модифицированного метода Кольского при испытаниях на простое сжатие, сжатие в обойме, на растяжение с помощью «бразильского теста» и откола в стержнях. Динамическая сжимаемость этих сред определялась в плосковолновых ударных экспериментах.

Наряду с экспериментальными исследованиями было проведено математическое моделирование высокоскоростного деформирования мягких грунтов с использованием модели С. С. Григоряна. По результатам выполненных экспериментов были определены параметры этой модели, а в баллистических экспериментах осуществлена ее верификация. Отмечено, что модель С. С. Григоряна качественно и количественно хорошо описывает результаты баллистических экспериментов.

Процессы разрушения испытанных горных пород моделировалось с использованием известного критерия Н. Ф. Морозова – Ю. В. Петрова. Отмечено, что

критерий хорошо описывает разрушение горных пород в исследованном диапазоне скоростей деформаций и давлений.

**BEHAVIOR OF SOME SOFT GROUNDS  
AND ROCKS UNDER SEVERE  
DYNAMIC LOADING**

A. M. Bragov<sup>1</sup>, V. V. Balandin<sup>1</sup>, A. Yu. Konstantinov<sup>1</sup>,  
V. L. Kotov<sup>1</sup>, A. K. Lomunov<sup>2</sup>, A. R. Filippov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Scientific Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

Behavior of soil ground and rocks under severe short-time explosive and shock loading is of great scientific and practical interest. By now, extensive research data on soft grounds and rocks can be found in literature. However, due to variety of their structural compositions that has a strong influence on physical and mechanical properties, characterization of these properties for a wide range of loading amplitudes and rates is still an urgent problem.

Paper gives experimental and theoretical data on high-rate deformation and fracture of some soft grounds (i. e. sand and clay) and rocks (i. e. tuff, limestone, marble, granite). Three methods were used for the experiments:

- Modified Kolsky method.
- Plane-wave impact method.
- Ballistic method.

These experimental results allowed us to plot both dynamic compressibility curves and hydrostatic curves, as well as to determine soft ground shear resistance for a wide range of different deformation rates and loads; we also demonstrated how integral loads and penetration resistance factor depend on impact velocities and shape of penetrating solid body.

Dynamic properties of certain rocks were studied using modified Kolsky method that included tests for uniaxial compression and compression in a casing, as well as tension tests involving both “Brazilian test” and tension bar splitting. Dynamic compressibility of these rocks was determined in the plane-wave impact experiments.

Besides experimental studies, we applied the Grigoryan model to mathematically simulate high-rate deformation of soft soils. Parameters of this model were determined based on experimental results. Ballistic experiments were conducted to verify the model. The Grigoryan model was noted to adequately describe ballistic experimental results, both qualitatively and quantitatively.

The processes of test rock failure were simulated using well-known criterion proposed by N. F. Morozov and Yu. V. Petrov. This criterion was noted to properly describe rock failure for the given range of deformation rates and pressures.

4-12

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКОЛЬНОГО  
И ОТКОЛЬНОГО СО СМЫКАНИЕМ МЕТАНИЯ  
ПЛАСТИН ИЗ 12Х18Н10Т  
ТОЛЩИНОЙ 1; 1,5; 2 И 3 ММ  
ПРОДУКТАМИ ВЗРЫВА  
МАЛОГАБАРИТНЫХ УСТРОЙСТВ  
С ТРОТИЛОВЫМ ЭКВИВАЛЕНТОМ ДО 250 Г ТНТ**

Е. А. Козлов, С. А. Бричиков, Д. П. Кучко,  
М. А. Ральников, А. В. Ольховский, В. Н. Ногин,  
А. В. Петровцев, Д. М. Шалковский,  
Д. А. Варфоломеев, Н. С. Жилиева

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

E-mail: e. a.kozlov@vniitf.ru

Представлены постановки и результаты взрывных экспериментов по безоткольному и откольному (со смыканием откола) метанию стальных пластин зарядами октоген-содержащего ВВ различной исходной толщины при наличии и отсутствии между шашкой ВВ и метаемой пластиной воздушного зазора с одновременной регистрацией динамики разгона пластины двумя независимыми лазерно-интерферометрическими методиками, построенными по схемам Фабри-Перо и лазерно-гетеродинной, и использующих лазеры с разными длинами волн. Представлены результаты расчетно-теоретического моделирования проведенных взрывных экспериментов.

**EXPERIMENTAL AND CALCULATION STUDY  
OF SPALL-FREE AND SPALL CLOSURE  
LAUNCHING OF 12KH18N10T PLATES HAVING  
1-, 1.5-, 2-, AND 3-MM THICKNESS BY EXPLOSION  
PRODUCTS FROM SMALL-SCALE DEVICES  
WITH UP TO 250 G TNT EQUIVALENT**

E. A. Kozlov, S. A. Brichikov, D. P. Kuchko,  
M. A. Ralnikov, A. V. Olkhovskiy, V. N. Nogin,  
A. V. Petrovstev, D. M. Shalkovskiy,  
D. A. Varfolomeev, N. S. Zhilyaeva

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

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

Consideration is given to experimental setups and results of tests on spall-free and spall (with spall closure) launching of steel plates by HMX-based explosive charges having different initial thickness. Experiments were performed with and without an air gap between an HE cartridge and a plate. Plate acceleration dynamics was registered simultaneously with the help of two independent laser-interferometric techniques, i.e. Fabry-Perot and heterodyne techniques that used lasers with different wave lengths. Explosive experiments were numerically simulated and calculational results are provided and compared with experimental ones.

4-13

### ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

И. Г. Бродова<sup>1</sup>, И. Г. Ширинкина<sup>1</sup>, А. Н. Петрова<sup>1</sup>,  
В. В. Астафьев<sup>1</sup>, Т. И. Яблонских<sup>1</sup>, Е. В. Шорохов<sup>2</sup>,  
Н. Г. Оглезнева<sup>2</sup>, И. Н. Жгилёв<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

E-mail: brodova@imp.uran.ru

Проведено исследование эволюции деформационных структур алюминиевых сплавов с характерным размером зерна 200–600 нм при различных режимах отжига в диапазоне температур 100–400 °С и с различным временем выдержки. Ультрамелкозернистые (УМЗ) структуры в цилиндрических образцах Al–Mn, Al–Zn–Mg–Cu сплавов получали методом динамического канально-углового прессования (ДКУП) со скоростью деформации  $10^4$ – $10^5$  с<sup>-1</sup>.

Структура деформированных и термически обработанных образцов изучалась на макро- и микро-уровнях с помощью сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Фазовые превращения, индуцированные динамической и сдвиговой деформацией, а также изменение фазового состава в процессе отжига исследованы на основании данных рентгеновского структурного анализа.

Для каждого сплава, с учетом их фазового состава, установлены температурные и временные параметры, при которых сохраняется УМЗ состояние, обеспечивающее высокие значения прочности этих материалов.

В сплавах с пересыщенным твердым раствором на основе алюминия определена последовательность постдеформационных релаксационных процессов, включающих возврат, старение и рекристаллизацию.

На основании полученных экспериментальных данных предложены оптимальные режимы комбинированной обработки (ДКУП + т/о) с целью формирования дисперсной структуры и высоких значений механических свойств.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 12-П-2–1009) и гранта УрО РАН для молодых ученых № 14–2-НП-111.

### THERMAL STABILITY OF ULTRAFINE-GRAINED ALUMINUM ALLOYS AFTER DYNAMIC DEFORMATION

I. G. Brodova<sup>1</sup>, I. G. Shirinkina<sup>1</sup>, A. N. Petrova<sup>1</sup>,  
V. V. Astafiev<sup>1</sup>, T. I. Yablonskikh<sup>1</sup>, E. V. Shorokhov<sup>2</sup>,  
N. G. Oglezneva<sup>2</sup>, I. N. Zhgilev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metal Physics, Ural Division, Russian Academy of Sciences, Russia, Yekaterinburg

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

E-mail: brodova@imp.uran.ru

The evolution of deformative structures in Al–Mn, Al–Zn–Mg–Cu aluminum alloys with typical grain size of 200–600 nm during annealing was studied. The annealing was performed at the temperature range 100–400 °C with different durations. The ultrafine-grained structure (UFG) in cylindrical samples was formed by dynamic equal angular pressing (DCAP). The strain rate in DCAP reaches  $10^4$ – $10^5$  s<sup>-1</sup>.

Scanning and transmission electron microscopy was used for the structural characterization after deformation and after annealing. Phase transformations induced by dynamic shear deformation and following heat treatment were investigated by x-rays diffraction method.

For each alloy investigated having phase composition considered the heat treatment conditions (temperature range, duration) are defined. The heat treatment provides a preservation of the UFG state (grain size is less than 1 μm) and high strength of the materials.

In the alloys having supersaturated aluminum solid solution a sequence of post deformation structural relaxation processes (recover, ageing, recrystallization) was determined.

According to experimental data obtained the optimal regimes of complex deformation and heat treatments were proposed.

This work was supported in part by the Program of the Presidium of The Russian Academy of Sciences (project number 12-П-1009-2) and the Grant for young scientists of the Ural Branch of the Russian academy of Sciences № 14-2-НП-111.

4-14

### МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛЕ CU. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В LANL И ИТМФ

А. Н. Анисимов, М. В. Ветчинников, Б. Л. Воронин,  
С. А. Грушин, В. А. Дегтярев, Д. А. Демир,  
М. А. Демина, А. Г. Кечин, С. В. Копкин, В. П. Фомин

Российский федеральный ядерный центр –  
ВНИИ экспериментальной физики, институт теоретической  
и математической физики, Саров, Россия

Приведены результаты молекулярно-динамического моделирования откольных явлений в монокристалле ГЦК Cu при различных ударно-волновых нагрузках.

Постановка численных экспериментов идентична приведенной в работе S-N. Luo, T. C. Germann, and D. L. Tonks, Spall damage of copper under supported and decaying shock loading. *J. Appl. Phys.* 106, 123518 (2009). Цель работы – сравнение с представленными в статье результатами, полученными в Лос-Аламосской лаборатории.

Приведены сравнительные графики поведения во времени скорости свободной поверхности. На соответствующие моменты времени приведены графики пространственного поведения продольной компоненты тензора напряжений, плотности и температуры. Приведены  $x-t$  диаграммы, показывающие процесс развития откола, а также молекулярно-динамические картинки развития дефектных структур во времени.

Основные характеристики в Лос-Аламосской работе получены на основе анализа данных по неподвижным ячейкам. В представленном нами докладе приведены также данные, полученные на основе метода Hardy с различными размерами области усреднения.

За исключением отдельных моментов, получено хорошее согласие с данными, полученными в Лос-Аламосской лаборатории.

**MOLECULAR-DYNAMIC SIMULATION  
OF SPALLATION PHENOMENA  
IN MONOCRYSTAL OF CU. COMPARISON  
OF THE RESULTS FROM LANL AND ITMP**

A. N. Anisimov, M. V. Vetchinnikov, B. L. Voronin,  
S. A. Grushin, V. A. Degtiarev, D. A. Demin,  
M. A. Demina, A. G. Kechin, S. V. Kopkin, V. P. Fomin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research  
Institute of Experimental Physics, Institute of Theoretical and  
Mathematical Physics (ITMP), Sarov, Russia

The paper describes the results of molecular-dynamic simulation of spall damage phenomena in Cu fcc monocrystal at various shock loading. Numerical experimental set-up was identical to the one described in the work by S-N. Luo, T. C. Germann, and D. L. Tonks, Spall damage of copper under supported and decaying shock loading. *J. Appl. Phys.* 106, 123518 (2009). The goal of the work was to compare the results with the ones obtained in Los Alamos National Laboratory.

Profiles of the free-surface velocity behavior in time are provided. The spatial behavior of the longitudinal component of the stress tensor, the density and the temperature are plotted for respective times. There are  $x-t$  diagrams that show the process of the spall evolution, as well as molecular-dynamic pictures of the evolution of the damaged structures with time.

The basic parameters in the Los Alamos work were produced on the basis of the analysis of the data for fixed cells. Our paper also provides the data obtained with Hardy method using different sizes of the averaged area.

There was found a good agreement with the data from Los Alamos Lab except for separate moments.

4-15

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Т. Л. Вихорнова, Л. А. Давыдова, С. А. Гусев,  
Б. Р. Гафаров, В. П. Мельников

Федеральный центр двойных технологий «Союз», Дзержинский  
Московской области, Россия

E-mail: fcddt@monnet.ru

Известно, что механические свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) в сильной степени зависят от скорости деформирования и температуры. При достаточно высокой температуре эти свойства обусловлены вязкоупругим поведением, что позволяет ПКМ испытывать большие предельные деформации даже при относительно высоких скоростях деформирования. Вблизи температуры стеклования происходит резкое изменение механических свойств ПКМ.

В работе рассматривалось влияние скорости деформирования на свойства ПКМ на основе изопренового каучука, наполненного мелкодисперсным мелом и частицами алюминия. Эксперименты проводились на стандартных образцах-лопатках в статической и квазистатической областях нагружения. Диапазон скоростей деформирования в статической области нагружения ограничивался техническими возможностями разрывной машины Instron 5565A и составлял от  $10^{-3}$  до  $10^0$  1/с. Квазистатические испытания проводились на системе для ударных испытаний с падающим грузом Instron CEAST 9350 в соответствии со стандартом ISO 8256 A при скоростях от 31.6 до 316 1/с. Температура во время испытаний варьировалась от  $-30$  до  $+20$  °C. В ходе экспериментов регистрировались: в статической области – диаграммы «напряжение-деформация», в квазистатической области – диаграммы «сила-время» и «удлинение-время» (приведенные затем к виду «напряжение-деформация»).

Диаграммы растяжения образцов в диапазоне скоростей деформирования от  $10^{-3}$  до 316 1/с при температуре  $+20$  °C обнаружили вязкоупругое поведение исследуемого ПКМ. Эксперименты при отрицательных температурах дали возможность определить прочностные характеристики материала вблизи температуры стеклования. В работе обсуждаются вопросы применения принципа температурно-временной аналогии и определения функции температурно-временного сдвига для построения огибающей разрывов по Смитцу.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION  
OF POLYMER-BONDED MATERIAL  
MECHANICAL PROPERTIES IN WIDE RANGE  
OF STRAIN RATE**

T. L. Vikhornova, L. A. Davydova, S. A. Gusev,  
B. R. Gafarov, V. P. Melnikov

Federal Center of Dual-Use Technologies «SOYUZ»,  
Dzerzhinsky, Moscow reg., Russia

E-mail: fcdt@monnet.ru

As is generally known, the mechanical properties of Polymer-Bonded Materials (PBM) are strain rate and temperature strongly dependent. At the high temperatures these properties stipulated by the viscoelastic behavior and therefore the PBM can undergo a big breaking deformation even the strain rate is relatively high. However, the abrupt change of PBM mechanical properties can occur if the outer temperature became near to glass transition temperature.

The mechanical properties of PBM based on isoprene rubber and loaded by highly dispersed chalk and aluminum, depending on strain rate have been studied. Experiments were carrying out on standard specimens in the static and quasi-static load areas. The technical restrictions of breaking machine Instron 5565A limited the strain rate range in static area from  $10^{-3}$  to  $10^0$  1/s. Quasi-static experiments were conducted with using the droptower impact system Instron CEAST 9350 according to standard ISO 8256 at the rates from 31.6 to 316 1/s. The temperature during experiments varied from  $-30$  to  $+20$  °C. Tensile «stress-strain» curves in the static loading area and «stress-time» and «strain-time» curves (thereupon reduced to the «stress-strain» form) in the quasi-static loading area recorded.

Obtaining experimental curves correspond to viscoelastic behavior of the PBM at the strain rate range from  $10^{-3}$  to 316 1/s and  $+20$  °C. Results at the low temperatures have been used to define the PBM tensile strength near the glass transition point. The questions of time-temperature shift concept applicability and definition the temperature dependent shift factor for plotting Smith's envelope are discussed.

металла изменяется от твердого через переход «кристалл-жидкость» к жидкому, а от жидкого (как в результате фазового перехода «жидкость-пар», так и в процессе непрерывного «закритического» перехода) к плазменному состоянию вещества. Целью предлагаемой работы является построение феноменологических моделей твердого и жидкого состояний металла, позволяющих получить широкодиапазонные выражения для термодинамических функций металла при высоких плотностях энергии, включая фазовые переходы «кристалл-жидкость» и «жидкость-пар».

Для описания термодинамических функций твердого металла мы используем предложенную нами ранее [1, 2] феноменологическую модель, учитывающую ангармонизм колебаний решетки. Значения малого ( $\leq 5$ ) количества свободных параметров модели определяются из требования точного описания поведения металла и его термодинамических функций при нормальных условиях и выполнения теоретических асимптотик в области применимости квантово-статистических моделей вещества.

Следуя Френкелю [3] полагаем, что кристаллическая решетка разрушается (плавится) в результате потери ее устойчивости. Как известно, что симметрии близкого порядка кристалла и жидкости существенно различаются: невозможно непрерывным гладким преобразованием симметрии кристалла получить симметрию ближнего порядка жидкости. При этом жидкость не держит форму, однако при быстрых механических воздействиях ее струя раскалывается (разбрызгивается) на капли. При быстром охлаждении металлических расплавов образуются аморфные твердые тела (стекла) со структурой близкого порядка, характерного для расплава, и большой вязкостью. С другой стороны, электрофизические свойства металлических расплавов близки к аналогичным свойствам твердого металла на кривой плавления, а изменение объема при плавлении и скрытая теплота фазового перехода малы. Более того, ряд элементов (Ge, Si), являющихся в кристаллическом состоянии полупроводниками, в расплавленном состоянии обладают металлическими свойствами [4]. Это позволило А. Ф. Иоффе и его ученикам утверждать, что электрофизические свойства электронных расплавов, к которым относятся и жидкие металлы, определяются структурой их ближнего порядка [4]. С учетом выше сказанного, представим жидкий металл в виде «смеси» кластеров, атомы которых колеблются со средней частотой  $\omega_E(V)$ , и пузырьрей с газовым беспорядком. Свободную энергию такой смеси можно записать в виде:

$$F_L(V, T) = (1 - C_b) \times \left( F_*(V, T) - \frac{3}{MA} \left( \frac{T_E}{2} + T \ln \left( 1 - \exp \left( -\frac{T_E}{T} \right) \right) \right) - T \right) - C_b \left( \frac{3a_1}{mV^{m/3}} + \frac{T}{MA} \ln \left( \left( \frac{MAT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \nu(V) \right) + \frac{T}{MA} \right) + F_e(V, T), \quad (1)$$

где  $M$ ,  $A$  – атомная единица массы и атомный вес;  $C_b$  – концентрация пузырей;  $T_E = \hbar\omega_E$  – энергия (температура) нулевых колебаний осциллятора;  $T$  – температура

4-16

**ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО  
ОПИСАНИЯ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО  
СОСТОЯНИЙ МЕТАЛЛА, ФАЗОВЫХ  
ПЕРЕХОДОВ «КРИСТАЛЛ-ЖИДКОСТЬ»  
И «ЖИДКОСТЬ-ПАР» ПРИ ИНТЕНСИВНОМ  
ИМПУЛЬСНОМ ЭНЕРГОВКЛАДЕ**

Н. Б. Волков, Е. А. Чингина

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: nbv@ier.uran.ru

Высокоэнергетическое импульсное воздействие на металлы широко используется как с целью установления физических механизмов, определяющих свойства металлов при высоких плотностях энергии, так и с целью модификации их свойств (например, увеличения прочности и т. п.). При таком воздействии состояние

в энергетических единицах;  $v = V - a_2(Z - \tilde{z})$  – свободный объем;  $Z, \tilde{z}$  – соответственно, заряд ядра и текущий заряд атома (иона);  $F_e$  – свободная энергия газа электронов проводимости, подчиняющихся статистике Ферми;

$$F_*(V, T) = -T(MA)^{-1} \ln \left( \sum_{\lambda=1}^{N_\lambda} \exp(-MA\varphi_{eq} K_\lambda (2T)^{-1}) \right) - (2)$$

– структурная часть свободной энергии, определяемая конфигурациями первой координационной сферы [5] ( $N_\lambda, K_\lambda, \varphi_{eq}$  – число конфигураций, первое координационное число в конфигурации  $\lambda$  и значение потенциала взаимодействия, соответствующее равновесной конфигурации);  $a_1, a_2, m$  – свободные параметры модели, определяемые на основании требования точного выполнения условий в тройной точке, а также на кривых плавления (при нормальных условиях) и насыщенных паров. Концентрация пузырей определяется из решения нелинейного уравнения, учитывающего пороговый характер гомогенного зарождения пузырьков критического размера [6] и нелинейный характер их взаимодействия. При его построении учтены также особенности кинетики фазового перехода «жидкость-газ», поверхностного натяжения и устойчивости вещества в окоокритической области. В зависимости от скорости изменения температуры свободная энергия свободная энергия может иметь несколько локальных минимумов, каждому из которых соответствует своя «замороженная» структура ближнего порядка, которая может существовать длительное время. Минимуму свободной энергии при медленном изменении температуры соответствует термодинамическое равновесное состояние вещества, в котором каждому значению объема и температуры соответствует свое равновесное значение  $C_b$ . В критической точке фазового перехода «жидкость-газ» оно равно 1/2, что соответствует равновероятному существованию в критической точке бесконечного жидкого или газового перколяционного кластера [7].

Получены термодинамические функции жидкой и твердой меди. Построены ударно-волновые адиабаты и проведено сравнение с экспериментом. Показано, что предложенная модель качественно и количественно согласуется с экспериментом.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект No. 13-08-00266-а, No. 14-08-31024-мол) и ФАНО в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии» (проект УрО РАН No. 12-П-2-1005, № гос. рег. 01201266835).

### Литература

1. Волков Н. Б., Чингина Е. А. Уравнения состояния твердых Al, Cu, Ag, Au, и W при высоких плотностях энергии. // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XVI Международной конференции (19–22 августа 2013, Украина). – Николаев: КП «Миколаївська обл. друкарня», 2013. С. 55–58.
2. Volkov N. B., Chingina E. A., Yalovets A. P. Two-temperature model for the solid metals at high energy densities. // Известия вузов Физика, 2012. Т. 55. № 10/3. – Special Issue “High Current Electronics” / Edited by B. Kovalchuk and G. Remnev. P. 438–442.
3. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. – Л.: Ленинградское отд. изд. «Наука», 1975. – 592 с.

4. Регель А. П., Глазов В. М. Закономерности формирования структуры электронных расплавов. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
5. Волков Н. Б. Нелинейная динамика токнесущих плазмopodobных сред. / Дисс. на соиск. уч. степ. д.ф.м.-н. – Екатеринбург: ИЭФ Уро РАН, 1999. – 317 с.
6. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. – М.: Наука, 1972. – 312 с.
7. J. M. Ziman. Models of Disorder. The theoretical physics of homogeneously disorder systems. – London, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1979.

## FEATURES OF A THERMODYNAMICS DESCRIPTION OF THE METAL SOLID AND LIQUID STATES, AND THE “CRYSTAL-LIQUID” AND “LIQUID-VAPOR” PHASE TRANSITIONS AT AN INTENSIVE PULSE ENERGY INPUT

N. B. Volkov, E. A. Chingina

Institute of Electrophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia

E-mail: nbv@iep.uran.ru

High-energy pulse impact on metals is widely used towards both the establishment of physical mechanisms that determine metal properties at high energy densities, and modifications of their characteristics (e.g. strength enhancement and others). During the impact metal state changes from solid through “crystal-liquid” transition to liquid, and from liquid (resulting from both “liquid-vapor” transition and during continuous “supercritical” transition) to the plasma state of matter. The objective of the present paper is establishment of the phenomenological model of solid and liquid states of metal, allowing us to receive wide-band expressions for thermodynamic functions of metal at high energy densities, including through “crystal-liquid” and “liquid-vapor” phase transitions.

To describe solid metal thermodynamic functions we use our earlier suggested phenomenological model [1, 2]. The model takes into account anharmonicity of lattice vibration. The small number ( $\leq 5$ ) of the model free parameters values are defined under the requirement of exact description of metal and its thermodynamic functions behavior at normal conditions, and also satisfying to theoretical asymptotes within the range of quantum-statistical matter model applicability.

Consistent with Frenkel [3] we assume the crystal lattice is being destructed (melts) as a result of its stability loss. The crystal short-range order symmetry differs essentially from the liquid one: liquid short-range order symmetry cannot be obtained from the crystal symmetry via any seamless smooth processing. Here liquid does not hold its form, but at high speed deformations its jet breaks (sputters) into droplets. When molten metals are quickly cooled amorphous solid bodies (glass-like), having short-range order structure, which is characteristic for the molten metal, and high viscosity, are formed. On the other hand, electrophysical properties of the molten metals are close to the ones of solid metals at the melting curve, and volume variation while melting and latent heat of transition are negligible. In fact, some elements (Ge, Si) that are semiconductors in crystal state, while being molten acquire metallic properties [4]. This fact allowed A.F. Ioffe and his followers to declare that the electrophysical properties of electron melts, liquid metals being included, to be determined by their



short-range order structure. On accounting all mentioned above, liquid metal can be represented as “mixture” of clusters, where atoms oscillate with mean frequency  $\omega_E(V)$ , and bubbles with gaseous disorder. The free energy of the mixture can be formulized to:

$$F_L(V, T) = (1 - C_b) \times \left( F_*(V, T) - \frac{3}{MA} \left( \frac{T_E}{2} + T \ln \left( 1 - \exp \left( -\frac{T_E}{T} \right) \right) \right) - T \right) - C_b \left( \frac{3a_1}{mV^{m/3}} + \frac{T}{MA} \ln \left( \left( \frac{MAT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \nu(V) \right) + \frac{T}{MA} \right) + F_e(V, T), \quad (1)$$

where  $M$ ,  $A$  – atomic mass unit and atomic weight;  $C_b$  – bubbles concentration;  $T_E = \hbar\omega_E$  – zero oscillations energy (temperature);  $T$  – temperature in energy units;  $\nu = V - a_2(Z - \tilde{z})$  – free volume;  $Z$ ,  $\tilde{z}$  – nucleus charge and current atomic (ion) charge;  $F_e$  – conductivity electrons, following Fermi statistics, gas free energy;

$$F_*(V, T) = -T(MA)^{-1} \ln \left( \sum_{\lambda=1}^{N_\lambda} \exp \left( -MA\varphi_{eq} K_\lambda (2T)^{-1} \right) \right) - (2)$$

– free energy structure part, defined by first coordination sphere [3] configurations ( $N_\lambda$ ,  $K_\lambda$ ,  $\varphi_{eq}$  – number of configurations, first coordination number in  $\lambda$  configuration and interaction potential value, corresponding to equilibrium configuration);  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $m$  – model free parameters, defined under request of terms precise fulfillment in triple point, and also on melting curves (at normal conditions) and saturated vapors. Bubbles concentration is defined by solving the non-linear equation, accounting the threshold character of critical-size bubbles generation by homogeneous nucleation [4] and non-linear character of their interaction. During the formularization “liquid-vapor” phase transition kinetics, surface tension and matter stability in near-critical region features were also taken into account. Depending on temperature variation velocity the free energy can have several local minimums, each having a corresponding “frozen” short-range order structure, existing for a long period. The free energy minimum at slow temperature variation has a corresponding thermodynamic equilibrium state of matter, when each volume and temperature value has its own corresponding equilibrium  $C_b$  value. At the “liquid-vapor” phase transition critical point it equals to 1/2, which is equivalent of an infinite liquid or gaseous percolating cluster [5] equiprobable existence in the critical point.

Thermodynamic functions for liquid and solid Cu were acquired. Shock-wave adiabatic curves had been built and were compared to the experimental results. Qualitative and quantitative agreement between the presented model and experimental data is shown.

The work is carried out under the partial financial support of the RFBR (project No. 13-08-00266-a, project No. 14-08-31024-mol\_a) and FASO within the Presidium of Russian Academy of Sciences fundamental research program “Matter at high energy densities” (UB RAS project No. 12-P-1005, state registration No. 01201266835).

## References

1. Volkov N. B., Chingina E. A. Equations of state of the solid Al, Cu, Au, and W at high energy densities. // Physics of the pulse discharges: Proceedings of the XVI International Conference (19–22 August 2013, Nikolayev, Ukraine). – Nikolayev: KP “Mykolaivska drukarnya”, 2013. P. 55–58.
2. Volkov N. B., Chingina E. A., Yalovets A. P. Two-temperature model for the solid metals at high energy densities. // Russian Physics Journal, 2012. V. 55. No.10/3. – Special Issue “High Current Electronics” / Edited by B. Kovalchuk and G. Remnev. P. 438–442.
3. Frenkel Y. I. // Kinetic theory of fluids. – New York: Dover, 1955.
4. Regel A. R., Glazov V. V. Regularities of electronic melts structure formation. – Moscow: Nauka, 1982.
5. Volkov N. B. // Nonlinear dynamics of current-carrying plasma-like media. /Doctoral thesis. – Yekaterinburg: IEP UB RAS, 1999.
6. Skripov V. P. // Metastable liquids. – New York: J. Wiley, 1974.
7. Ziman J. M. // Models of disorder: The theoretical physics of homogenously disorder systems. – London, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1979.

---

4-17

## ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ВЗАИМНОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ (СВАРКА ВЗРЫВОМ)

А. Ю. Волкова<sup>1,2</sup>, А. В. Иноземцев<sup>1</sup>, Б. А. Гринберг<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: Alyonka\_wolf@mail.ru

Процесс сварки взрывом является крайне быстротечным и мало похожим на другие способы соединения материалов, а перемешивание в переходной зоне вблизи границы раздела соединения является его центральной проблемой. Структура именно этой зоны определяет возможность сцепления обоих материалов.

В настоящей работе были исследованы соединения металлов алюминий – тантала, которые обладают взаимной растворимостью, и медь – титан, без взаимной растворимости. На основе сопоставления данных, полученных для соединения Al-Ta, с результатами исследования Cu-Ta выявлены сходства и различия в структуре переходной зоны в зависимости от того, существует или не существует взаимная растворимость исходных материалов.

В результате данной работы было обнаружено, что при сварке взрывом взаимопроникновение материалов осуществляется путем образования выступов, разлета частиц и расплавления. Все эти процессы происходят при сварке взрывом независимо от наличия (отсутствия) взаимной растворимости. Выступы возникают в результате бездиффузионного (из-за быстротечности сварки) выброса одного металла в другой. Они являются своего рода «гвоздями», соединяющими два различных металла. Разлет частиц возникает в результате происходящей при взрыве фрагментации типа дробления (ФТД), отличной от традиционной фрагментации, которая наблюдается при интенсивных деформациях.

Дробление на частицы сопровождается сильным сбросом подводимой энергии. Поэтому ФТД является мощным диссипативным каналом, не требующим диффузии и потому наиболее быстротечным.

Главным отличием в переходных зонах исследуемых соединений оказалось строение зон расплавления, которое зависит от типа растворимости металлов. Для соединения Cu-Ta из-за высокой температуры плавления тантала (3300 К) и большой разницы (2000 К) между температурами плавления обоих металлов возникает коллоидный раствор, который представляет собой расплав меди, содержащий частицы не испытывавшего расплавления тантала. При последующем затвердевании коллоидный раствор становится застывшей дисперсионно упрочненной суспензией. В зоне расплава соединения Al-Ta было обнаружено образование интерметаллической фазы  $Al_3Ta$ , которая имеет тетрагональную кристаллическую решетку, пространственную группу  $I4/mmm$ , структурный тип  $Al_3Ti$ . Таким образом, при наличии взаимной растворимости зоны расплавления представляют собой истинные растворы, в ее отсутствии – коллоидные растворы (эмульсия или дисперсионно упрочненная суспензия).

#### **ELECTRON-MICROSCOPIC INVESTIGATION OF THE TRANSITION ZONE (EXPLOSION WELDING) OF WELDED JOINTS OF METALS POSSESSING DIFFERENT MUTUAL SOLUBILITY**

A. Yu. Volkova<sup>1,2</sup>, A. V. Inozemtsev<sup>1</sup>, B. A. Greenberg<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

E-mail: Alyonka\_wolf@mail.ru

Explosion welding process is very high-velocity and a little similar to other ways of material junction, and intermixing in the transition zone near the interface is the central problem. The structure of this zone determines the possibility of coupling of both materials.

In this research paper welded joints of aluminum – tantalum with normal mutual solubility and copper – titanium without mutual solubility have been investigated.

It has been revealed that upon explosion welding the interpenetration of the materials is carried out by the formation of protrusions, by the distribution of particles and by the formation of zones of localized melting. All these processes occur upon explosion welding with and without mutual solubility. Protrusions appear in response to diffusionless ejection of one metal into another. The protrusions play the role of «nails» jointing two dissimilar metals. Dispersion of particles occurs as a result of granulating fragmentation (GF) which takes place upon explosion welding and dispartate from the traditional fragmentation that occurs under severe deformation. Partitioning of particles is accompanied by an intense discharging of input energy. Therefore, GF is a powerful dissipative channel that does not require diffusion and consequently it is the most swift-flowing.

The main difference in the transition zones of the test joints is a structure of melting zones, which depends on the solubility of metals. For the Cu-Ta joint colloidal solu-

tion occurs because of the high melting point of tantalum (3300 K) and a large difference between the melting points of both metals (2000 K). It represents copper melt containing the particles of unmelted tantalum. Colloidal solution becomes dispersion-strengthened suspensions upon subsequent hardening. In the melting zones of the Al-Ta joint the intermetallic phase  $Al_3Ta$  has been found out. It has a tetragonal crystal lattice, the space group  $I4/mmm$  and the structure type  $Al_3Ti$ . Thus, it has been shown that in joints of metals possessing normal solubility the local melting zones are true solutions, but if metals possess no mutual solubility, the local melting zones are colloidal solutions (emulsions or dispersion-strengthened suspensions).

4-18

#### **МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕДИ**

Ю. В. Воробьев

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

E-mail: teupollam@gmail.com

Пористая медь рассматривается в аспекте упрочнения и дислокационной динамики. Для этого разработано специальные программы, позволяющие генерировать атомные конфигурации пористого материала. Атомные конфигурации используются в симуляционной машине из пакета молекулярной динамики LAMMPS [1]. Embedded Atom Model (EAM) – модель, учитывающая потенциальные элементы высших порядков для ряда химических элементов, в основном металлов высокой электронной концентрации. Для меди используется базовый потенциал «universal3» типа EAM [2]. Образец представляет собой куб ГЦК меди со стороной 128 атомных ячеек ( $\approx 46$  нм), частично заполненный сферическими случайно выбранными порами. Образец проходит сначала приготовление, когда его подвергают всестороннему сжатию треугольной волной с пиковым давлением 100 кбар и шириной от 30 до 50 пс. Сжатие изотермическое, с использованием термостата Нозе Гувера [3]. При этом измеряются скорости деформации и объем. Затем сравниваются модифицированный и немодифицированный образцы на «тестовом» высокоскоростном всестороннем растяжении  $30 \text{ нс}^{-1}$ , с постоянной скоростью растяжения и измерением давления. Время растяжения составляло около 10 пс. Растяжение адиабатическое, с термостатом симулирующим микроканонический ансамбль (NVE). Во всех процессах, вычисляется центр симметрический параметр нарушения структуры кристалла, который затем выводится графически.

#### **Литература**

1. S. J. Plimpton and A. P. Thompson: MRS Bulletin, 37, 513–521 (2012).
2. S. M. Foiles, M. I. Baskes, and M. S. Daw: Phys. Rev. B, 33, 7983 (1986).
3. S. Nose: J. Phys. Cond. Mat. 2 SA115 (1990).

## MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF HIGH STRAIN RATE DEFORMATION OF COPPER

Yu. V. Vorobyov

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: teupollam@gmail.com

Dynamic strengthening and dislocation dynamics are considered for copper. Custom software was developed, allowing generation of atomic configurations for porous media. Thereafter atomic configurations are used to feed LAMMPS molecular dynamics simulation machine [1]. Embedded Atom Model (EAM) is a theoretical approach for creation of potentials for metallic elements, which accounts high order expansion terms of interaction potential. Basic EAM potential “universal3” [2] have being used for copper. The cubic sample characterized by size of 128 atomic layers ( $\approx 46$  nm) consists of face-centered cubic (FCC) copper together with randomly chosen pores of sphere shape. The sample initially is being treated by isotropic compression with controlled pressure of 100 kbar in maximum and 30–50 ps duration. Compression is isothermic under Nose-Hoover thermostat [3]. Next the sample is tested with fast high strain rate (constant volumetric relative strain rate  $30 \text{ ns}^{-1}$ ) extraction during which pressure is being measured. Extraction process is adiabatic under NVE thermostat. Duration of extraction was about 10 ps. During all processes centro-symmetry parameter is being measured and presented for observation of dislocations creation and movement.

### References

1. S. J. Plimpton and A. P. Thompson: MRS Bulletin, 37, 513–521 (2012).
2. S. M. Foiles, M. I. Baskes, and M. S. Daw: Phys. Rev. B, 33, 7983 (1986).
3. S. Nose: J. Phys. Cond. Mat. 2 SA115 (1990).

испытывавший экстремальные условия, остается заключенным внутри неповрежденного кристалла, готовый для дальнейшего изучения.

Я представлю результаты экспериментов и теоретического анализа фазовых переходов вызванных лазерным микро-взрывом в разных прозрачных и непрозрачных кристаллах (сапфир, алмаз, оливин, кремний). Открытие новой сверх-плотной фазы алюминия, объемно-центрированного алюминия, явилось первой демонстрацией возможностей нового метода по созданию новых материалов под высоким давлением на лабораторном столе [2].

Результаты предварительных исследований алмаза, оливина, кремния свидетельствуют о возникновении новых фаз. Необычный цикл преобразований: от начального твердого тела в плазму и назад к твердому телу в нормальных условиях, позволяет предполагать и возможность образования необычных, так называемых не-соизмеримых, фаз уже найденных в других веществах [3].

Использование лазерного микро-взрыва для создания экстремальных условий в прозрачных и непрозрачных средах показало, что этот метод является недорогим и удобным средством для поиска новых необычных материалов. В заключение я расскажу о нерешенных проблемах и будущих направлениях исследований с использованием этого многообещающего метода.

### Литература

1. E. G. Gamaly, A. Vailionis, V. Mizeikis, W. Yang, A. V. Rode, S. Juodkazis, High Energy Density Physics 8 (2012) 13–17 Warm dense matter at the bench-top: Fs-laser-induced confined micro-explosion.
2. A. Vailionis, E. G. Gamaly, V. Mizeikis, Wenge Yang, A. V. Rode & S. Juodkazis, Nature communications (2011) | DOI: 10.1038/ncomms1449 “Evidence of superdense aluminium synthesized by ultrafast micro-explosion”.
3. M. McMahon & G. J. Ackland, Simple metal no more, Nature Mat., 9, 607 (2010).

4-19

## УЛЬТРА-КОРОТКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ МИКРО-ВЗРЫВ: СОЗДАНИЕ НОВЫХ ФАЗ ВЕЩЕСТВА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Е. Г. Гамалий

Центр Лазерной Физики,  
Австралийский Национальный Университет,  
Исследовательская Школа Физики и Инженерии, Канберра,  
Австралия

E-mail: eugene.gamaly@anu.edu.au

Ультра-короткий лазерный импульс остро сфокусированный внутри прозрачного кристалла быстро ионизует вещество увеличивая плотность поглощенной энергии до Мегаджоулей в кубическом сантиметре (давления десятки мегабар) создавая тем самым условия так называемой Теплой Плотной Материи, типичные для центров звезд и планет, на лабораторном столе [1]. Вещество затем релаксирует при почти постоянной плотности из полностью неупорядоченного плазменного состояния к нормальным условиям. Весь материал,

## ULTRA-FAST LASER-INDUCED MICRO-EXPLOSION: PRODUCING NEW MATERIAL PHASES UNDER EXTREME CONDITIONS

E. G. Gamaly

Laser Physics Centre, Research School of Physics  
and Engineering, The Australian National University, Canberra,  
ACT 0200, Australia  
eugene.gamaly@anu.edu.au

The ultra-short powerful laser pulse tightly focussed deep inside a transparent crystal swiftly ionises a solid dramatically increasing absorbed energy density to a few  $\text{MJ/cm}^{-3}$  (pressure TPa) and creating so called Warm Dense Matter, (WDM) typical for the interiors of stars and planets at the laboratory tabletop [1]. A matter then relaxes isochorically from disordered plasma state to the ambient conditions. All pressure affected material remains confined inside a pristine crystal indefinitely ready for the further studies.

I present the experimental results and theoretical analysis of phase transformations generated by micro-explosions confined inside different transparent and opaque materials

(sapphire, silicon, olivine, diamond). The discovery of the novel super-dense phase of Aluminium, bcc Al, by micro-explosion in sapphire was first demonstration of the capabilities of new method for high-pressure material formation at the laboratory tabletop [2].

The results of preliminary studies of high-pressure-affected diamond, silicon and olivine are evidencing appearance of unknown phases. The unusual transformation route: solidplasma – solid cycle – might be a way for formation of incommensurate structures observed in different solids [3].

The generation of extreme pressure/temperature conditions by confined microexplosions in transparent and opaque materials is proved to be useful and inexpensive tool for formation new phases and unexpected structures. In conclusion I discuss the results, unresolved problems and future directions of these promising studies.

### References

1. E. G. Gamaly, A. Vailionis, V. Mizeikis, W. Yang, A. V. Rode, S. Juodkazis, High Energy Density Physics 8 (2012) 13–17 Warm dense matter at the bench-top: Fs-laser-induced confined micro-explosion.
2. A. Vailionis, E. G. Gamaly, V. Mizeikis, Wenge Yang, A. V. Rode & S. Juodkazis, Nature communications (2011) | DOI: 10.1038/ncomms1449 “Evidence of superdense aluminium synthesized by ultrafast micro-explosion”.
3. M. McMahon & G. J. Ackland, Simple metal no more, Nature Mat., 9, 607 (2010).

4-20

### ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЗАРЯДОВОЕ СОСТОЯНИЕ ИОНОВ В СЛОИСТЫХ КОБАЛЬТИТАХ $GdBaCo_2O_{5.5}$ И $LiCoO_2$

Б. А. Гижевский<sup>1</sup>, В. Р. Галахов<sup>1</sup>, В. В. Месилов<sup>1</sup>,  
С. Н. Шамин<sup>1</sup>, С. В. Наумов<sup>1</sup>, А. С. Семенова<sup>2</sup>,  
Д. Г. Келлерман<sup>2</sup>, С. В. Телегин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: gizhevskii@imp.uran.ru

Слоистые кобальтиты перспективны для применений в твердоотопивных элементах и аккумуляторах. В фундаментальном аспекте эти соединения интересны электронными и магнитными свойствами, которые в значительной мере определяются зарядовым и спиновым состоянием ионов кобальта. Под воздействием интенсивной пластической деформации кобальтиты могут переходить в наносостояние, что улучшает их функциональные характеристики. В наноксидах обычно наблюдаются нарушение стехиометрии и изменение зарядового состояния катионов по сравнению с крупнозернистым состоянием. Для выяснения зарядового состояния ионов Co в наноструктурированных  $GdBaCo_2O_{5.5}$  (GBCO) и  $LiCoO_2$  (LCO), приготовленных размолом в вибромельнице и кручением под давлением, использованы методы рентгеновской спектроскопии. Размол в вибромельнице GBCO в течение 6 часов

приводит к некоторому изменению рентгеновских абсорбционных Co 2p-спектров, что может быть связано с изменением спинового и зарядового состояния ионов Co. Наблюдаются значительные различия в рентгеновских 1s-спектрах поглощения кислорода крупнозернистого и наноструктурированного GBCO. Это указывает на изменение характера химической связи части ионов кислорода и может быть обусловлено перераспределением кислорода по различным кристаллографическим позициям в слоистой структуре GBCO. С помощью рентгеновских фотоэлектронных спектров установлено, что при малых деформациях происходит частичное разложение LCO (деинтеркалирование), сопровождающееся диффузией ионов Li к поверхности образца. Вакансии Li в объеме образца и образование формально  $Co^{4+}$  компенсируются за счет дырок в 2p-оболочках кислорода. При повышении степени деформации происходит понижение зарядового состояния части ионов Co до  $Co^{2+}$  т. е., происходит частичное восстановление LCO. Результаты работы свидетельствуют об эффективности методов рентгеновской спектроскопии для исследования воздействия интенсивных пластических деформаций на оксиды на начальной стадии процесса, когда стандартные методы рентгеновской дифракции еще не детектируют образование новых фаз.

Работа поддержана РФФИ, 14-02-00432, УрО РАН, 12-М-23-2032 и 14-2-НП-247, ОФН РАН, 12-Т-2-1005 и двусторонней программой «Российско-Германская лаборатория на BESSY».

### EFFECT OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION ON THE CHARGE STATE OF THE IONS IN THE LAYERED COBALTITES $GdBaCo_2O_{5.5}$ AND $LiCoO_2$

B. A. Gizhevskii<sup>1</sup>, V. R. Galakhov<sup>1</sup>, V. V. Mesilov<sup>1</sup>,  
S. N. Shamin<sup>1</sup>, S. V. Naumov<sup>1</sup>, A. S. Semenova<sup>2</sup>,  
D. G. Kellerman<sup>2</sup>, S. V. Telegin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Institute of Solid State Chemistry UB RAS, Ekaterinburg, Russia

E-mail: gizhevskii@imp.uran.ru

The layered cobaltites are promising for applications in solid oxide fuel cells and batteries. In the fundamental aspect these compounds have interesting electronic and magnetic properties, which are largely determined by the charge and spin state of cobalt ions. Under the influence of severe plastic deformation cobaltites can transform to nanostate that improves their functional characteristics. Violation of the stoichiometry and change in the charge state of the cations are typically for nanooxides compared to coarse grain state. Nanostructured  $GdBaCo_2O_{5.5}$  (GBCO) and  $LiCoO_2$  (LCO) were prepared by ball milling and torsion under pressure. The charge state of Co ions were determined by X-ray spectroscopy. Milling of GBCO for 6 hours changes of Co 2p X-ray absorption spectra that can be associated with a change of the spin and charge state of Co ions. There are significant differences in O 1s X-ray absorption spectra of nanostructured and coarse grain GBCO. This indicates a change in the nature of the chemical bond of the part oxygen ions and can be due to redistribution of oxygen on dif-

ferent crystallographic sites in the layered structure GBCO. By means of X-ray photoelectron spectra we revealed that weak deformations cause partial decomposition of LCO (deintercalation) accompanied by diffusion of Li ions to the sample surface. Li vacancies in the bulk sample and the formation of formally  $\text{Co}^{4+}$  compensated by holes in the oxygen  $2p$ -shells. Increasing degree of deformation leads to a decrease of the charge state of the part cobalt ions up to  $\text{Co}^{2+}$ , there is a partial reduction of LCO. Presented results demonstrate the effectiveness of the methods of X-ray spectroscopy to study the impact of severe plastic deformation on the oxides at the initial stage of the process while the standard methods of X-ray diffraction has not yet detected the formation of new phases.

Supported by RFBR, 14-02-00432, by UB RAS, 12-M-23-2032 and 14-2-SP-247, by BPS RAS, 12-T-2-1005 and by the bilateral Program «Russian-German Lab at BESSY».

---

4-21

### ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТИТАНА И ЕГО ГИДРИДА В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ УДАРНОГО СЖАТИЯ

А. А. Гольшев, Д. В. Шахрай, А. М. Молодец

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,  
Россия

E-mail: golyshev@icp.ac.ru

Как известно, гидриды металлов играют большую роль в ряде прикладных и фундаментальных задач таких, как, например, металлизация водорода за счет его «химического сжатия» или проблемы управляемого термоядерного синтеза. Характерной особенностью подобных задач является изучение свойств гидридов металлов при высоких давлениях (см., например, [1, 2]). В данной работе изучалась электропроводность гидрида титана ( $\text{TiH}_2$ ) в мегабарном диапазоне давлений ударного сжатия. С этой целью выполнены две серии экспериментов. В первой серии измерена электропроводность гидрида титана в условиях ступенчатого ударного сжатия до  $\sim 100$  ГПа. Затем, для изучения возможного разложения гидрида титана в условиях динамического нагружения была проведена вторая серия экспериментов в точности повторяющих условия ударного нагружения по измерению электропроводности металлического титана. Сравнения полученных величин электропроводности титана и его гидрида демонстрируют кардинальную качественную разницу их барических зависимостей электропроводности. Так, если электропроводность титана при сжатии увеличивается и испытывает серию скачков соответствующих (предположительно) полиморфным переходам, то зависимость электропроводности гидрида титана уменьшается, оставаясь в дальнейшем практически неизменной вплоть до 100 ГПа. Этот факт вместе с ранее полученными результатами для 40 ГПа [3] позволяет соотнести полученные данные со свойствами гидрида титана в экстремальных условиях ударного сжатия. Таким образом, электросопротивление титана увеличивается при ударном сжатии, в то время как относительное

электросопротивление гидрида титана при аналогичных условиях ударного сжатия уменьшается более чем в 2 раза.

Работа выполнена при поддержке Росатома в рамках государственного контракта Н.4х.44.90.13.1112 от 20 мая 2013 и программы Президиума Российской академии наук.

### Литература

1. E. Zurek, R. Hoffmann, N. W. Ashcroft et al. Proc. Nat. Acad. Sci. 106, 17640 (2009).
2. А. М. Молодец, Д. В. Шахрай, В. Е. Фортов. Теплофизические свойства полиморфных модификаций гидрида лития в мегабарном диапазоне давлений ударного сжатия // ЖЭТФ 145, вып.5 (2014).
3. А. А. Гольшев, Д. В. Шахрай, А. М. Молодец, В. Е. Фортов. Устойчивость кристаллической структуры гидрида титана ( $\text{TiH}_2$ ) при высоких давлениях ударного сжатия // тезисы XI международной конференции «Забабахинские научные чтения» 2012 г., Снежинск, Россия, стр.225.

### ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF TITANIUM AND TITANIUM HYDRIDE AT MEGABAR PRESSURES OF SHOCK COMPRESSION

A. A. Golyshev, D. V. Shakhrai, A. M. Molodets

Institute of problems of chemical physics RAS, Chernogolovka,  
Russia

E-mail: golyshev@icp.ac.ru

As is known, metal hydrides play an important role in a number of fundamental and applied problems such as, for example, metallization of hydrogen due to its «chemical compression» or the problem of controlled thermonuclear fusion. A characteristic feature of such problems is the study of the properties of metal hydrides at high pressures (see, e. g. [1, 2]). In this work we studied the electrical conductivity of titanium hydride ( $\text{TiH}_2$ ) at megabar pressures of shock compression. Two series of experiments are for this purpose executed. In the first series was measured electrical conductivity of the titanium hydride in condition of stepwise shock compression up to  $\sim 100$  GPa. Then, to study the possible decomposition of titanium hydride under dynamic loading was carried out a second series of experiments is exactly the same shock loading conditions by measuring the electrical conductivity of titanium metal. Compare received values continuity titanium and its hydride demonstrate crucial qualitative difference if their reasonable dependencies. So, if the conductivity of titanium at compression increases and experiencing a series of jumps relevant (presumably) polymorphic transitions, the dependence of the conductivity of titanium hydride decreased, remaining in the future is almost unchanged up to 100 GPa. This fact, together with previous results for the 40 GPa [3] allows to correlate the data obtained with the properties of titanium hydride in extreme conditions of shock compression. Thus, the electrical resistance of titanium increases at shock compression, while the relative resistance of titanium hydride under similar conditions of shock compression is reduced more than in 2 times.

This work was supported by Rosatom (contract Н.4х.44.90.13.1112 20 may 2013) and the program of Presidium of the Russian Academy of Sciences.

## References

1. E. Zurek, R. Hoffmann, N. W. Ashcroft et al. Proc. Nat. Acad. Sci. 106, 17640 (2009).
2. A. M. Molodets, D. V. Shakhrai, V. E. Fortov. Thermophysical properties of polymorphs of lithium hydride at megabar pressures of shock compression // JETP 145, 5 (2014).
3. A. A. Golyshev, D. V. Shakhrai, A. M. Molodets, V. E. Fortov. Stability of crystal structure of titanium hydride (TiH<sub>2</sub>) at high pressure of shock compression // book of abstract XI International Conference "Zababakhin Scientific Talks" 2012 г., Snezhinsk, Russia, p. 226.

---

4-22

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Б. А. Гринберг<sup>1</sup>, М. А. Иванов<sup>2</sup>,  
С. В. Кузьмин<sup>3</sup>, В. И. Лысак<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

<sup>3</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

E-mail: bella@imp.uran.ru

Полученная авторами в разное время совокупность экспериментальных данных положена в основу нового подхода к описанию формирования сварного соединения, который включает ряд неисследованных ранее процессов и их взаимосвязь. Существенную роль при этом играет фрагментацию типа дробления (ФТД), которая включает в себя образование частиц, их разлет и частичную консолидацию. Мы полагаем, что ФТД является аналогом фрагментации при взрыве, исследованной Невиллом Моттом, хотя, очевидно, что эти явления имеют разные масштабы. Фрагментация другого типа, которая является традиционной, требует диффузии и не сопровождается разлетом частиц. ФТД является наиболее быстротечным процессом, который происходит еще во время взрыва. Мы полагаем, что именно образование и разлет частиц в первую очередь провоцируют локальное расплавление, благодаря трению между частицами, разлетающимися в замкнутом пространстве. Подтверждением этого предположения было наблюдение многочисленных частиц тугоплавкой фазы внутри зон локального расплавления. Возможен следующий сценарий: локальный разлет частиц (осколков), локальное расплавление, сохранение фрагментированного слоя неразлетевшихся частиц. При этом разлетаются гладкие частицы, тогда как изрезанные остаются на кромке области тугоплавкой фазы. Два процесса – образование выступов и образование зон локального расплавления – определяют рельеф поверхности раздела. В отсутствие выступов возникали бы проблемы со сцеплением, и требовались бы либо реконструкция металлических связей, либо транспорт точечных дефектов. Но наличие выступов решает эту проблему: выступы играют при этом роль «клиньев», связывая контактирующие материалы между собой и обеспечивая их взаимопроникновение. Бездиффузионные вы-

бросы, какими являются выступы, более тугоплавкого (и обычно более твердого) металла не зависят от взаимной растворимости свариваемых металлов. Но от этого зависит строение зон локального расплавления. При отсутствии взаимной растворимости это коллоидные растворы. Именно дисперсионно упрочненная суспензия обеспечивает высокое качество и стабильность стенки химического реактора, которая содержит сварное соединение медь-тантал. При этом именно из-за отсутствия взаимной растворимости отсутствует и опасность, связанная с образованием интерметаллидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов УрО РАН № 12-У-2-1011, 13-2-014-УТ, 12-2-2-007.

## FORMATION OF INTERFACE STRUCTURE DURING EXPLOSIVE WELDING

B. A. Greenberg<sup>1</sup>, M. A. Ivanov<sup>2</sup>,  
S. V. Kuz'min<sup>3</sup>, V. I. Lysak<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, ul. S. Kovalevskoi 18, Yekaterinburg, 620990 Russia

<sup>2</sup>Kurdyumov Institute of Metal Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Vernadskogo 36, Kiev, 03680 Ukraine

<sup>3</sup>State Technical University, pr. Lenina 28, Volgograd, 400131 Russia

E-mail: bella@imp.uran.ru

Experimental data obtained earlier in our works have been taken as the basis for a new approach characterizing the formation of a welded joint. The approach describes a number of previously unstudied processes and their relationships. An important role is played by the granulating fragmentation (GF), which involves the formation of particles, their flying away, and partial consolidation. GF is believed to be an analog to fragmentation upon explosion studied by Nevill Mott. Although, it is clear that these phenomena have different scales. Fragmentation of another kind, which is conventional one, occurs through diffusion and without particles flying away. GF is a very rapid process that takes place during explosion. It is the formation of particles and their flying away that in the first place provoke local melting occurring due to friction between particles flying away in a closed space and their indented environment. The presence of the great number of the particles of a refractory phase inside local melting zones confirms this assumption. The following scenario can be possible: the local flying away of particle (fragments), the local melting, and the retention of a fragmented layer composed of particles that had no time to fly away. In this case, smooth particles fly away, whereas indented ones remain at the edge of the region that belongs to the refractory phase. Two processes, namely, the formation of cusps and the formation of local melting zones, are responsible for the interface relief. The absence of cusps would create problems with the cohesion between the metals, which would require either reconstructing metallic chemical bonds or providing transport of point defects. The presence of cusps solves this problem: cusps play the role of «wedges» cohering the materials being in contact and ensuring their interpenetration. The diffusionless ejecta, namely, cusps, of a refractory (and, therefore, harder) metal do not depend on the mutual solubility of

welded metals. But this factor affects the structure of the localized-melting bands. In the case when initial metals possess no mutual solubility, these zones represent colloidal solutions. It is a precipitation-hardened suspension that provides a high quality and stability of a chemical reactor wall with a copper-tantalum weld joint. There can be no harm arising from formation of intermetallic compounds because of the lack of mutual solubility.

This work was supported by the Ural Division of the Russian Academy of Sciences, project nos. 12-U-2-1011, 13-2-014-UT, and 12-2-2-007.

---

4-23

### УДАРНОЕ СЖАТИЕ ГИДРИДОВ И ДЕЙТЕРИДОВ ВАНАДИЯ С РАЗНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ АТОМОВ ГАЗОВ

А. Н. Голубков, Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов,  
А. А. Каякин, А. Н. Шуйкин

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Приведены результаты экспериментов по исследованию ударного сжатия образцов дейтеридов и гидридов ванадия с содержанием газов, соответствующих составам  $VX_{0,5=0,6}$ ,  $VX_{0,7=0,9}$  и  $VX_{\geq 1,6-1,8}$ , где X – H или D, в диапазоне давлений от 20 до 140 ГПа. Описана технология синтеза образцов с использованием дендритного ванадия с содержанием основного вещества не менее 99,665%.

Опыты по определению ударных адиабат дейтеридов и гидридов ванадия выполнены с использованием известного метода отражения. Для нагружения образцов применялись генераторы ударных волн, основанные на использовании цилиндрических зарядов ВВ разной мощности.

Для описания полученных данных использовалась модель широкодиапазонного полуэмпирического уравнения состояния (УРС) металлов, в которой 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.

Результаты сравнения расчетов и экспериментальных данных свидетельствуют об их согласованности.

### SHOCK COMPRESSION OF VANADIUM HYDRIDES AND DEUTERIDES WITH VARIOUS CONCENTRATIONS OF GAS ATOMS

A. N. Golubkov, L. F. Gudarenko, M. V. Zhernokletov,  
A. A. Kayakin, A. N. Shuikin

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

The paper presents results of experiments for investigation of shock compression of samples of vanadium deuterides and hydrides with content of gases, which correspond to the compositions  $VX_{0,5=0,6}$ ,  $VX_{0,7=0,9}$ , and  $VX_{\geq 1,6-1,8}$ , where X – H or D, in the pressure range from 20 to 140 GPa. The authors give description of technology for synthesizing the samples with use of dendrite vanadium with content of the main substance of 99.665% or higher

Experiments for determination of shock adiabats of vanadium deuterides and hydrides were performed employing the known reflection method. Shock wave generators were used for loading the samples. The generators were based on application of cylindrical HE charges with various powers.

To describe the obtained data, the authors employed the model of wide-range semiempirical equation of state (EOS) of metals, where heat capacity, Grüneisen coefficients of ions and electrons are functions of density and temperature. The heat capacity is changed in accordance with the Debye theory at low temperatures. Removal of degeneracy of electronic gas is taken into account when temperature grows. Influence of ionization processes on thermodynamic functions is effectively taken into account. The EOS allows calculating the states in the “liquid-vapor” two-phase area.

Results of comparison of calculated and experimental data testify to their agreement.

---

4-24

### ВЛИЯНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАЗМЕР КРИСТАЛЛИТОВ НЕКОТОРЫХ ТУГОПЛАВКИХ ВЕЩЕСТВ

А. Н. Жуков, В. В. Якушев, А. И. Рогачёва

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,  
Россия

E-mail: azhukov@icp.ac.ru

В работе исследовалась возможность использования ударных волн для получения наноматериалов. Для этого изучалось влияние условий, возникающих при различных режимах ударно-волнового нагружения, на изменения субструктурных характеристик, в первую очередь, размера кристаллитов в ряде тугоплавких веществ. Эксперименты проводились в плоских ампулах сохранения. Ударно-волновое воздействие (22–50 ГПа) осуществлялось металлическим ударником, разогнанным до необходимых скоростей продуктами детонации взрывчатых веществ. Нагружению подвергались как чистые вещества, так и их смеси с бромидом калия. Нагружение смесей проводилось с целью снижения

остаточных температур и, соответственно, уменьшения эффектов отжига и рекристаллизации, влияющих на изучаемые параметры. В качестве объектов исследования в работе были выбраны нитрид кремния, нитрид титана, карбид вольфрама, диборид и диоксид циркония. Нитрид кремния, карбид вольфрама и диоксид циркония в отличие от нитрида титана и диборида циркония обладают полиморфизмом. Различия в свойствах выбранных веществ способствуют лучшему пониманию характера изменений размеров кристаллитов, происходящих при ударно-волновом воздействии. При воздействии ударных волн на нитрид кремния, нитрид титана, карбид вольфрама, диборид и диоксид циркония в случае отсутствия фазовых превращений, уменьшения размеров кристаллитов до наноразмерного уровня (менее 100 нм) не наблюдалось. Уширение пиков на рентгенограммах в этих случаях связано в основном с сильным увеличением микроискажений. В том случае, если вещество испытывает в ударной волне фазовый переход (нитрид кремния, диоксид циркония), то новая фаза образуется в нанокристаллитной форме с размером кристаллитов 10–20 нм. Воздействие ударных волн на изначально нанокристаллическую  $\gamma$ -фазу нитрида кремния не приводит к заметным изменениям ни размеров кристаллитов, ни величин микроискажений.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии».

#### THE INFLUENCE OF SHOCK WAVE LOADING ON CRYSTALLITE SIZE OF SOME REFRACTORY MATERIALS

A. N. Zhukov, V. V. Yakushev, A. I. Rogacheva

Institute of problems of chemical physics RAS, Chernogolovka, Russia

E-mail: azhukov@icp.ac.ru

The work concerns with possibility of nanomaterials preparation using shock waves. Variation of substructure parameters, in first, crystallite size of some refractory materials after shock waves loadings has been investigated for this purpose. The shock wave compression was performed in planar recovery ampoules. The pressure (22–50 GPa) was generated by aluminum plates accelerated with explosive detonation products. Pure substances as well as their mixtures with potassium bromide were subjected to shock compression. Compression of the mixtures performed for lowering a post shock temperature and consequently decreasing annealing and recrystallization effects. Silicon nitride, titanium nitride, tungsten carbide, zirconium diboride and dioxide were investigated. Silicon nitride, tungsten carbide and zirconium dioxide in contrast to titanium nitride and zirconium diboride possess polymorphism. This gains a better insight on nature of crystallite size variations under shock wave loading. Crystallite size reduction to nano level ( $< 100$  nm) were not observed if no polymorphic transition occur under shock wave loading of silicon nitride, titanium nitride, tungsten carbide, zirconium diboride and dioxide. In that case the reason of powder X-ray diffraction broadening is the considerable microstrains. Else if substances (silicon nitride, zirconium dioxide) undergo shock wave

phase transformation then new nanocrystallite phase with crystallite size of 10–20 nm is formed. Shock wave loading of initially nanocrystalline silicon nitride  $\gamma$ -phase resulted in no appreciable alteration of crystallite size or microstrain.

This work was supported by the Presidium of the Russian Academy of Sciences fundamental research program “Matter under High Energy Density”.

4-25

#### ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ С АНОМАЛЬНОЙ СЖИМАЕМОСТЬЮ

А. Н. Зубарева, В. А. Сосиков, А. В. Уткин

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

E-mail: zan@icp.ac.ru

Работа посвящена изучению ударно-волновых свойств веществ в области аномальной сжимаемости. В качестве объектов исследования выбраны церий, пористые среды и докозан (предельный углеводород  $C_{22}H_{46}$ ), в котором авторами впервые обнаружена аномальная сжимаемость.

Причиной возникновения аномальной сжимаемости могут быть как термодинамические свойства, так и структура образца. Именно этими причинами и обусловлен выбор объектов исследования. Церий – яркий представитель веществ, аномальные свойства которого обусловлены электронным строением его атомов. В пористых средах подобное явление наблюдается при низких давлениях и вызвано схлопыванием пор. Интересным является исследование докозана, природа аномальной сжимаемости которого неизвестна.

Исследование структуры импульсов сжатия осуществлялось посредством регистрации профилей скорости свободной поверхности образцов лазерным доплеровским интерферометром VISAR. Показано, что во всех исследуемых образцах фронт импульса сжатия «размывается» по мере распространения по образцу. Это является следствием аномальной сжимаемости вещества, которая приводит к невозможности существования ударной волны сжатия и к формированию ударных волн разрежения.

Аномальная сжимаемость в церии наблюдается в  $\gamma$ -фазе, при давлении ниже 800 МПа. В пористой среде (каучук с микросферами) это давление составляет 100 МПа. Докозан проявляет упруго-пластические свойства и обладает аномальной сжимаемостью при давлении ниже 100 МПа.

Постановка эксперимента по регистрации профилей скорости позволила также исследовать величину откольной прочности и ее зависимость от скорости деформирования для всех материалов. При ее увеличении на порядок (с  $1,5 \cdot 10^4$  до  $9,5 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>) откольная прочность церия возрастает более чем в два раза: с 0,3 до 0,7 ГПа. В пористом каучуке откольный импульс выражен слабо, и величина откольной прочности не превышает 15 МПа. Эксперименты с докозаном показали, что его прочность остается практически постоянной и рав-



на примерно 24 МПа при переходе через температуру плавления.

Работа выполнена при поддержке Программы президиума РАН и гранта Исследовательского центра «ФАИР-Россия».

**INVESTIGATION OF SHOCK-WAVE  
PROPERTIES OF MATTER WITH ANOMALOUS  
COMPRESSIBILITY**

A. N. Zubareva, V. A. Sosikov, A. V. Utkin

Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka,  
Russia

E-mail: zan@icp.ac.ru

The paper is dedicated to the study of shock-wave properties of substances in the anomalous compressibility area. Cerium, porous media and docosane in which the authors was first detected anomalous compressibility were selected as objects of study.

The reasons of abnormal compressibility can be both the thermodynamic properties and structure of the sample. Anomalous properties of cerium are explained by the electronic structure of its atoms. In porous media, the phenomenon is observed at low pressures and caused by the collapse of pores. It is interesting to study docosane, its nature of anomalous compressibility is unknown.

Register of free-surface velocity profiles was performed by laser Doppler interferometer VISAR. It is shown that front of the compression pulse is «blurs» as it propagates from the sample in all samples. This is due to the anomalous compressibility of substances, it leads to the impossibility of the existence of compression shock wave and the formation of rarefaction shock waves.

Anomalous compressibility of cerium is observed in  $\gamma$ -phase, at pressures below 800 MPa. In the porous medium (rubber whis microspheres) this pressure is 100 MPa. Docosane exhibits elastic-plastic properties and has anomalous compressibility at pressures below 100 MPa.

The magnitude of spall strength and its dependence on strain rate were investigated for all materials. As strain rate increases on the order (from  $1.5 \cdot 10^4$  to  $9.5 \cdot 10^5$  s<sup>-1</sup>), spall strength of cerium increases more than twice: from 0.3 to 0.7 GPa. In porous rubber spall pulse is weak, and the magnitude of the spall strength is no more than 15 MPa. Experiments with docosane have shown that its strength is substantially constant and equal to about 24 MPa in going through the melting point.

The work was supported by Presidium RAS program and FRRC – FAIR-Russia Research Center.

4-26

**МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕНИЯ  
ПРИ ВЫХОДЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ  
НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛА**

A. Н. Анисимов, М. В. Ветчинников, Б. Л. Воронин,  
С. А. Грушин, В. А. Дегтярев, М. А. Демина,  
А. Г. Кечин, С. В. Копкин, Н. С. Самсонова,  
М. Г. Игнаткова, В. П. Фомин

Российский федеральный ядерный центр –  
ВНИИ экспериментальной физики,  
Институт теоретической и математической физики, Саров,  
Россия

В работе представлены результаты молекулярно-динамического моделирования процессов формирования струй со свободной поверхности металла при выходе на нее ударной волны. Мишень – монокристалл Cu. В процессе моделирования изучалось влияние размеров шероховатости поверхности (изменялась глубина и угол раствора выемки); неоднородности по объему; температуры мишени. Для струй получены функции распределения температуры, плотности, массовой скорости и по размерам осколков. Моделирование проводилось по собственному, развиваемому в ИТМФ – ВНИИЭФ комплексу MoDyS.

**MOLECULAR-DYNAMIC MODELING  
OF EJECTION, WHEN SHOCK WAVE ARRIVES  
AT THE FREE SURFACE OF METAL**

A. N. Anisimov, M. V. Vetchinnikov, B. L. Voronin,  
S. A. Grushin, V. A. Degtyagev, M. A. Demina,  
A. G. Kechin, S. V. Kopkin, N. S. Samsonova,  
M. G. Ignatkova, V. P. Fomin

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

The work presents the results of molecular-dynamic modeling of jet formation from the free surface of metal, when shock wave arrives at it. The target is Cu monocrystal. In the process of modeling, we studied the influence of surface roughness sizes (we measured the depth and solution angle of the pit), inhomogeneities by the volume, target temperature. For the jets, we obtained the functions of temperature distribution, density, mass velocity and by the sizes of fragments. Modeling was performed with the help of complex MoDyS, which is under the development at ITMP – VNIIEF

4-27

### МОДЕЛЬ КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В СРЕДАХ С ПРОЧНОСТЬЮ

О. Н. Игнатова, В. А. Раевский, И. С. Целиков

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

В настоящее время возникают большие трудности при численном моделировании высокоскоростного деформирования материалов, сопровождающиеся разрушением и компактированием дефектов (пор). Компактирование поврежденности, образующихся в результате действия импульсных растягивающих напряжений, в настоящее время исследовано не достаточно. В данном докладе предложена модель компактирования поврежденной среды основанная на описании схлопывания одиночной поры с учетом упруго-пластических свойств среды.

Предположив, что при компактировании количество пор не меняется ( $N=\text{const}$ ), представим поврежденную среду как систему одинаковых пор, находящихся примерно на одинаковом расстоянии от соседних пор [1]. Тогда можно выделить элементарную ячейку вещества радиусом  $R_y$  с одной порой радиусом  $R_0$  и рассмотреть сжатие этой ячейки внешним давлением.

Если материал, в котором находится пора, обладает прочностью, то при движении границы поры под действием приложенных нагрузок кинетическая энергия  $E$  тратится как на работу давления  $A_d$  так и на пластическую работу  $A_p$ :

$$\frac{2\pi\rho(R_y - R)R^3\dot{R}^2}{R_y} = 4 \cdot \pi \int_0^t P(t)R_y^2\dot{R}_y dt - 8\pi \int_0^t Y_d(\Delta\varepsilon_i, \Delta\dot{\varepsilon}_i, T)\dot{R}R^2 \ln\left(\frac{3}{4\pi N} + R^3\right)^{1/3} dt. \quad (1)$$

В уравнении (1) левая часть есть кинетическая энергия вещества, а правая состоит из работы давления

$$A_d = 4\pi \int_0^t P(t)R_y^2\dot{R}_y dt$$

и пластической работы

$$A_p = -8\pi \int_0^t Y_d(\Delta\varepsilon_i, \Delta\dot{\varepsilon}_i, T)\dot{R}R^2 \ln\left(\frac{3}{4\pi N} + R^3\right)^{1/3} dt,$$

$R$  – радиус поры,  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность вещества. В случае отсутствия прочности уравнение (1) переходит в задачу о схлопывании одиночной поры в идеальной несжимаемой жидкости, сделанной Рейлеем.

После несложных преобразований получаем дифференциальное уравнение изменения радиуса поры от времени:

$$\dot{R} = -\sqrt{\frac{R_y}{\rho R^3(R_y - R)}} \times \sqrt{\int_0^t \left[ C_1 P(t) - C_2 Y_d(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T) \ln\left(1 + \frac{3}{4\pi N R^3}\right) \right] R^2 \dot{R} dt}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что полное компактирование поры будет происходить в случае  $A_d = A_p$ . При постоянных  $P_0$  и  $Y_0$  это условие выражается соотношением:

$$P_K = \frac{2}{3} Y_0 \left( -\ln \omega_0 + \frac{1 - \omega_0}{\omega_0} \ln\left(\frac{1}{1 - \omega_0}\right) \right),$$

а условие начала движения пор:

$$\frac{P_0}{Y_0} = \frac{2}{3} \left( \ln \frac{1}{\omega_0} \right).$$

Для группы пор следует использовать уравнение (2) и делать пересчет поврежденности:

$$N = \frac{1}{4/3\pi(R_y^3 - R^3)}, \quad \omega = \left(\frac{R}{R_y}\right)^3, \quad R_y = \frac{R}{\omega^{1/3}}$$

В качестве интегральных моделей среды используются обычные уравнения:

$$\tilde{Y}_d = (1 - \omega)Y_d, \quad \tilde{P} = (1 - \omega)P\left(\frac{\rho}{1 - \omega}, T\right)$$

### Литература

1. Carrol M. M., Holt A. C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials // J. Appl.Phys. – 1972. – V. 43. – P. 1626–1635.

### MODEL OF DAMAGE COMPACTION IN MEDIA WITH STRENGTH

O. N. Ignatova, V. A. Raevsky, I. S. Tselikov

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

E-mail: o.n.ignatova@ifv.vniief.ru

Numerical simulation of high rate strain of materials accompanied by collapse and damage of defects (voids) is currently rather challenging problem. Compaction of damage generated by pulsed tensile stresses is currently insufficiently studied. This paper proposes a model of damaged media compaction based on description of single void collapse taking into account elastic and plastic properties of the medium.

Assuming that number of voids does not change at compaction ( $N=\text{const}$ ), imagine damaged system as a system of identical voids located at the same distance from the neighboring voids [1]. Then we can distinguish elementary cell of the matter with radius  $RC$  with one void having radius  $R_0$  and consider compaction of this cell by external pressure.

If material with this void has some strength, then when the void moves under applied load, kinetic energy  $E$  is spent for pressure work  $A_{Pr}$  and plastic work  $A_{Pl}$ :

$$\frac{2\pi\rho(R_c - R)R^3\dot{R}^2}{R_c} = 4\pi\int_0^t P(t)R_c^2\dot{R}_c dt -$$

$$-8\pi\int_0^t Y_d(\Delta\varepsilon_i, \Delta\dot{\varepsilon}_i, T)\dot{R}R^2 \ln\left(\frac{3}{4\pi N} + \frac{R^3}{R^3}\right)^{1/3} dt. \quad (1)$$

Left term of equation (1) is kinetic energy of substance, and right term includes pressure work

$$A_{pr} = 4\pi\int_0^t P(t)R_c^2\dot{R}_c dt$$

and plastic work

$$A_p = -8\pi\int_0^t Y_d(\Delta\varepsilon_i, \Delta\dot{\varepsilon}_i, T)\dot{R}R^2 \ln\left(\frac{3}{4\pi N} + \frac{R^3}{R^3}\right)^{1/3} dt,$$

$R$  is void radius,  $P$  is pressure,  $\rho$  is medium density. If there is no density eqn. (1) becomes the problem of single void collapse in ideal incompressible fluid considered by Raleigh.

After simple transformations we get differential equation for void radius evolution versus time:

$$\dot{R} = -\sqrt{\frac{R_c}{\rho R^3(R_c - R)}} \times$$

$$\times \sqrt{\int_0^t \left[ C_1 P(t) - C_2 Y_d(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T) \ln\left(1 + \frac{3}{4\pi N R^3}\right) \right] R^2 \dot{R} dt}. \quad (2)$$

From eqn. (2) we see that full compaction of void will occur in case when  $A_{pr} = A_p$ . At constant  $P_0$  and  $Y_0$  this conditions is expressed as:

$$P_K = \frac{2}{3} Y_0 \left( -\ln \omega_0 + \frac{1 - \omega_0}{\omega_0} \ln \left( \frac{1}{1 - \omega_0} \right) \right),$$

and conditions of voids motion onset as:

$$\frac{P_0}{Y_0} = \frac{2}{3} \left( \ln \frac{1}{\omega_0} \right).$$

For ensemble of voids one should use eqn. (2) and compute damage:

$$N = \frac{1}{4/3\pi(R_c^3 - R^3)}, \quad \omega = \left( \frac{R}{R_c} \right)^3, \quad R_c = \frac{R}{\omega^{1/3}}$$

Ordinary equations below are used as integral models of the medium:

$$\tilde{Y}_d = (1 - \omega)Y_d, \quad \tilde{P} = (1 - \omega)P\left(\frac{\rho}{1 - \omega}, T\right)$$

## References

1. Carrol M.M., Holt A.C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials // J. Appl. Phys. – 1972. – V. 43. – P. 1626–1635.

4-28

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬФА-ЭПСИЛОН ПОЛИМОРФНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЖЕЛЕЗЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Г. В. Ионов, В. В. Дрёмов, Ф. А. Сапожников,  
М. А. Воробьёва, Н. А. Смирнов, Н. Е. Чижкова

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

E-mail: gionov@mail.ru

Целью нашего исследования было изучение на микроуровне механизмов ОЦК–ГПУ полиморфного перехода в железе методом классической молекулярной динамики (с использованием программного комплекса «Молох»). МД моделирование полиморфных переходов в железе осложняется отсутствием межатомного потенциала, который с одинаково высокой точностью позволял бы описывать как минимум две фазы. Переход из одной пространственной симметрии в другую сопровождается изменениями в электронной структуре, поэтому достаточно сложно использовать одну и ту же параметризацию потенциала для описания взаимодействий в различных электронных структурах. В данной работе были исследованы несколько потенциалов: Ackland [1], Mendeleev [2] (так называемый Mendeleev-2), MEAM-p [3], MEAM-I (MEAM, параметризованный во ВНИИТФ специально для данного исследования), Mishin [4]. С данными потенциалами были проведены крупномасштабные МД расчеты для моделирования следующих процессов:

- 1) деформация с сохранением объема для исследования механизмов пластичности;
- 2) объемное сжатие бездефектного образца в широком диапазоне давлений, включающем давления ОЦК–ГПУ перехода, с целью наблюдения образования зародышей новой фазы;
- 3) влияние винтовых дислокаций на вероятность образования критического зародыша новой фазы при объемном сжатии образца.

Моделирование объемного сжатия показало высокий уровень метастабильности, достигаемый при нагружении образца. Переход начинается при давлении, значительно превышающем равновесное давление. Единственным исключением был потенциал Мишина (Mishin), для которого метастабильность не реализовывалась. Для потенциалов MEAM класса ОЦК фаза оставалась неповрежденной до очень высоких давлений для бездефектных образцов. Поэтому эффект от наличия винтовых дислокаций был самым большим для этих потенциалов. Дислокации оказывали сильное влияние на образование критических зародышей и значительно понижали давление, при котором начинается переход. Дислокации также влияли на результирующую структуру образцов после перехода. Образование слоистой структуры было характерно для образцов, содержащих дислокации, так как переход начинался на дислокациях в форме тонких плоскостей ГПУ фазы, растущих от линии дислокации.

**Литература**

1. Gunkelmann N., Bringa E. M., Kang K., Ackland G. J. // Phys. Rev. B, 86 (2012), 144111.
2. M. I. Mendeleev, S. Han, D. J. Srolovitz, G. J. Ackland, D. Y. Sun, and M. Asta // Philos. Mag. 83, 3977 (2003).
3. T. Lee, M. I. Baskes, S. M. Valone, D. J. Doll // J. Phys.: Condens. Matter. 24, 225404 (2012).
4. H. Chamati, N. I. Papanicolaou, Y. Mishin, and D. A. Papaconstantopoulos // Surf. Sci. 600, 1793 (2006).

---

**MD MODELING OF THE ALPHA-EPSILON  
POLYMORPHOUS TRANSITION IN IRON**

G. V. Ionov, V. V. Dremov, F. A. Sapozhnikov,  
M. A. Vorobyova, N. A. Smirnov, N. E. Chizhkova

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

E-mail: gionov@mail.ru

The main aim of this work was to investigate into polymorphous bcc-hcp transition in iron by the means of Classical Molecular Dynamics. Simulation of polymorphous transitions within this approach is complicated by the absence of an interatomic potential which could describe at least two phases with the same accuracy. Indeed, the transition from one atomic spatial symmetry to another one is accompanied by changes in the electronic structure and, thus, it is rather difficult to use the same parameterization of an interatomic potential to describe the interatomic interactions provided by different electronic structures. Keeping in mind the absence of the «perfect» potential capable to reproduce properties of alpha- and epsilon-phases with high accuracy we have chosen several potentials for the current investigation: Ackland [1], Mendeleev [2] (actually so called Mendeleev-2), MEAM-p [3], MEAM-I (the MEAM parameterized at VNIITF specially for the current investigation), and Mishin [4]. These potentials were used in large-scale MD simulations to investigate the following processes:

1) volume-preserving compressive strain for the study of plasticity mechanisms;

2) volume compression of defect free samples beyond the BCC to HCP transition threshold with the goal to observe the formation of the new phase embryos;

3) volume compression of samples containing screw dislocation oriented in [110] direction with the goal to observe the effect of dislocation presence on the probability of the new phase critical embryo formation.

Simulation of volume compression demonstrated high level of metastability achieved when loading the samples. The transition starts at pressure much higher than the equilibrium pressure. The only exception is the Mishin potential for which the metastability is almost not realized. For the potential of the MEAM class the BCC phase preserves intact for very high pressure in the case of samples free of defects. At the same time the effect of dislocations is the strongest for these potentials. Dislocations affect also the resulting structure of the samples upon transition. The formation of layered structure is characteristic for samples containing dislocations due to the origin of the transition at the dislocations in the form of thin plates of the HCP phase growing outward the dislocation line.

**References**

1. Gunkelmann N., Bringa E. M., Kang K., Ackland G. J. // Phys. Rev. B, 86 (2012), 144111.
2. M.I. Mendeleev, S. Han, D. J. Srolovitz, G. J. Ackland, D. Y. Sun, and M. Asta // Philos. Mag. 83, 3977 (2003).
3. T. Lee, M. I. Baskes, S. M. Valone, D. J. Doll // J. Phys.: Condens. Matter. 24, 225404 (2012).
4. H. Chamati, N. I. Papanicolaou, Y. Mishin, and D. A. Papaconstantopoulos // Surf. Sci. 600, 1793 (2006).

---

 4-29

**РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ  
ДЛЯ СМЕСИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПО МОДЕЛИ ХАРТРИ–ФОКА–СЛЭТЕРА**

М. А. Кадатский, К. В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва,  
Россия

E-mail: makkad@yandex.ru

Представлены результаты численных расчетов термодинамических характеристик (в том числе ударных адиабат) смесей химических элементов H и C по модели Хартри–Фока–Слэтера в широкой области давлений и температур. Проведено сравнение с результатами по другим квантово-статистическим моделям и имеющимся для углеводородных соединений данными ударно-волновых экспериментов.

**HUGONIOT CALCULATIONS FOR A MIXTURE  
OF CHEMICAL ELEMENTS BASED ON  
HARTREE–FOCK–SLATER MODEL**

M. A. Kadatsky, K. V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: makkad@yandex.ru

Calculated results are presented for thermodynamic characteristics (Hugoniot is included) for a mixture of chemical elements H and C based on Hartree–Fock–Slater model over a broad region of pressures and temperatures. A comparison is done with results of other quantum-statistical approaches and available data from shock-wave experiments with hydrocarbons.

---

 4-30

**ИСКАЖЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ  
ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ni<sub>3</sub>(Al, Ti)  
В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ  
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Н. В. Казанцева<sup>1,2</sup>, В. Ю. Колосов<sup>2</sup>, В. П. Пилюгин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Методы интенсивной пластической деформации позволяют получать высокую плотность дефектов в материале. Это может способствовать формированию

дальнодействующих полей напряжений, приводящих к изгибу-кручению его кристаллической решетки и выявляющихся по наличию на электронно-микроскопических изображениях материала изгибных экстинкционных контуров. Амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки ( $\chi$ ) связана с шириной экстинкционного контура  $\chi \sim I^{-1}$ , где  $I$  – ширина контура. Чем меньше ширина контура, тем сильнее изогнут кристалл и выше амплитуда полей напряжений ( $\sigma \sim \chi^{-1/2}$ ). Оценка линейной плотности изгибных контуров дает возможность оценить число источников кривизны-кручения кристаллической решетки, а величина кривизны-кручения и амплитуда дальнодействующих полей напряжений могут указать на наиболее напряженные участки структуры исследуемого материала, что является важной характеристикой для конструкционных материалов. В интерметаллидных соединениях большая пластическая деформация может привести не только к формированию наноструктур, но и к атомному разупорядочению. Материалами для исследования служили поликристаллы  $\text{Ni}_3\text{Al}$  с добавками Ti до 7 ат.%. Образцы были получены методом дуговой плавки в атмосфере аргона. Деформацию осуществляли сдвигом под давлением в наковальнях Бриджмена ( $p = 10$  ГПа) при комнатной температуре. Рентгеноструктурный анализ проведен в центре рентгеноструктурных исследований ИФМ УрО РАН с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3, излучение  $\text{Cu K}_\alpha$  и  $\text{Co K}_\alpha$ . Исследование структуры выполнено с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-200CX. В результате эксперимента обнаружено, что деформация на 10 оборотов приводит к формированию в образце нанокристаллической структуры с размерами фрагментов 20 нм. Расчет степени дальнего порядка показал сохранение упорядоченного состояния после перехода в наноразмерную структуру (степень дальнего порядка в исходном состоянии 0,92, после деформации – 0,8). Образование новых метастабильных фаз в сплаве после деформации не обнаружено. Проведенная оценка искажения кристаллической решетки исследованного интерметаллида после интенсивной деформации методом анализа изгибных контуров показала наличие высоких напряжений в материале после деформации.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ: № 14–08–00108, № 12–03–01118.

#### LATTICE DISTORSION OF THE INTERMETALLIC COMPOUND $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ UNDER SEVERE PLASTIC DEFORMATION

N. V. Kazantseva<sup>1,2</sup>, V. Yu. Kolosov<sup>2</sup>, V. P. Pilyugin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metal Physics, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Methods of severe plastic deformation allow us to obtain a high density of defects in the material. This fact may provide the long-range stress field formation which resulting in bending-torsion of the crystal lattice. Usually such a lattice bending-torsion one can see on TEM pictures as the bending extinction contours. The amplitude of the crystal lattice curvature ( $\chi$ ) relates to the extinction contour width

as  $\chi \sim I^{-1}$ , where  $I$  is a contour width. The narrower contour, the more crystal curvature, and higher amplitude of the stress field ( $\sigma \sim \chi^{-1/2}$ ). The evaluation of the linear density of the bending contours allows us to estimate the number of the curvature-torsion sources of the crystal lattice. The value of the curvature and amplitude of the long-range stress fields can indicate on the areas with a high stress in as-studying samples. Last fact is very important characteristic for structural materials. Severe plastic deformation in intermetallic compounds can lead both the formation of nanostructures and atomic disordering. We studied the polycrystalline  $\text{Ni}_3\text{Al}$  samples with 7 at.% of Ti. Samples were prepared by arc melting in an argon atmosphere. Shear deformation by Bridgman anvils ( $p = 10$  GPa) was done at room temperature. X-ray diffraction analysis was done in the X-ray centre of Institute of Metal Physics using  $\text{Cu K}_\alpha$  and  $\text{Co K}_\alpha$  radiations by X-ray diffractometer DRON-3. Microstructure was studied with electron transmission microscope JEM-200CX. It was found the nano-scale structure with the sizes of fragments of 20 nm in the sample after 10 turns of anvils. The long-range order was changed from 0.92 for initial state to 0.8 for the state after the deformation. We did not found any metastable phases in sample after the severe plastic deformation. The bending contour analysis showed the high stress areas in the deformed sample.

4-31

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ АМГ6БМ И АМГ6М В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЛГП

Е. И. Карнаухова, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина,  
Д. Н. Казаков, А. С. Майорова, О. Е. Козелков,  
А. А. Тяктев, С. С. Мокрушин

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

Представлены результаты исследования откольной прочности и упругопластических параметров алюминиевых сплавов АМГ6БМ и АМГ6М в ударно-волновых экспериментах на легкогазовых пушках ЛГП-1200 и ЛГП-2500. Профили волн напряжений регистрировались одновременно двухканальным лазерно-интерферометрическим комплексом VISAR и гетеродинным измерителем скорости PDV. Получены зависимости откольной прочности и прочностных параметров алюминиевых сплавов АМГ6БМ и АМГ6М от амплитуды ударно-волнового воздействия в диапазоне от 1,1 до 14,2 ГПа и скорости деформирования в диапазоне от 0,2 до  $2,2 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>. Определены пороговые уровни разрушения сплавов АМГ6М и АМГ6БМ. Показано, что сплав АМГ6БМ в отличие от сплава АМГ6М разупрочняется при давлении более 5 ГПа.

## STUDY OF DYNAMIC FEATURES OF ALLOYS AMG6BM AND AMG6M IN SHOCK-WAVE TESTS WITH LGP GAS GUNS

E. I. Karnauhov, A. V. Pavlenko, S. N. Malugina,  
D. N. Kazakov, A. S. Mayorova, O. E. Kozelkov,  
A. A. Tiaktev, S. S. Mokrushin

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

Spall strength and elastoplastic parameters of aluminium alloys AlMn6BM and AlMn6M were studied in shock wave experiments with light gas guns LGP-1200 and LGP-2500 and results of these experiments are provided. Strength wave profiles were registered simultaneously by VISAR two-channel laser-interferometric complex and PDV heterodyne velocimeter. Consideration was given to dependencies of spall strength and strength parameters of aluminium alloys AlMn6BM and AlMn6M on the amplitude of the shock-wave loading in the range of 1.1 to 14.2 GPa and on the deformation rate in the range of 0.2 to  $2,2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ . Threshold damage levels for alloys AlMn6BM and AlMn6M are determined. It is shown that alloy AlMn6BM as distinguished from alloy AlMn6M soften under the above 5 GPa pressure.

4-32

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОГО СХОЖДЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИЗУЧЕНИЯ СОХРАНЕННЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДАМИ ИМРТ И СЭМ

Е. А. Козлов<sup>1</sup>, С. А. Бричиков<sup>1</sup>, Д. П. Кучко<sup>1</sup>,  
М. А. Ральников<sup>1</sup>, А. В. Ольховский<sup>1</sup>, А. А. Дегтярев<sup>1</sup>,  
Г. Г. Бондарчук<sup>1</sup>, Л. П. Брезгина<sup>1</sup>, О. А. Никитин<sup>1</sup>,  
Е. О. Ковалев<sup>1</sup>, В. В. Смирнов<sup>1</sup>,  
А. В. Добромислов<sup>2</sup>, Н. И. Талуц<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия

<sup>2</sup> Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
E-mail: e. a.kozlov@vniitf.ru; dobromyslov@imp.uran.ru

Представлены данные о постановке 10 полусферических взрывных экспериментов с системами с наружным радиусом слоя взрывчатого вещества  $R_{\text{ВВ}} = 40$  мм и оболочками из закаленной стали 30ХГСА HRC 35...40 и стали 12Х18Н10Т различной исходной толщины. На основании результатов лазерно-интерферометрических измерений, полученных непосредственно при взрывном обжатии оболочек, проанализировано влияние относительного радиуса расположения оболочек в слое ВВ и ее исходной толщины, а также реологических свойств сталей и условий инициирования ВВ, на развитие на оболочках детерминированных возмущений [1, 2]. При изучении сохраненных стальных оболочек методом интегральной малоракурсной томографии

[3], а также оптической и растровой электронной микроскопии [4], подтверждено образование в оболочках локальных сдвиговых и откольных повреждений.

## Литература

1. E. A. Kozlov, 2D- and 3D-explosive experiments for verification of spall and shear strengths models for some steels, In: 17th APS Conference on Shock Compression of Condensed Matter, Chicago, Illinois, USA, June 26 – July 1, 2011, M. L. Elert, W. T. Buttler, J. P. Borg, J. L. Jordan and T. J. Vogler (eds.), Melville, New York: AIP CP 1426, 2012, pp. 945–948.
2. Е. А. Козлов, С. А. Бричиков, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. В. Ольховский, Н. С. Жилиева, Л. П. Брезгина, В. Н. Пovyшев, Локальные сдвиговые и откольные повреждения стальных оболочек при квазисферическом взрывном нагружении, Труды Международной конференции «Ударные волны в конденсированном веществе» (SWCM-2012), 16–21 сентября 2012, Киев, Украина, стр. 158–167.
3. Л. П. Брезгина, Е. А. Козлов, В. Н. Пovyшев. 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].
4. E. A. Kozlov, S. A. Brichikov, N. S. Zhilyaeva, L. V. Khardina, L. P. Brezgina, V. N. Povyshv, A. V. Dobromyslov, N. I. Taluts, 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, October 23–28, 2011, Barcelona, Spain.

## SPECIAL FEATURES OF QUASISPHERICAL CONVERGENCE DYNAMICS OF STEEL SHELLS BASED ON LASER INTERFEROMETRY RESULTS AND RECOVERED SHELLS STUDY BY THE ISDT AND SEM METHODS

E. A. Kozlov<sup>1</sup>, S. A. Brichikov<sup>1</sup>, D. P. Kuchko<sup>1</sup>,  
M. A. Ralnikov<sup>1</sup>, A. V. Olkhovsky<sup>1</sup>, A. A. Degterev<sup>1</sup>,  
G. G. Bondarchuk<sup>1</sup>, L. P. Brezgina<sup>1</sup>, O. A. Nikitin<sup>1</sup>,  
E. O. Kovalev<sup>1</sup>, V. V. Smirnov<sup>1</sup>,  
A. V. Dobromyslov<sup>2</sup>, N. I. Taluts<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy  
of Sciences, Ekaterinburg, Russia

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru; dobromyslov@imp.uran.ru

This paper describes the setup of ten hemispherical explosive experiments involving systems with outer radius of HE layer  $R_{\text{HE}} = 40$  mm and shells of 30KhGSA steel quenched up to HRC 35...40 and 12Kh18N10T steel with different initial thickness. Laser-interferometric measurements were performed directly during imploding compression of shells and results of these measurements were used to analyze the influence of both the relative radius of shells inside the HE layer, and the initial thickness of shells, as well as the effect of rheological properties of steels and conditions of HE initiation on the development of deterministic perturbations [1, 2]. Studying of recovered steel shells by integral small-direction tomography (ISDT) [3] and by

optical and scanning electron microscopy (SEM) [4] proved formation of local shear and spall fractures in the test shells.

### References

1. E. A. Kozlov, 2D- and 3D-explosive experiments for verification of spall and shear strengths models for some steels, In: 17th APS Conference on Shock Compression of Condensed Matter, Chicago, Illinois, USA, June 26 – July 1, 2011, M. L. Elert, W. T. Buttler, J. P. Borg, J. L. Jordan and T. J. Vogler (eds.), Melville, New York: AIP CP 1426, 2012, pp. 945–948.
2. E. A. Kozlov, S. A. Brichikov, D. P. Kuchko, M. A. Ral'nikov, A. V. Ol'khovskiy, N. S. Zhilyaeva, L. P. Brezgina, V. N. Povyshev, Local Shear and Spall Damages of Steel Shells under Quasi-Spherical Explosive Loading, International Conference SHOCK WAVES IN CONDENSED MATTER, September 16–21, 2012, Kiev, Ukraine, pp. 158–167.
3. L. P. Brezgina, E. A. Kozlov, V. N. Povyshev, Comparison of the Potentials of Ultrasmall-Directions Tomography and Integral Small-Directions Tomography for Observing Spall and Shear Fractures in Iron and Steel Shells under Explosive Loading, Rus.J. Defektoskopiya, 2010, Vol. 46, No. 12, pp. 3–22 [Russian Journal of Nondestructive Testing, 2010, Vol. 46, No. 12, pp. 867–883].
4. E. A. Kozlov, S. A. Brichikov, N. S. Zhilyaeva, L. V. Khardina, L. P. Brezgina, V. N. Povyshev, A. V. Dobromyslov, N. I. Taluts, 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, October 23–28, 2011, Barcelona, Spain.

### SHEAR STRENGTH AND PLASTIC LOCALIZATION IN ALLOY AL-CU UNDER SHOCK LOADING

V. S. Krasnikov<sup>1</sup>, A. E. Mayer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: vas.krasnikov@gmail.com, mayer@csu.ru

The work presents the results of shear strength and plastic localization modeling in a simple binary alloy aluminum-copper under shock loading. Modeling was performed in continual approximation with the help of plasticity dislocation model. It was shown that shear strength of such alloy can be increased and decreased with the growth of sample initial temperature depending on strain rate at the front of elastic precursor that is related to the transition from thermo-convective motion of dislocations to tunnel regime of motion, when phonon friction plays the main role in deceleration. When shock wave propagates in the sample with initially nonuniform distribution of physical properties (temperature, dislocation density, concentration of impurity centers), one observes the formation of plastic localization bands that are oriented at an angle 45° to the shock wave front. We investigated the role of various perturbing factors in the formation of such localization regions.

4-33

### СДВИГОВАЯ ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧЕСКАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ В СПЛАВЕ AL-CU ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. С. Красников<sup>1</sup>, А. Е. Майер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

E-mail: vas.krasnikov@gmail.com, mayer@csu.ru

В работе приводятся результаты моделирования сдвиговой прочности и пластической локализации в простом бинарном сплаве алюминий-медь при ударном нагружении. Моделирование выполнено в континуальном приближении с помощью дислокационной модели пластичности. Показано, что сдвиговая прочность такого сплава может как повышаться, так и снижаться с ростом начальной температуры образцов в зависимости от скорости деформации на фронте упругого предвестника, что связано с переходом от термоактивированного движения дислокаций к надбарьерному режиму движения, когда основную роль в торможении играет фононное трение. При распространении ударной волны в образце с изначально неоднородным распределением физических свойств (температура, плотность дислокаций, концентрация примесных центров) происходит формирование полос пластической локализации, ориентированных под углом 45° к фронту ударной волны. Исследована роль различных возмущающих факторов в формировании таких областей локализации.

4-34

### ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МИШЕНИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ВКЛЮЧЕНИЕ, ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МОЩНЫМ ПОТОКОМ ЭНЕРГИИ

В. С. Красников, А. П. Яловец, С. В. Кашуков

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

E-mail: vas.krasnikov@gmail.com, yalovets.alex@rambler.ru, skashukov@mail.ru

Проведено моделирование формирования остаточных напряжений в металлических мишенях, содержащих включения при обработке мощными потоками заряженных частиц. Моделирование выполнено в осесимметричной двумерной постановке. Для описания пластической релаксации сдвиговых напряжений использовалась эмпирическая модель пластичности – ZA модель. При охлаждении нагретого пучком приповерхностного слоя в нем формируются растягивающие напряжения по величине достигающие сотен мегапаскалей. Показано, что в зависимости от жесткости включения оно может как снимать напряжения в базовом веществе, так и приводить к их повышению.

### THE FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN THE TARGET CONTAINING INCLUSION UNDER RADIATION BY POWERFUL ENERGY FLOW

V. S. Krasnikov, A. P. Yalovets, S. V. Kashutov

South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: vas.krasnikov@gmail.com, yalovets.alex@rambler.ru, skashukov@mail.ru

We modeled the formation of residual stresses in metallic targets containing inclusions under the impact of powerful flows of charged particles. Modeling was performed in axially symmetric 3D set-up. In order to describe plastic relaxation of shear stresses, we used empirical model of plasticity – ZA model. When near-surface layer heated by a beam was cooled down, one observes the formation of stretching stresses, which reach hundreds of mega Pascals by value. It was shown that depending on inclusion rigidity, it can both remove stresses in base matter, and increase them.

4-35

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИ- И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЯХ, СОЗДАВАЕМЫХ ДЕЙСТВИЕМ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

С. А. Абросимов<sup>1</sup>, А. П. Бажулин<sup>1</sup>, А. П. Большаков<sup>1</sup>,  
В. И. Конов<sup>1</sup>, И. К. Красюк<sup>1</sup>, П. П. Пашинин<sup>1</sup>,  
В. Г. Ральченко<sup>1</sup>, А. Ю. Семенов<sup>1</sup>, Д. Н. Совык<sup>1</sup>,  
И. А. Стучебрюхов<sup>1</sup>, В. Е. Фортов<sup>2</sup>,  
К. В. Хищенко<sup>2</sup>, А. А. Хомич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: krasyuk@kapella.gpi.ru

Представлены результаты экспериментального исследования физических свойств поли- и монокристаллических алмазов в области отрицательных давлений при пикосекундной длительности ударно-волнового воздействия на мишень.

Для ударно-волнового воздействия на мишень использовано лазерное излучение лазера на фосфатном неодимовом стекле (вторая гармоника –  $\lambda = 527$  нм, энергия импульса до 2,5 Дж) при интенсивности вплоть до  $2 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Лазерное излучение длительностью 70 пс фокусировалось на мишени в пятна диаметром от 0,3 до 0,8 мм. Максимальная величина плотности потока лазерного излучения в области фокусировки достигала величины  $1,9 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, а абляционное давление – 0,7 ТПа. Образцы – пластины поликристаллического алмаза толщиной от 140 до 400 мкм синтезированы методом осаждения из газовой фазы (CVD – chemical vapor deposition) в СВЧ разряде (2.45 ГГц) в плазмохимическом реакторе УПСА-100 (ООО «Оптосистемы») в смесях CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>. В качестве мишени

были использованы также и пластины из монокристаллического синтетического алмаза типа Ib, полученного выращиванием при высоких давлениях. Эти полированные пластины ориентацией (100) с толщиной около 300 мкм имели коммерческое происхождение.

Экспериментально исследована откольная прочность мишеней из алмазов при скоростях деформирования вплоть до  $10^8$  1/с. Достигнута величина откольной прочности 16.5 ГПа, что составляет 24% от теоретического предела динамической прочности алмаза. Обнаружено, что в ряде случаев откол наблюдался не только на тыльной стороне мишени, но и на её лицевой поверхности. С помощью сканирующего электронного микроскопа изучена морфология откольных плоскостей. Методом КР спектроскопии получены указания на то, что на тыльной стороне мишени в области откола происходит превращение некоторой части кристаллического алмаза в графит.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-02-00625, 12-02-00746, 13-02-91057 и 14-08-00967), Президиума РАН (программы № 13П Экстремальные световые поля и их приложения и 2П Вещество при высоких плотностях энергии) и Президента РФ (гранты НШ-451.2014.2 и НШ-6614.2014.2). Авторы благодарны Е. Е. Ашкинази, С. Г. Рыжкову и Е. В. Заведееву, за приготовление и профилометрию образцов.

### EXPERIMENTAL STUDY OF POLY- AND MONOCRYSTALLINE DIAMONDS AT NEGATIVE PREASSURES USING PICOSECOND LASER PULSES

S. A. Abrosimov<sup>1</sup>, A. P. Bolshakov<sup>1</sup>, A. P. Bazhulin<sup>1</sup>,  
V. E. Fortov<sup>2</sup>, K. V. Khishchenko<sup>2</sup>, A. A. Khomich<sup>1</sup>,  
V. I. Konov<sup>1</sup>, I. K. Krasnyuk<sup>1</sup>, P. P. Pashinin<sup>1</sup>,  
V. G. Ralchenko<sup>1</sup>, A. Yu. Semenov<sup>1</sup>,  
D. N. Sovyk<sup>1</sup>, I. A. Stuchebryukhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for High Temperature of RAS, Moscow, Russia

E-mail: krasyuk@kapella.gpi.ru

The experimental studies of spallation phenomena and dynamic mechanical strength of poly- and monocrystalline diamonds at the influence on them of laser pulse with duration 70 ps are presented. It was realized the strain rate up to  $10^8$  1/s. In these experiments, we used the neodymium glass laser “Kamerton-T” facility. The basic radiation was transformed to the second harmonic with the wavelength of 0.527  $\mu$ m and the laser pulse energy of 2.5 J. Irradiated spot on a target surface was of 0.3 to 0.8 mm in diameter. Then the maximum energy density of the laser radiation flux in the focal area was  $2 \cdot 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>; the ablation pressure was up to 0.7 TPa. Samples – polycrystalline diamond plate with a thickness of 140 to 400 microns were synthesized by chemical vapor deposition (CVD) in a microwave discharge (2.45 GHz) in the plasma-chemical reactor UPСА-100 (ООО “Optosystems”) in mixtures of CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>. It was used also a plate from the synthetic single-crystal diamond of type Ib, obtained by synthesis at high pressures. These



polished plate (100) having a thickness of about 300 microns had commercial origin.

The spall phenomenon was used to obtain data on the dynamic mechanical strength of the materials under study. It was reached the spall strength of 16.5 GPa, equivalent to 24% of the theoretical ultimate dynamic strength of diamond. In some cases spallation was observed not only on the back side of the target, but also on its front surface. Morphology of the spall planes studied using scanning electron microscope showed decrease in the size of crystallites over the original polycrystalline. The Raman spectroscopy revealed that in the area of spallation on the back side of the target some of the crystalline substance diamond goes in to graphite phase.

This work supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 12-02-00625-a, and 12-02-00746-a), the Presidium of the Russian Academy of Sciences (programs No. 13P “Extreme light fields and their applications” and No. 2P “Matter at high energy densities”), and the President of the Russian Federation for Support of Leading Scientific Schools (grants No. NSh-368.2012.2 and NSh-7241.2012.2). The authors are grateful E. E. Ashkinazi, S. G. Ryzhkov, and E. V. Zavedeev for the preparation of samples and profilometry.

4-36

#### МОДЕЛИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ И ВИХРЕВЫХ ДВИЖЕНИЙ СЖИМАЕМЫХ СПЛОШНЫХ СРЕД

В. Ф. Куропатенко

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

E-mail: v.f.kuropatenko@vniitf.ru

Рассматриваются модели, в которых сжимаемые сплошные среды могут участвовать в потенциальных или вихревых движениях в зависимости от внешних воздействий или от внутренних процессов.

В каждой точке сплошной среды к обычным термодинамическим и кинематическим характеристикам вещества добавляются компоненты вихря, кинетическая энергия вращения и центробежные силы. Эти величины включаются в законы сохранения – дифференциальные уравнения в частных производных. По аналогии с давлением и девиатором напряжений, связанных с плотностью и деформациями сдвигов, возникает тензор вращательных напряжений, связанный с тензором поворотов. Потенциальные движения являются предельными, когда компоненты вихря обращаются в ноль. Вихревые движения широко распространены в природе, в технологических процессах, при взрывах и т. д.

Для их моделирования до последнего времени часто применяют модели потенциальных движений, что ограничивает точность прогнозов.

Работа поддержана РФФИ ГРАНТ 13-01-00072.

#### POTENTIAL AND EDDY COMPRESSIBLE CONTINUA MODELS

V. F. Kuropatenko

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

E-mail: v.f.kuropatenko@vniitf.ru

The paper discusses models where the flow of compressible continua is potential or eddy depending on external or internal conditions.

Eddy components, angular kinetic energy and centrifugal forces are added to the traditional thermodynamic and kinematic characteristics at each point of a continuum. The quantities are included in the conservation laws – partial differential equations. By analogy with pressure and stress deviator related to density and shear strains, there arises a rotational stress tensor related to the angular displacement tensor. Potential flows are a limiting case where the eddy components vanish.

Eddy flows occur widely in nature, engineering procedures, explosions etc. Until recently they have often been simulated with potential flow models which limit the accuracy of predictions.

The work was supported by RFBR, Grant 13-01-00072.

4-37

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО СДВИГОВОЙ И ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ В ОБЛАСТИ ПРОТЕКАНИЯ ОБРАТИМОГО $\alpha'$ - $\epsilon$ -ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ, А ТАКЖЕ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОХРАНЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Е. А. Козлов<sup>1</sup>, В. И. Таржанов<sup>1</sup>, Д. Г. Панкратов<sup>1</sup>,  
Д. П. Кучко<sup>1</sup>, М. А. Ральников<sup>1</sup>, Д. С. Боярников<sup>1</sup>,  
А. Г. Попцов<sup>1</sup>, В. Н. Ногин<sup>1</sup>, А. В. Петровцев<sup>1</sup>,  
Д. М. Шалковский<sup>1</sup>, А. В. Добромислов<sup>2</sup>, Н. И. Талуц<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru, dobromyslov@imp.uran.ru

Представлены постановки взрывных и ударно-волновых экспериментов и новые, в дополнение к [1], результаты по сдвиговой и откольной прочности образцов из закаленной стали 30ХГСА НРС 35...40 при их низко- и высокоинтенсивном взрывном нагружении, полученные с использованием многоканальных лазерно-интерферометрических методик по схемам Фабри-Перо и лазерно-гетеродинной непосредственно при нагружении плоских и ступенчатых образцов, а также – основные результаты металлографических исследований

сохраненных образцов. Проведено расчетно-теоретическое моделирование изучаемых взаимосвязанных явлений высокоскоростной деформации стали, кинетики протекания в ней при сжатии и разгрузке обратимого  $\alpha'$ - $\varepsilon$ -фазового превращения, а также – зарождения и развития откольных и сдвиговых повреждений. Продемонстрирована важность правильного описания в расчетах кинетики обратного  $\varepsilon$ - $\alpha'$ -превращения и особенностей формирования ударной волны разрежения для адекватной передачи в расчетах толщин образующихся в сохраняемых образцах отколов.

#### Литература

1. Е. А. Козлов, В. И. Таржанов, И. В. Теличко, Д. Г. Панкратов. Сдвиговая и откольная прочности закаленной стали 30ХГСА при взрывном нагружении в области протекания твердофазного превращения, Деформация и разрушение материалов, 2012, № 8, с. 32–38 [Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2013, No. 10, pp. 772–778].

#### NEW DATA ON SHEAR AND SPALL STRENGTHS OF QUENCHED 30KHGSA STEEL UNDER EXPLOSIVE LOADING IN THE REGION OF REVERSIBLE $\alpha'$ - $\varepsilon$ -PHASE TRANSFORMATION BASED ON RESULTS OF MULTI-CHANNEL LASER INTERFEROMETRY, METALLOGRAPHIC ANALYSIS, AND ELECTRON MICROSCOPY OF RECOVERED SAMPLES

E. A. Kozlov<sup>1</sup>, V. I. Tarzhanov<sup>1</sup>, D. G. Pankratov<sup>1</sup>,  
D. P. Kuchko<sup>1</sup>, M. A. Ralnikov<sup>1</sup>, D. S. Boyarnikov<sup>1</sup>,  
A. G. Poptsov<sup>1</sup>, V. N. Nogin<sup>1</sup>, A. V. Petrovtsev<sup>1</sup>,  
D. M. Shalkovsky<sup>1</sup>, A. V. Dobromyslov<sup>2</sup>, N. I. Taluts<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru, dobromyslov@imp.uran.ru

Paper describes new explosive and shock-wave experiments and supplements [1] with new results on shear and spall strengths of quenched 30KhGSA steel under low- and high-intensity loading. These results were obtained using multi-channel Fabry-Perot laser interferometry and laser heterodyne techniques under loading of planar and stepped samples. Basic results of recovered samples investigations were presented. The interdependent phenomena of high-rate deformation of steel, the proceeding of reversible  $\alpha'$ - $\varepsilon$ -phase transformation observed in steel under compression and release, as well as incipience and development of spall and shear damages were numerically simulated. One demonstrated that it is important to correctly describe kinetics of reverse  $\varepsilon$ - $\alpha'$ -transformation and specific features of rarefaction shock wave formation during the computations in order to adequately represent the thicknesses of spalls appearing inside recovered samples.

#### References

1. E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, I. V. Telichko, D. G. Pankratov. Shear and Spall Strengths of Quenched 30KhGSA Steel under Explosive Loading in the Range of Solid-Solid Phase

Transformation, Rus.J. Deformation and Fracture of Materials, 2012, № 8, pp. 32–38 [Russian Metallurgy (Metally), (Engl transl.), Vol. 2013, No. 10, pp. 772–778].

4-38

#### МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СМЕСЕЙ И СПЛАВОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ КВАРЦ В СВОЙ СОСТАВ, ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

К. К. Маевский, С. А. Кинеловский

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

E-mail: skin@hydro.nsc.ru, konstantinm@hydro.nsc.ru

Представлены результаты численных экспериментов по моделированию ударно-волнового нагружения сплошных и пористых смесей, содержащих в своем составе кварц в качестве компонента. Модель основана на предположении, что все компоненты смеси, включая газ, при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии (thermodynamic equilibrium components – TEC). Конденсированные фазы описываются уравнением состояния типа Ми-Грюнайтзена. Дополняя систему уравнений динамической совместности условием равенства температур компонентов смеси выписывается зависимости, которые можно трактовать как ударные адиабаты смеси. Полагается, что коэффициент Грюнайтзена зависит в явном виде только температуры.

Данная модель TEC позволяет определять динамические параметры определяются моделью ударно-волнового нагружения сплошного и пористого кварца SiO<sub>2</sub> и его модификаций (коэсит, штешовит) в широком диапазоне пористостей и давлений, достоверно описывая, в том числе, и область полиморфного фазового перехода. Модель позволяет описывать поведение как смесей содержащих кварц, так и сплавов содержащих в своем составе кварц, рассматривая сплав как непористую смесь с тем же соотношением компонентов, как и в сплаве. Для расчета ударно-волнового воздействия на них используются уравнения состояния только компонентов смеси.

Интерес к исследованиям материалов, содержащих кварц в качестве одного из компонента в своем составе, связан с широким распространением кварца в природе, что делает модель TEC перспективной для моделирования в частности состава Земной коры, а также для решения проблем взрывного компактирования порошков для получения материалов с заданными свойствами. Были проведены расчеты для порошков и сплавов различных составов, содержащих кварц в качестве компонента. Получено хорошее соответствие расчетных данных по модели TEC с данными различных авторов, определенными на основании экспериментов. Показано, что предложенная модель позволяет достоверно описывать поведение смесей содержащих в своем составе кварц с алюминием, кварц с парафином и кварц с вольфрамом при ударно-волновом нагружении, используя только параметры компонентов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 13-03-00663).

**MODEL BEHAVIOR OF POROUS MIXTURES  
AND ALLOYS CONTAINING QUARTZ  
IN ITS COMPOSITION WITH THE SHOCK WAVE  
LOADING**

K. K. Maevskii, S. A. Kinelovskii

Lavrentyev Institute of hydrodynamics of the Siberian Branch of  
the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru, skin@hydro.nsc.ru,

The results of the numerical experiments on modeling of shock wave loading of solid and porous mixtures and alloys containing quartz in its composition as the component. The model is based on the assumption that all of the components of the mixture, including gas, are in the thermal equilibrium with the shock wave loading (thermodynamic equilibrium components – TEC). The equations of state of the Mie–Grüneisen type are used to describe the behavior of the condensed phases. Complementing the system of equations of dynamic compatibility condition that the temperature component of the mixture is discharged dependencies that can be interpreted as Hugoniot of the mixture. The coefficient of Grüneisen is explicitly only temperature.

The dynamic parameters of shock-wave loading of solid and porous quartz SiO<sub>2</sub> and its modifications (coesite, stishovite) are determined by model TEC in a wide range of porosities and pressures significantly describing, in particular, and the region of the polymorphic phase transition. The model allows to describe the behavior as the mixtures containing quartz in its and the alloys, considering the alloy as the non-porous mixture with the same ratio of components as in the alloy. Only the equations of state of the mixture components are used for the calculation of shock wave effect.

Interest in research of materials containing quartz, is associated with the high incidence of quartz in nature, which makes the model TEC promising model in particular for the simulation of the Earth's crust, as well as to solve the problems of explosive compacting of powders to produce the materials with given properties. The calculations were conducted for the mixtures and alloys of different compositions containing quartz. The calculation of the well corresponds to the data that are received on the basis of the experiments of the various authors shows that the proposed model allows to describe the behavior of the mixtures containing in its composition with aluminum and quartz, quartz and paraffin, quartz and tungsten in the shock wave loading, using only the component settings.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant Nos. 13-03-00663).

4-39

**ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ ВО ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ**

А. Е. Майер<sup>1</sup>, И. Н. Бородин<sup>2,1</sup>, В. С. Красников<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск,  
Россия

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург,  
Россия

<sup>3</sup>Южно-Уральский государственный университет (НИУ),  
Челябинск, Россия

E-mail: mayer@csu.ru

Численно исследовано распространение ударной волны по металлу со случайно неоднородным начальным распределением плотности дислокаций, размеров зерна, а также с микроскопическими порами и включениями других металлов. Моделирование проводилось с использованием дислокационной модели пластичности [1] и модели зернограничного проскальзывания [2]. Показано, что неоднородность исходной структуры материала приводит к образованию полос локализованной пластической деформации (полос сдвига), наклоненных под углом 45 градусов к фронту волны. Эффект обнаружен для чистого алюминия и его сплава (для сплава использовались данные [3]), а также для других металлов.

Основной причиной локализации является концентрация напряжений вблизи структурных неоднородностей. В динамическом режиме нагружения скорость пластической деформации тем выше, чем на большую величину сдвиговые напряжения превышают статический предел текучести. Поэтому в областях концентрации напряжений пластическая деформация накапливается, далее инициируется развитие полос скольжения. Толщина образующихся полос скольжения определяется размерами исходных неоднородностей.

Исходная неоднородность материала приводит также к искажению формы фронта ударной волны, проявляющемуся в дисперсии массовой скорости, в том числе, в дисперсии скорости тыльной поверхности мишени при выходе на нее ударной волны. Величина дисперсии определяется микроструктурой материала. Ударная волна, в целом, устойчива, поэтому в случае перехода из структурно неоднородного материала в однородный металл дисперсия скоростей исчезает. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [4].

Работа поддержана грантом Президента РФ (МД-286.2014) и Минобрнауки РФ по ФЦП «Кадры» (14.В37.21.0384).

**Литература**

1. Mayer A. E., Khishchenko K. V., Levashov P. R., Mayer P. N. // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 193508.
2. Borodin E. N., Mayer A. E. // *Phys. Solid State.* – 2012. – V. 54. – P. 808–815.
3. Yanilkin A. V., Krasnikov V. S., Kuksin A. Yu., Mayer A. E. // *Int. J. Plast.* – 2014. – V. 55. – P. 94–107.
4. Meshcheryakov Yu.I., Divakov A. K., Zhigacheva N. I., Makarevich I. P., Barakhtin B. K. // *Phys. Rev. B.* – 2008. – V. 78. – P. 064301.

## LOCALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION AT THE SHOCK WAVE FRONT

A. E. Mayer<sup>1</sup>, E. N. Borodin<sup>2,1</sup>, V. S. Krasnikov<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS,  
St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>South-Ural State University, Russia

E-mail: mayer@csu.ru

We numerically investigate the shock wave propagation through the metal with initial random perturbations of the dislocation density and grain size, as well as through the metal with microscopic pores and inclusions of other metals. The dislocation plasticity model [1] and the grain-boundary sliding model [2] are used in simulations. It is shown that the initial micro-structural irregularities lead to formation of bands of the localized plastic deformation (the shear bands), which are inclined to the shock wave front on 45 degrees. This effect is revealed for pure aluminum and aluminum alloy (data of paper [3] is used for aluminum alloy), as well as other metals.

Stress concentration near the micro-structural irregularities is the main reason of the localization. At the dynamical loading, the shear stresses greater exceed the static yield stress, the plastic strain rate higher. Therefore, the plastic strain is accumulated in the areas of stress concentration and it initiates the shear bands growth. The bands thickness is determined by size of initial irregularities.

Initial micro-structural irregularity leads to distortion of the shock front shape, which reveals itself as a dispersion of the substance velocity, including dispersion of the backside velocity profiles. The dispersion value is determined by the initial microstructure. The shock wave is stable, in whole, it means, if the shock passes from the heterogeneous material into the homogeneous one, than the dispersion vanishes. Our simulation results is compared with the experimental data [4]

This work is supported by the grant of RF President (MD-286.2014) and by the RF Ministry of Education and Science (14.B37.21.0384).

### References

1. Mayer A. E., Khishchenko K. V., Levashov P. R., Mayer P. N. // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 193508.
2. Borodin E. N., Mayer A. E. // *Phys. Solid State.* – 2012. – V. 54. – P. 808–815.
3. Yanilkin A. V., Krasnikov V. S., Kuksin A. Yu., Mayer A. E. // *Int. J. Plast.* – 2014. – V. 55. – P. 94–107.
4. Meshcheryakov Yu.I., Divakov A. K., Zhigacheva N. I., Makarevich I. P., Barakhtin B. K. // *Phys. Rev. B.* – 2008. – V. 78. – P. 064301.

4-40

## ДУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА

П. Н. Майер, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет, Челябинск,  
Россия

E-mail: polina.nik@mail.ru

В настоящее время задача динамического разрушения металлов в жидком состоянии решается в основном методом молекулярной динамики, однако промоделировать реальные условия эксперимента можно на основе подходов механики сплошной среды. В докладе представлена двумерная математическая модель динамического разрушения металла в жидкой фазе, которая позволяет описать воздействие на металл узкосфокусированного электронного пучка. В условиях интенсивного воздействия в металле происходят различные динамические процессы: распространение волн сжатия и разрежения, плавление, разрушение расплава посредством кавитации, эволюция двухфазного состояния жидкость-пар, фрагментация расплава на капли.

При описании процесса эволюции металла под действием интенсивного электронного облучения выделены четыре стадии эволюции: 1) однофазное конденсированное состояние, 2) жидкий металл с кавитационными пузырьками, 3) пар металла с каплями и 4) чистый пар. В модели используются подходы механики гетерогенной сплошной среды, считается, что в каждом элементарном объеме среды одновременно присутствуют разные фазы. Определены уравнения кинетики фазовых переходов: рассмотрено изменение объема дисперсной и несущей фаз, изменение количества дисперсных частиц; описан обмен массой между фазами за счет фазовых переходов и теплообмен между фазами. Приведена модель перколяционного перехода для описания стадии фрагментации жидкого металла на капли. Модель верифицирована по известным экспериментальным данным и результатам молекулярно-динамического моделирования.

Исследованы прочностные свойства расплавов в зависимости от скорости деформации растяжения и температуры. С увеличением скорости деформации откольная прочность жидкого металла увеличивается. Увеличение температуры, наоборот, приводит к понижению откольной прочности. Повышение температуры расплава до величины порядка критической приводит к тому, что жидкий металл начинает разрушаться при значениях отрицательного давления, близких к нулю. Наоборот, чем ниже температура, тем большие отрицательные давления могут достигаться в жидком металле при его растяжении до начала разрушения.

Работа поддержана РФФИ (№ 14-01-31454) и грантом Президента РФ (МД-286.2014.1).

**TWO-DIMENSIONAL MODEL OF THE DYNAMIC  
FRACTURE OF LIQUID METAL  
UNDER THE ACTION OF INTENSIVE ELECTRON  
IRRADIATION AND THE METAL MELTS  
STRENGTH**

P. N. Mayer, A. E. Mayer

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: polina.nik@mail.ru

The problem of the dynamic fracture of liquid metals is solved by means of the molecular dynamics (MD) simulations most often at present, while the continuum mechanics approach allows to simulate more real experimental conditions in the sense of strain rates and spatial scale. Here we present a two-dimensional mathematical model of the dynamic fracture, which allows to describe the action of a narrow-focused electron beam on the metal. A number of dynamical processes take place in metal under intensive action: propagation of compression and release waves, melting, fracture due to cavitation, evolution of the liquid-vapor two-phase medium, fragmentation of melt on drops.

Next four stages can be separated out in the metal evolution under the intensive electron irradiation: 1) one-phase condensed state, 2) liquid metal with cavities, 3) metal vapor with drops and 4) pure vapor. The model uses approach of the heterogeneous medium mechanics; it supposes that any physically small medium element simultaneously contains various phases (liquid and vapor, for example). The kinetics equations of phase transitions are defined and the next processes are considered: the volume exchange between the dispersed phase and the carrying agent, the number change of the dispersed particles, the mass exchange and the heat exchange. The percolation transition is described. The proposed model is verified by means of available experimental and MD data.

Strength of metal melts is investigated subject to the strain rate and temperature. The strain rate increase leads to the strength decrease. The temperature increase, contrarily, leads to the strength decrease. The fracture can take place at almost zero tensile stresses (negative pressure) if the temperatures is close to the critical temperature. The lower the temperature, the higher the available levels of negative pressure.

This work is supported by RFBR (No. 14-01-31454) and grant of RF President (№ MD-286.2014).

4-41

**ГЕТЕРОГЕННОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ  
МЕТАЛЛОВ ПРИ СХОЖДЕНИИ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ  
МАЛОГО ДИАМЕТРА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
УДАРНЫХ ВОЛН**

А. Н. Малышев, Д. Н. Замотаев, О. Н. Игнатова,  
О. А. Тюпанова, М. И. Ткаченко, Э. Г. Шепелев,  
А. М. Подурец, А. Н. Баландина, И. Н. Кондрохина

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

Конструкционные металлы в процессе высокоскоростного деформирования претерпевают различные виды нагрузок, следствием которых являются разнообразные структурные изменения, и, в частности, вариация механических свойств.

Одним из таких сложных структурных изменений является процесс образования гетерогенных полос локализованного сдвига (ПЛС) двойниковой природы и связанное с ним временное снижение динамической прочности в сильных ударных волнах [1–4]. Исследования в этой области, сделанные ранее, указывают на то, что процесс образования ПЛС носит пороговый характер и основным критерием является давление. Так в работе [3] показано, что в крупнокристаллической меди, образование ПЛС происходит после воздействия ударной волны амплитудой  $\sigma_x \sim 28\text{--}30$  ГПа.

В данной работе в рамках исследования схождения цилиндрических каналов малого диаметра под действием плоских ударных волн [5] показано, что при достаточно низком уровне нагружения (до 10 ГПа) в металлах могут образовываться ПЛС, и течение перестает быть гомогенным. В этом случае основным фактором, отвечающим за гетерогенное деформирование, является уровень пластической деформации и ее скорость.

Приведены результаты экспериментальных и металлографических исследований для ряда металлов – медь с различным размером зерна, тантал, обедненный уран и титановый сплав ВТ 16. Обсуждаются особенности процесса деформирования, сделаны оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС).

**Литература**

1. Calculation of thermal trapping in shock deformation of aluminum. J. Appl. Phys. Grady D., Asay J. Vol. 53. # 11. 1982. Pp. 7350–7354.
2. Calculation of thermal trapping in shear bands. Metallurgical application of shock wave and high-strain phenomena. New York and Basel. Swegle J. W. and Grady D. E. 1986. Pp. 705–722.
3. Двойниковые структуры в меди после ударного и безударного высокоскоростного нагружения. А. М. Подурец, В. А. Раевский, В. Г. Ханжин, А. И. Лебедев, О. Н. Априлов, В. В. Игонин, И. Н. Кондрохина, А. Н. Баландина, М. И. Ткаченко, Ж. Ж. Пети, М. Э. Зохер. ФГВ, 2011, т. 47, № 5, с. 123–131.
4. Microstructure and mechanical properties of metals and alloys after loading by shock waves. Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals. Edited by Marc A. Meyers and Lawrence E. Murr. Moscow, «Metallurgiya». Murr L. E. 1984. P. 202.
5. Метод исследования особенностей высокоскоростного деформирования металлов на микро- и мезо- масштабных

уровнях. Физическая мезомеханика. Игнатова О. Н., Малышев А. Н., Надежин С. С. и др. Том 13. № 3. Май-июнь 2010. С. 61–68.

### HETEROGENEOUS DEFORMATION OF METALS AT CONVERGENCE OF CYLINDRICAL APERTURES HAVING SMALL DIAMETERS UNDER EFFECT OF SHOCK WAVES

A. N. Malyshev, D. N. Zamotaev, O. N. Ignatova,  
M. I. Tkachenko, E. G. Shepelev, A. M. Podurets,  
A. N. Balandina, I. N. Kondrokhina

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

Structural metals undergo loadings of various types during high-velocity deformation. As a result, there are different structural changes and, in particular, varying of mechanical properties.

One of these complex structural changes is the process of formation of heterogeneous localized shear bands (LSB) of the twinning nature and the associated temporal decrease of dynamic strength in strong shock waves [1–4]. The earlier investigations in this area point to the fact that the process of LSB formation has the threshold character, and pressure is the main criterion. So, it is shown in work [3] that LSB formation occurs in coarse-grain copper after effect of shock wave with the amplitude  $\sigma_{\chi} \sim 28\text{--}30$  GPa.

In this work, within the investigation of convergence of cylindrical channels having small diameters under effect of planar shock waves [5], it is shown that LSB can be formed in metals, and flow stops being homogeneous at rather low loading level (up to 10 GPa). In this case, the level of plastic strain and its rate are the main factors, which are responsible for heterogeneous deformation.

The authors present results of experimental and metallographic researches for some metals, which are copper with various grain sizes, tantalum, depleted uranium, and titanium alloy VT16. Peculiarities of deformation process are discussed; parameters of stress-strain state (SSS) are estimated.

#### References

1. D. Grady, J. Asay. Calculation of thermal trapping in shock deformation of aluminum // *J. Appl. Phys.*, 1982, vol. 53, # 11, pp. 7350–7354.
2. J. W. Swegle and D. E. Grady. Calculation of thermal trapping in shear bands // *Metallurgical application of shock wave and high-strain phenomena*. New York and Basel, 1986, pp. 705–722.
3. A. M. Podurets, V. A. Raevsky, V. G. Khanzhin, A. I. Lebedev, O. N. Aprelkov, V. V. Igonin, I. N. Kondrokhina, A. N. Balandina, M. I. Tkachenko, J. J. Petit, M. A. Zocher. Twinning structures in copper after shock and shockless high-velocity loading // *FGV*, 2011, v. 47, # 5, p. 123–131.
4. L. E. Murr. Microstructure and mechanical properties of metals and alloys after loading by shock waves // *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*. Edited by Marc A. Meyers and Lawrence E. Murr. Moscow, «Metallurgiya», 1984, p. 202.
5. O. N. Ignatova, A. N. Malyshev, S. S. Nadezhin et al. Method for investigation of peculiarities of high-velocity deformation of metals at micro- and meso-scale levels // *Physical mesomechanics*. May-June 2010, value 13, # 3, p. 61–68.

4-42

### ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УДАР УДАРНИКОМ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ

Л. А. Мержиевский, А. А. Васильев,  
А. В. Виноградов, В. И. Лаптев

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

Высокоскоростные ударники находят широкое применение в физике высоких давлений для достижения экстремальных параметров состояния исследуемых веществ и исследования процессов взаимодействия компактных и удлиненных тел с различными преградами. В первом случае используются ударники в форме пластин, создающие в исследуемом материале мишени плоские ударные волны. Во втором предметом исследования являются особенности формирования кратеров в «полубесконечных» преградах, механизмы предельного пробивания и разрушения ударников при взаимодействии с тонкими экранами.

В данной работе приводятся и обсуждаются результаты экспериментов по высокоскоростному удару стального ударника кольцевой формы по плоской стальной пластине. В этом случае в мишени формируется система интерферирующих ударных волн и волн разрежения. В итоге на передней стороне мишени остается кольцевой кратер, а на тыльной стороне фиксируется откол материала в виде сплошного квазидиска с диаметром, почти вдвое превышающем внешний диаметр кольцевого ударника. Рассматриваются особенности деформирования и разрушения мишени, вызванного таким воздействием. Проводится аналогия с коллективным воздействием группы тел на преграду. Детали процесса анализируются с помощью численного моделирования. Расчеты проводились с использованием пакета ANSYS.

Работа проведена при частичной поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 64.

### HYPERVELOCITY IMPACT OF RING IMPACTORS

L. A. Merzhiyevsky, A. A. Vasilyev,  
A. V. Vinogradov, V. I. Laptev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics Siberian Branch of the  
RAS, Novosibirsk, Russia

Hypervelocity impactors find wide application in physics of high pressures for achievement of extreme parameters of a state of studied substances and investigation of processes of interaction of the compact bodies and rods with various targets. In the first case impactors in the form of the plates, creating in an investigated material flat shock waves are used. In the second an object of research are features of formation of craters in “semi-infinite” targets, ballistic limit and destruction of impactors at interaction with thin screens.

In this work results of experiments of hypervelocity impact of the steel projectiles of a ring form on a flat steel plate are presented and discussed. In this case in a target the

system of interfering shock waves and unloading waves is formed. As a result of impact on the face surface of a target there is a ring crater, and on the back surface the material splitting off in the form of a disk with a diameter, almost twice exceeding the external diameter of the ring impactor is fixed. Features of deformation and the destruction of a target caused by such influence are considered. An analogy to collective influence of group of bodies on a target is drawn. Details of process are analyzed by means of numerical modeling. Calculations were carried out with ANSYS package use.

Work was supported by the Integration project of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science No. 64.

4-43

### УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАТИНЫ

В. М. Елькин, В. Н. Михайлов, Т. Ю. Михайлова

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

E-mail: v.m.elkin@vniitf.ru

Построено двухфазное уравнение состояния (твердая фаза, жидкость) с учетом испарения (конденсации). Жидкость и пар описаны одним уравнением состояния, по которому рассчитаны кривые насыщенного пара и параметры критической точки. Уравнение состояния жидкости эффективным образом учитывает ионизацию вещества, и в пределе высоких температур, соответствует полностью ионизированному идеальному газу. Холодные составляющие давления при сверхвысоком сжатии предусматривают предельный переход к модели атома Томаса-Ферми. Параметры уравнений состояния подобраны из условия оптимального описания данных статических и динамических экспериментов и теоретических расчетов по ТФПК.

### AN EQUATION OF STATE FOR PLATINUM

V. M. Elkin, V. N. Mikhaylov, T. Yu. Mikhaylova

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

E-mail: v.m.elkin@vniitf.ru

A two-phase (solid-liquid) equation of state with evaporation (condensation) is constructed. Liquid and vapor are described by a single equation of state which is used to calculate curves for saturated vapor and the critical point. The equation of state for liquid effectively describes material ionization and corresponds to completely ionized ideal gas in the high temperature limit. Under ultrahigh compression the cold pressure components provide for transition to the Thomas-Fermi model in the limit. EOS parameters are chosen to be such as to allow optimal fit to experimental shock Hugoniot and thermodynamic data, and theoretical predictions by the Thomas-Fermi model with Kopyshv corrections.

4-44

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОТОННОГО МИКРОСКОПА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

К. Л. Михайлюков, И. В. Храмов,  
С. В. Потапов, Н. В. Фролова

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

Описан принцип работы протонной радиографической установки, работающей с увеличением (протонного микроскопа). В настоящее время протонные микроскопы применяются в США, где используются для изучения свойств веществ при больших нагрузках (уравнения состояния, фазовые переходы, образование полостей и т. д.), изучения свойств ВВ, томографии топливных стержней и других объектов (контроль производства и изменение эксплуатационных характеристик в процессе старения), изучения физики плазмы и т. д. Энергия протонов в данных установках равна 800 МэВ, что не позволяет исследовать объекты с толщинами в несколько десятков г/см<sup>2</sup> во взрывозащитной камере с приемлемой точностью. Интерес к микроскопии проявляют и китайские исследователи.

В настоящей работе исследуется протонный микроскоп с использованием высокоэнергетичных (50–70 ГэВ) протонов ускорителя У-70 (ИФВЭ, Протвино). Представлены смоделированные протонные изображения некоторых объектов с микроструктурой. Проведен анализ разрешающей способности микроскопа и сделаны выводы о возможности его применения.

### STUDY OF THE PROTON MICROSCOPE POTENTIAL WHEN REGISTERING DYNAMIC PROCESSES

K. L. Mikhailukov, I. V. Khramov,  
S. V. Potapov, N. V. Frolova

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

Operation principle of the proton radiographic facility that has a magnifying effect (a proton microscope) is described. Currently, proton microscopes are used in the USA to study the properties of substances under high loading (the equations of state, phase transitions, cavity formation etc.), to study the properties of the explosives, to do the tomography of fuel slugs and other objects (production control and changes in the operational parameters in the process of aging), to do the studies of plasma physics etc. The energy of protons in these facilities is 800 MeV, and that does not allow investigating the objects with thicknesses of several dozens of g/cm<sup>2</sup> in an explosion protection chamber with an acceptable accuracy. Chinese researchers also show their interest to the microscopy.

A proton microscope with high-energy protons (50–70 GeV) of U-70 accelerator (IHEP, Protvino) is investigated in the present work. Some simulated proton images

of some objects with their microstructure are shown. Resolution of the microscope is analyzed and some conclusions on its potential implementation are made.

---

4-45

**«IN-SITU» ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ  
И МНОГОМАСШТАБНАЯ КИНЕТИКА  
РАЗВИТИЯ РАЗРУШЕНИЯ  
ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ НАГРУЗКАХ**

О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

E-mail: naimark@icmm.ru

Исследование развития разрушения в широком диапазоне интенсивностей нагружения предполагает использование «in-situ» экспериментальной методологии в сочетании с подходами многомасштабного моделирования и возможностью измерения переменных на широком спектре пространственно-временных масштабов, характеризующих стадийность процессов локализации разрушения. При этом регистрация статистических закономерностей развития разрушения является определяющей для понимания детерминированных и стохастических механизмов процесса разрушения, определяемого многомасштабной динамикой коллективных мод поврежденности. Использование данных in-situ экспериментов позволяет верификацию многомасштабных моделей, устанавливающих связь стадийности развития разрушения с коллективными свойствами ансамблей дефектов [1–3]. Данные «in-situ» оригинальных экспериментов были использованы для обоснования многомасштабных моделей разрушения в широком диапазоне интенсивностей нагружения: нелинейная динамика трещин (регистрация фазовых портретов напряжений в вершине трещины) в предварительно нагруженной пластине ПММА – переходы от устойчивого к режиму с ветвлением и последующей фрагментации; инициирование и распространение «волн разрушения» (регистрация волновых фронтов напряжений и «волн разрушения») в цилиндрических образцах плавленого кварца в условиях теста Тейлора; кинетика множественного откола (регистрация зависимости времени разрушения от амплитуды импульса) при переходе к режиму «динамической ветви» в цилиндрических образцах ПММА и керамик (ультрафарфор); кинетика фрагментации (по данным фрактолюминесценции) при динамическом нагружении плавленого кварца и керамик. Показано, что динамические режимы ветвления трещин, инициирование и распространение волн разрушения, многоочаговый характер множественного откола, универсальность статистики фрагментации связаны с возбуждением коллективных мод дефектов – диссипативных структур обострения, определяющих «класс универсальности» многомасштабной динамики развития разрушения в условиях специального типа критических явлений для твердых тел с дефектами – структурно-скейлинговыми переходами. Обсуждаются феноменологические модели, отражающие многомас-

штабную динамику процессов разрушения при интенсивных нагрузках.

**Литература**

1. Naimark O. 2003, *Advances in Multifield Theories for Continua with substructure*, edited by G. Capriz and P. Mariano, 75–115. Boston: Birkhauser.
2. Naimark O. B., Uvarov S. V. 2004, *International Journal of Fracture*, v. 128, n. 1: 285–292.
3. Davydova M. M., Uvarov S. V., and Naimark O. B. 2014, *Physical Mesomechanics*, v. 17. – n. 1. 129–136.

**DYNAMIC EXPERIMENT “IN SITU”  
AND MULTI-SCALE KINETICS OF DAMAGE  
EVOLUTION AT INTENSE LOADS**

O. B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics UrB RAS, Perm,  
Russia

E-mail: naimark@icmm.ru

Research of damage evolution in wide range of loading intensities assumes application of “in situ” experimental methodology together with multi-scale simulation approach and variables measurement in a wide range of special-temporal scales characterizing stages of damage localization processes. Thus observation and recording of statistical regularities of damage evolution regularities is defining for understanding of determined and stochastic mechanisms of damage process, governed by multi-scale dynamics of collective modes of damage. Utilization of experimental in situ data allows verification of multi-scale models establishing interrelationship between staged nature of damage evolution with collective properties of defects ensembles [1–3]. The following data of original “in situ” experiments were used for substantiation of multi-scale damage intensities: non-linear dynamics of cracks (recording of stresses phase patterns in crack tip) in ultimately loaded PMMA plate with transition from steady state to bifurcation and subsequent fragmentation; initiation and propagation of ‘damage waves’ (recording of stress wave fronts and ‘damage waves’) in cylindrical samples of molten quartz in Taylor test; kinetics of multiple spall (recording of failure time dependence versus impact amplitude) at transition to ‘dynamic branch’ mode in cylindrical PMMA and ceramic (ultraporcelain) samples; kinetics of fragmentation (following fractoluminescence data) at dynamic loading of molten quartz and ceramics. It has been demonstrated that dynamic modes of cracks bifurcation, initiation and propagation of damage waves, multi-hotspot nature of multiple spall, universal nature of fragmentation statistics are associated with excitation of collective modes of defects being dissipative structures of sharpening, defining “class of universality” of multi-scale dynamics of damage evolution in conditions of special type of critical phenomena for solids with defects or structure-scale transitions. Phenomenological models describing multi-scale dynamics of failure processes at intensive loads are discussed in presentation.

**References**

1. Naimark O. 2003, *Advances in Multifield Theories for Continua with substructure*, edited by G. Capriz and P. Mariano, 75–115. Boston: Birkhauser.



2. Naimark O. B., Uvarov S. V. 2004, International Journal of Fracture, v. 128, n. 1: 285–292.  
 3. Davydova M. M., Uvarov S. V., and Naimark O. B. 2014, Physical Mesomechanics, v. 17. n. 1. 129–136.

4-46

**КОМПЛЕКСНОЕ  
ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ  
ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЗРЫВНОМ  
НАГРУЖЕНИИ**

М. Ю. Орлов, Ю. Н. Орлов, А. Н. Садохин

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, Томск, Россия  
ООО «КузбассСпецВзрыв»

Актуальность исследований поведения различных природных материалов (известняк, гранит, лед, горные породы и др.) при взрывном нагружении в настоящее время не вызывает сомнений. Проведение таких исследований необходимо, прежде всего, для увеличения добычи природных ископаемых в различных климатических зонах.

В настоящей работе проведено теоретико-экспериментальное исследование поведения известняка при взрывном нагружении.

Описание поведения материалов проводится с позиций феноменологической макроскопической теории механики сплошных сред на основе фундаментальных законов сохранения. Рассматриваемая среда являлась изотропной, упруго-пластической, пористой, сжимаемой, учитывающая свойства прочности, ударно-волновые явления, а также совместное образование отрывных и сдвиговых разрушений. Уравнение состояния продуктов детонации описывается в виде политропы Ландау-Станюковича [1].

В качестве основного инструмента исследований был выбран численный лагранжев метод, расчетная часть которого была дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. В процессе счета допускалось появление новых свободных поверхностей, в том числе разделяющих взаимодействующие тела на отдельные фрагменты [2].

Проведен физический эксперимент объектом исследования в котором выбран известняк. Реализованы физические эксперименты на территории одного из карьеров Томской области. Глубина закладки взрывчатого вещества (ВВ) достигала 500 см, а его масса варьировалась от 4 до 65 кг. В качестве ВВ использовался Эмуласт Ас-ФП-90. Было изучено влияние глубины закладки на процесс образование взрывного кратера.

Полученные результаты позволили сформулировать рекомендации по более эффективному разрушению массивов известняка при определенных условиях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 13-08-00296 А, 13-08-00509 А.

**Литература**

1. Глазырин В. П., Орлов Ю. Н., Орлов М. Ю. Разрушение льда при ударном и взрывном нагружении // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, – Ч. 1, Спец. Выпуск. – С. 425–432.  
 2. Орлов Ю. Н., Глазырин В. П., Орлов М. Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010610911 от 28.01.2010 «Удар-ОС1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметричная задача».

**INTEGRATED  
THEORETICAL-AND-EXPERIMENTAL STUDY OF  
NATURAL MATERIALS BEHAVIOR  
UNDER EXPLOSIVE LOADING**

M. Yu. Orlov, Yu. N. Orlov, A. N. Sadokhin

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia  
LLC “KuzbassSpetsVzryv”

No one is arguing the urgency of studying the behavior of various natural materials (limestone, granite, ice, rock, etc.) under explosive loading. These studies are essential to increase minerals extraction in various climatic zones.

This paper is focused on the theoretical and experimental study of the limestone behavior under explosive loading.

The material behavior is described in terms of the phenomenological macroscopic theory of continuum mechanics based on the fundamental laws of conservation. The medium under consideration appears to be isotropic, elasto-plastic, porous, and compressible; strength features, shock-wave phenomena, and co-formation of tear-off and shear fractures are taken into account. Equation of state of the detonation products is described by the Landau-Stanyukovich polytrope [1].

In these studies, the main tool was the numerical Lagrange method wherein calculations were supplemented by mechanisms of construction units splitting and construction elements destruction. New free surfaces were assumed to appear including those that split interacting bodies into separate fragments [2].

Limestone served as a test object in physical experiments conducted in an open pit of Tomsk region. The depth of the explosive material planting reached 500 cm and its mass varied from 4 to 65 kg. Emulast Ac-FP-90 was used as the explosive material. The influence of the explosive loading planting on the explosive cratering was studied.

Obtained results helped to formulate recommendations on more effective destruction of limestone massif under certain conditions.

The work was done with the support of the Russian Foundation for Basic Research 13-08-00296 А, 13-08-00509 А.

**References**

1. V. P. Glazyrin, Yu. N. Orlov, M. Yu. Orlov, Destruction of ice under shock and explosive loading // Computational technologies. – 2008. – V. 13, – P. 1, Special Edition. – p. 425–432.  
 2. Y. N. Orlov, V. P. Glazyrin, M. Yu. Orlov, State registration certificate for computer code #2010610911, 28.01.2010 «Udar-OS1. Shock-wave loading of constructions. Axially symmetric problem».

4-47

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
Al-Mg СПЛАВОВ МЕТОДОМ  
ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО  
ПРЕССОВАНИЯ**

А. Н. Петрова<sup>1</sup>, И. Г. Бродова<sup>1</sup>, В. В. Астафьев<sup>1</sup>,  
Е. В. Шорохов<sup>2</sup>, А. А. Гранский<sup>2</sup>,  
А. П. Насонов<sup>2</sup>, К. В. Гаан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

E-mail: petrovanastya@yahoo.com

В предыдущих работах авторов показано, что динамическое канально-угловое прессование (ДКУП) является перспективной технологией получения субмикрористаллического состояния в Al-Mn и Al-Zn-Mg-Cu сплавах. Данная работа посвящена изучению возможности измельчения структуры в Al-Mg сплавах, имеющих широкое применение в аэрокосмической технике.

Образцы получены по поршневого схеме ДКУП в интервале начальных скоростей их движения через каналы  $V = 100\text{--}250$  м/с. при комнатной температуре. Исходными образцами служили горячекатаные прутки диаметром 14–16 мм с рекристаллизованной структурой. Структурные исследования деформированных образцов выполнены с использованием световой оптики и электронной микроскопии. Установлена трансформация структурных и фазовых превращений в зависимости от скорости и числа циклов прессования. Показано, что в алюминиевых сплавах с магнием уже после одного цикла ДКУП формируется фрагментированная ультрамикрористаллическая структура, зерна – субзерна в которой разделены малоугловыми и неравновесными большеугловыми границами. По данным просвечивающей электронной микроскопии с ростом числа циклов до двух размер кристаллитов меняется незначительно и составляет для сплавов этой системы 400–500 нм. По изменению твердости установлено влияние скорости на равномерность формирования структуры по длине и диаметру образцов, т. е. вдоль и поперек направления прокатки. Подробно рассмотрено влияние ДКУП на развитие фазовых превращений в алюминиевых сплавах, неупрочняемых термической обработкой. Обнаружено, что, несмотря на кратковременность воздействия полей напряжений, инициированных комбинированной интенсивной пластической деформацией простым сдвигом и ударной волной, наблюдается незначительное изменение фазового состава. Причиной этому является наблюдаемое при ДКУП изменение размеров и количества интерметаллических фаз, регулируемое такими процессами, как динамическое растворение или динамическое деформационное старение. Полученные результаты сопоставлены с данными по деформационному поведению Al-Mg сплавов в условиях горячего прессования.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований

Президиума РАН (проект № 12-П-2-1009) и гранта РФФИ для молодых ученых № 14-02-31341.

**STRUCTURAL MODIFICATION IN AL-MG ALLOY  
BY DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING**

A. N. Petrova<sup>1</sup>, I. G. Brodova<sup>1</sup>, V. V. Astafiev<sup>1</sup>,  
E. V. Shorokhov<sup>2</sup>, A. A. Granskiy<sup>2</sup>,  
A. P. Nasonov<sup>2</sup>, K. V. Gaan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metal Physics, Ural Division, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

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

E-mail: petrovanastya@yahoo.com

In the previous papers of the authors it was shown that the dynamic channel-angular pressing (DCAP) is the efficient technique for submicro-crystalline structural state formation in Al-Mn and Al-Zn-Mg-Cu alloys. The present report gives up to a possibility of grain refinement in Al-Mg alloys having various applications in aerospace engineering.

The samples investigated were produced by piston DCAP technique at the initial velocity range  $V = 100\text{--}250$  ms<sup>-1</sup> at room temperature. The initial state of the alloys was after hot pressing. The 14–16 mm diameter billets had recrystallized structure. Structural investigations were performed by light and electron microscopy. Structural and phase transformations were established conditionally on strain-rate and accumulated strain (the number of DCAP cycles). It is shown that in the Al-Mg alloy ultramicrocrystalline structure forms already after first cycle of DCAP. According to TEM data grains and subgrains are divided by low-angle and high-angle nonequilibrium boundaries, the average grain size is 400–500 nm. The grain size for these alloys faintly depends on numbers of pressing cycles. Hardness measurements allowed determining the influence of the strain rate on structural uniformity along and across the samples. The influence of high strain-rate shear deformation by DCAP on phase transformations in non thermally hardening aluminum alloys is considered in detail.

The work was supported in part by the Program of the Presidium of The Russian Academy of Sciences (project number 12-П-1009-2) and by RFBR, Young scientists' research project №14-02-31341.

4-48

### IN SITU ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГО-СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И МИКРОСТРУКТУРА ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НА ИХ ОСНОВЕ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

В. П. Пилюгин<sup>1</sup>, Б. А. Гринберг<sup>1</sup>, Т. П. Толмачёв<sup>1</sup>,  
Т. М. Гапонцева<sup>1</sup>, Ю. В. Соловьёва<sup>2</sup>, А. И. Анчаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Томская государственная архитектурно-строительная академия, Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: pilyugin@imp.uran.ru

Выполнены измерения напряжения сопротивления деформации сдвигу (скручивания) под высоким давлением ряда *d*-переходных металлов и их сплавов при интенсивной пластической деформации в камере Бриджмена. Различным стадиям пластической деформации от ее малых степеней до степеней развитой фрагментации и итогового формирования наноструктурного диссипативного состояния сопоставлены данные по структурным исследованиям. Экспериментальная методика позволяет проводить измерения в диапазоне давлений от физического предела текучести металлов до 20,0 ГПа, при температурах 78–900 К, и степенях деформации от начальных микропластических до мегапластических. Верхняя величина давления определяется твердостью и прочностью на сжатие материала наковален, для их изготовления применяли сверхтвердые материалы: ВК-6, с-NB, искусственные и натуральные алмазы.

Исследован ряд *d*-переходных чистых однофазных металлов и сплавов на их основе Cu, Ni, Nb, Mo, W, Re, Ir металлов и сплавов, испытывающих барические фазовые превращения Co, Fe, Ti, Zr и сплавов, испытывающих превращения, вызываемые деформацией Ni<sub>3</sub>Ge и NiMn сплавов по типу упорядочение – разупорядочение. Изучена эволюция структурно-фазового состава металлов и сплавов в зависимости от величины давления, температуры и степени деформации от малых до мегапластических. Для изучения структурных изменений на различных масштабных уровнях применялись различные методы: рентгеноструктурный анализ, в том числе в синхротронном излучении, просвечивающая электронная микроскопия, сканирующая электронная микроскопия. Установлены закономерности фрагментации структуры от величины деформации, определяемые подвижностью дислокаций в металлах и сплавах. В металлах с низкой подвижностью дислокаций, в начальных стадиях деформации образуются структуры полосового типа с последующей их фрагментацией. В металлах с высокой подвижностью дислокаций образуется ячеистая дислокационная структура с последующей ее трансформацией в нанокристаллическое состояние. Изучена эволюция структурных изменений и разупорядочения сплавов NiMn и Ni<sub>3</sub>Ge при холодной и криодеформации под давлением. Снижение температуры до 78 К существенно замедляет процессы фраг-

ментации, и фазового превращения «упорядочение – разупорядочение» по сравнению с деформационной обработкой при комнатной температуре.

Измерение механического сопротивления деформации металлов от величины давления и степени деформации отражает стадийность структурно-фазовых превращений материалов. На начальных деформациях происходит сильное деформационное упрочнение по линейно зависимости, которое в дальнейшем замедляется и функция «напряжение – деформация» приобретает вид функции обратной параболы. По мере того, как система выходит на динамическое равновесие образования и исчезновения дефектов происходит и установление и механического равновесия, когда упрочнение, обусловленное фрагментацией структуры уравнивается динамической рекристаллизацией и кривая  $\sigma - \epsilon$  выходит на насыщение, что отвечает полной диссипации подводимой извне энергии.

### IN SITU MEASUREMENTS OF ENERGY-POWER PARAMETERS AND MICROSTRUCTURE OF TRANSITION METALS AND ALLOYS AT SEVERE DEFORMATIONS UNDER PRESSURE

V. P. Pilyugin<sup>1</sup>, B. A. Grinberg<sup>1</sup>, T. P. Tolmachev<sup>1</sup>,  
T. M. Gapontseva<sup>1</sup>, J. V. Solovieva<sup>2</sup>, A. I. Ancharov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IMP UD of the RAS, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SD of the RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: pilyugin@imp.uran.ru

Shear stress vs. strain measurements of *d*-transition metals and alloys processed by severe plastic deformation using Bridgman anvils were performed. The applied deformation was ranged from low strains of developed fragmentation structure and final dissipative nanostructured condition. The different stages of the plastic deformation were compared to data of microstructure observation. The experimental technique allows to perform measurements from physical yield strength to 20.0 GPa, at temperatures 78–900 K and strains from starting micro-plastic to severe values. The maximum value of pressure is determined by hardness and strength of anvils, made of superhard materials: WC-6, n-NB, synthetic and natural diamonds.

The series of *d*-transitional metals and alloys: Cu, Ni, Nb, Mo, W, Re, Ir; metals and alloys displaying phase transitions under pressure: Co, Fe, Ti, Zr and Ni<sub>3</sub>Ge, NiMn alloys displaying «order – disorder» type of transformations due to deformation were investigated. Evolution of structure-phase composition of metals and alloys vs. pressure, temperature and strain up to severe values was studied. X-ray analysis including using of synchrotron radiation beam, transmission and scanning electron microscopy were applied to study changes of structure in different scales. Types of fragmentation of structure vs. strain determined by dislocation mobility were established. So, banded structure with following fragmentation of one forms at the beginning stages of deformation in metals of low dislocation mobility. In contrast, dislocation cell structure with following transformation into nanocrystalline structure forms

in metals of high dislocation mobility. Then, evolution of structure changes and disordering of NiMn and Ni<sub>3</sub>Ge at cold and cryogenic deformation under pressure was studied. So, temperature reduction up to 78 K retards fragmentation processes and «order – disorder» phase transformation significantly as compared to room temperature processing. The measuring of mechanical resistance to deformation of metals vs. pressure and strain displays stages of structural and phase transformations of materials. At the beginning stage of deformation there is a linear gross strain-hardening which slows down in following and function becomes similar to a reverse parabola. When processes of generation and disappearance of defects in system become dynamical equilibrium, there is establishing of mechanical equilibrium, i.e. hardening due to fragmentation of structure become balanced by dynamical recrystallization and  $\sigma - \varepsilon$  curve becomes saturated which is responsible to complete dissipation of input energy.

4-49

### ЗОНЫ РИСКА ДЛЯ СТЕНКИ КОКСОВОЙ КАМЕРЫ, ПОЛУЧЕННОЙ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

А. В. Плотников, А. М. Пацелов, Б. А. Гринберг

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: alexx\_2002@inbox.ru

Исследуемые в настоящей работе стенки коксовой камеры были изготовлены из двухслойного композита. Для внутренней оболочки камеры использовалась хромистая сталь 08X13, которая является коррозионно-стойкой и жаростойкой (вплоть до 750–800 °C), а для наружной оболочки – низколегированная малоуглеродистая сталь 12ХМ. Композит получен сваркой взрывом на Уральском заводе химического машиностроения. Использовались следующие экспериментальные методы: сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, металлографический анализ и измерения микротвердости.

В результате проведенных исследований было обнаружено, что переходная зона сварного соединения сталь 08X13 – сталь 12ХМ состоит из слоев, отличающихся по химическому и фазовому составу. Последовательность слоев: 1 – рекристаллизованная область стали 12ХМ; 2 – зона локального расплавления стали 12ХМ; 3 – зона стержневидных карбидов стали 08X13; 4 – зона хаотически распределенных карбидов стали 08X13; 5 – рекристаллизованная область стали 08X13. Показано, что из-за разности коэффициента диффузии углерода в жидкой и твердой фазах возникает его сегрегация на границе этих фаз. В зоне сегрегации концентрация углерода в несколько раз превышает концентрацию углерода в исходной хромистой стали. При этом особенности кинетики фазовых превращений могут приводить к тому, что возникают структуры, отличные от наблюдаемых в исходных равновесных сплавах. Для исследуемого соединения сталь-сталь в зоне сегрегации происходит эвтектидный распад. Эта зона содержит стержневидные карбиды и представляет собой

зону риска для оболочки камеры. Зона локального расплавления провоцирует образование зоны сегрегации, обогащенной углеродом. Из-за «плохой» структуры обе зоны – расплава и сегрегации – являются предполагаемыми зонами риска.

На основании проведенного исследования мы полагаем, что выбор режима термообработки был неудачным. Его параметры (температура, длительность) оказались именно такими, которые могут обеспечить эвтектидный распад. Для того, чтобы увеличить длительность эксплуатации камеры, необходимо изменить режим термообработки.

Исследования выполнены в Центре коллективного пользования электронной микроскопии УрО РАН. Работа выполнена в рамках проекта 12-2-2-007-АРКТИКА.

### RISK ZONE IN THE COKING CHAMBER WALL MANUFACTURED BY EXPLOSIVE WELDING

A. V. Plotnikov, A. M. Patselov, B. A. Greenberg

Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, S. Kovalevskoi st. 18, Yekaterinburg, 620990 Russia

E-mail: alexx\_2002@inbox.ru

The walls of the coking chamber being under the investigation have been made of a two-layer composite. The inner coat of the chamber has been manufactured from chrome steel 08Kh13 that is corrosion-resistant and heat-resistant (up to 750–800 °C). The outer coat has been made of low-alloyed low-carbon steel 12KhM. The composite has been prepared by explosive welding at the Ural Plant of Chemical Engineering. The following experimental techniques have been used: scanning and transmission electron microscopy, X-ray diffraction, metallographic analysis, and microhardness measurements.

It has been found from our studies that the 08Kh13 steel–12KhM steel transition zone of the welded joint consists of layers that differ in chemical and phase compositions from each other. The consequence of layers is as follows: 1 – region of the recrystallized 12KhM steel; 2 – zone of the local melting of the 12KhM steel; 3 – region containing rod-shaped carbides of the 08Kh13 steel; 4 – zone of randomly distributed carbides of the 08Kh13 steel; and 5 – region of the recrystallized 08Kh13 steel. It has been shown that due to the difference in the diffusion coefficients of carbon in the liquid and solid phases, it segregates at the boundary of these phases. In the segregation area the carbon concentration is several times higher than that in the initial chromium steel. It should be noted that specific phase transformation kinetics can result in the formation of structures which can hardly be observed in the initial equilibrium alloys. In this case of the steel–steel joint, eutectoid decomposition occurs in the segregation area. This area exhibits rod-shaped carbides, so presenting a risk zone in the chamber wall. The local melting area triggers the formation of a segregation area enriched with carbon. Both areas, the melt area and the segregation one, are potential risk zones because of their «bad» structures.

Based on this study, we do not consider the heat treatment regime chosen to be appropriate. Its parameters (temperature, duration) turned out precisely to be appropriate for eutectoid decomposition. It is necessary to change

the heat treatment regime in order to increase the service life of the chamber.

The studies were performed at the Electron Microscopy Center of Collaborative Access, Ural Branch, Russian Academy of Sciences. This work was supported by the 12-2-2-007-ARKTIKA project.

---

4-50

### О ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ В МЕТАЛЛАХ ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ СЖАТИЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А. М. Подурец, М. И. Ткаченко

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

Микроструктура при ударном нагружении металлов определяется теми же процессами, которые происходят при любой деформации, в том числе конкуренцией двух основных механизмов пластической деформации – дислокационного скольжения и двойникования. Действие того или иного механизма пластической деформации в условиях динамической нагрузки определяют обычно с помощью анализа образцов, сохраненных после нагружения.

Рентгенографическим способом была изучена плотность дислокаций  $\rho$  в сохраненных образцах меди с размером зерна 0,5–100 мкм и в тантале 0,7–60 мкм после нагружения ударными волнами амплитудой 20–100 ГПа. Подтверждено, что высокоскоростное нагружение генерирует в меди бóльшую плотность дислокаций, чем квазистатическая деформация. Во всех образцах наблюдается максимум  $\rho$  в области 40–50 ГПа (что соответствует деформации 0,25–0,3), за которым следует падение. Такое падение мы объясняем отжигом дефектов при адиабатическом нагреве в результате сжатия. Отмечается увеличение  $\rho$  в сохраненной меди с увеличением размера зерна и уменьшением температуры образца.

В тантале с увеличением давления в ударной волне зафиксирован монотонный рост плотности дислокаций до значения  $\sim 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Влияния разогрева на отжиг дефектов в тантале даже при максимальном давлении не обнаружено.

Во всех исследованных образцах изменения размеров областей когерентного рассеяния не обнаружено, измельчения зеренной и субзеренной структуры в УВ не происходит.

Сопоставление полученных результатов с проведенными ранее измерениями плотности двойников в меди и тантале показывает, что прочность зависит от наличия в структуре обоих видов дефектов.

На основании экспериментов по импульсному рентгеноструктурному анализу сделаны оценки плотности дислокаций в молибдене и алюминии во время ударно-волнового нагружения до давления 10–30 ГПа. Получены значения значительно превосходящие  $\rho$  в сохраненных образцах – на уровне  $10^{11}$ – $10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

### DISLOCATION DENSITY IN METALS DURING AND AFTER SHOCK LOADING

A. M. Podurets, M. I. Tkachenko, O. N. Ignatova,  
A. I. Lebedev, V. V. Igonin, V. A. Raevsky

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

A microstructure of metals at shock loading is determined by the same processes, which occur at any deformation including a competition of two basic mechanisms of plastic strain – dislocation slip and twinning. The action of a specified mechanism of plastic deformation under the conditions of dynamic loading is usually defined by the help of the analysis of samples recovered after loading.

The dislocation density  $\rho$  was studied using a X-ray method in recovered samples of copper with the grain size from 0.5 to 100  $\mu\text{m}$  and in recovered samples of tantalum after loading by shock waves with the amplitude from 20 to 100 GPa. It was confirmed that high speed loading generates greater dislocation density in copper compared with quasi-static deformation. The maximum  $\rho$  can be seen in all the samples in the range between 40 GPa and 50 GPa (what conforms to deformation 0.25–0.3), after which a fall follows. We can explain such a fall through annealing defects at adiabatic heating as a result of compression. The rise  $\rho$  is noted in recovered copper with increase in the grain size and with decrease in the sample's temperature.

We recorded a monotonic increase in dislocation density to the value  $\sim 3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  in tantalum with increasing a pressure in a shock wave. The influence of heating on defect annealing was not found out even at the maximum pressure. A comparison between the achieved results and the earlier measurements for twin density in copper and tantalum shows that the strength depends on the presence of defects of both kinds in the structure.

Basing on the flash X-ray experiments we made estimation of dislocation density in molybdenum and aluminum during shock loading up to pressures 10–30 GPa. The obtained values –  $10^{11}$ – $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  are significantly higher than  $\rho$  in recovered samples.

---

4-51

**МОЛЕКУЛЯРНО ДИНАМИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ,  
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРНЫХ  
ПРЕВРАЩЕНИЙ В SN И BE ПРИ ДАВЛЕНИЯХ  
ДО 300 ГПА: ЛИНИИ РАВНОВЕСИЯ,  
МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ, ГРАНИЦЫ  
ДОСТИЖИМЫХ ПЕРЕСЫЩЕНИЙ, КИНЕТИКА  
НУКЛЕАЦИИ**

С. П. Проценко<sup>1</sup>, А. О. Типеев<sup>1</sup>, В. Г. Байдаков<sup>1</sup>,  
Г. В. Ионов<sup>2</sup>, В. В. Дрёмов<sup>2</sup>, А. В. Караваев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики УО РАН, Екатеринбург, Россия

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

E-mail: sp@itp.uran.ru

Методом молекулярной динамики (МД) с использованием ЕАМ потенциала проведено моделирование жидкого и кристаллического олова. Рассчитаны внутренняя энергия и  $p$ ,  $\rho$ ,  $T$ -свойства в стабильных и метастабильных фазовых состояниях. Методом термодинамического интегрирования получена линия плавления в интервале давлений от 0 до 200 ГПа. При атмосферном давлении температура равновесного плавления  $T_m$  составила 567 К, что в пределах 12% согласуется с ее экспериментальным значением.

Методом непрерывного нагрева/охлаждения со скоростями 0,1; 0,4; 0,5; 0,8 К/пс при 13 значениях давления из интервале 0–300 ГПа в системах из 1024, 2000, 3456, 6750 атомов исследована кинетика спонтанного плавления и кристаллизации. При каждом давлении проведено от 20 до 2000 компьютерных экспериментов. Показано, что распределение событий плавления (кристаллизации) близко к распределению Гаусса. По наиболее вероятной температуре фазового перехода  $T^*$ , скорости нагрева, объему метастабильного вещества и полуширине распределения событий плавления по температуре рассчитана частота спонтанного плавления, которая составила  $10^{35}$ – $10^{36}$  с<sup>-1</sup>м<sup>-3</sup>. Частота спонтанной кристаллизации  $\sim 10^{35}$  с<sup>-1</sup>м<sup>-3</sup>.

Значения  $T^*(p)$ , отвечающие частоте  $\sim 10^{35}$  с<sup>-1</sup>м<sup>-3</sup>, приняты за границы достижимых перегревов кристаллического и переохлаждений жидкого олова. Установлено, что величина перегрева и переохлаждения  $\Delta T = |T^* - T_m|$  возрастает с ростом давления. Так при  $p = 10$  ГПа достижимый перегрев составил 105 К, достижимое переохлаждение 435 К, где  $T_m = 1039$  К при данном давлении. При  $p = 200$  ГПа ( $T_m = 3593$  К) кристалл перегревается на 420 К, а жидкость переохлаждается на 1280 К. В диапазоне давлений от 10 до 200 ГПа достижимые переохлаждения превышают перегревы 3–4 раза.

Показано, что в исследованном интервале давлений спонтанное плавление происходило в одну стадию с характерным временем разупорядочения ОЦК фазы  $\sim 10^{-10}$  с. При кристаллизации переохлажденного жидкого олова при  $p > 20$  ГПа зарегистрированы двух- и трехстадийные события скачкообразного увеличения

плотности и уменьшения потенциальной энергии при понижении температуры.

В МД модели бериллия проведены опыты по получению метастабильных кристаллических фаз на поле конкурирующей стабильной кристаллической модификации. Оценены положения границ метастабильного существования ГПУ, ГЦК и ОЦК фаз. Вследствие малой величины активационного барьера границы достижимых перегревов и переохлаждений кристаллических модификаций удалены от линий их равновесного сосуществования не более чем на 10–20 градусов.

Работа выполнена при поддержке проектов ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН 12-2-034-ЯЦ и 13-2-039-ЯЦ.

**MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION  
OF MELTING, CRYSTALLIZATION  
AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS  
IN SN AND BE AT PRESSURES UP TO 300 GPa:  
EQUILIBRIUM LINES, METASTABLE STATES,  
LIMITS OF ATTAINABLE SUPERSATURATION,  
KINETICS OF NUCLEATION**

S. P. Protsenko<sup>1</sup>, A. O. Tipeev<sup>1</sup>, V. G. Baidakov<sup>1</sup>,  
G. V. Ionov<sup>2</sup>, V. V. Dremov<sup>2</sup>, A. V. Karavaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermophysics, Ural Branch of the Russian  
Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

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

E-mail: sp@itp.uran.ru

Molecular dynamics (MD) simulation of liquid and crystalline tin with the EAM potential has been carried out. The internal energy and  $p$ ,  $\rho$ ,  $T$ -properties in stable and metastable phase states have been calculated. The thermodynamic integration method was used to determine the equilibrium melting line in the pressure range from 0 to 200 GPa. At atmospheric pressure, the temperature of the equilibrium melting  $T_m$  was 567 K, which is in agreement with its experimental value within 12%.

By continuous heating/cooling at rates of 0.1, 0.4, 0.5, 0.8 K/ps at 13 values of the pressure from the range of 0–300 GPa in systems of 1024, 2000, 3456, 6750 atoms the kinetics of spontaneous melting and crystallization was investigated. At each pressure from 20 to 2000 computer experiments were carried out. It is shown that the distribution of events of melting (crystallization) is close to the Gaussian distribution. From the most probable phase transition temperature  $T^*$ , the heating rate, the volume of metastable substance and the half-width of the temperature distribution of melting events the nucleation rate was calculated, which was  $10^{35}$ – $10^{36}$  s<sup>-1</sup>м<sup>-3</sup>. The rate of spontaneous crystallization was  $\sim 10^{35}$  s<sup>-1</sup>м<sup>-3</sup>.

The values of  $T^*(p)$  corresponding to the rate  $\sim 10^{35}$  s<sup>-1</sup>м<sup>-3</sup> were taken as the limits of attainable superheating and supercooling of crystalline and liquid tin, respectively. It has been found that the value of superheating and supercooling  $\Delta T = |T^* - T_m|$  increases with pressure. Thus, at  $p = 10$  GPa the attainable superheating  $\Delta T$  was 105 K, and the attainable supercooling was 435 K, where  $T_m = 1039$  K at a given pressure. At  $p = 200$  GPa

( $T_m = 3593$  K) a crystal is overheated by 420 K, and the liquid is supercooled by 1280 K. In the range of pressures from 10 to 200 GPa attainable supercoolings exceed superheatings 3 or 4 times.

It is shown that in the investigated range of pressures spontaneous melting occurs in a single step with a characteristic time of bcc phase disorder of  $\sim 10^{-10}$  s. During crystallization of supercooled liquid tin at  $p > 20$  GPa two- and three-stage events of increasing density and decreasing potential energy with the lowering of the temperature were registered.

In the MD model of beryllium computer experiments were carried out to obtain metastable crystalline phases on the field of a competing stable crystal modification. The locations of the boundaries of existence of metastable hcp, fcc and bcc phases have been estimated. Due to the low value of the activation barrier of structural transformation the limits of attainable superheatings and supercoolings of crystal modifications are located at no more than 10–20 degrees from their equilibrium coexistence lines.

This work was supported by projects of Oriented Fundamental Research UB RAS 12-2-034-NC and 13-2-039-NC.

тверждением этого является наблюдение комплексов, состоящих из островов разного цвета (мультифракталов). Наблюдение островов, имеющих неправильную форму, заставляет отказаться от представления о конической форме выступов. Хотя граница раздела считается плоской, но наблюдаемые выступы похожи на всплески волн. Можно предположить, что выступы служат предвестниками волнообразного рельефа, в который они превращаются в результате своей самоорганизации. Подобно тому, как Федером рассчитывалась размерность береговой линии Норвегии, была рассчитана размерность береговой линии, наблюдаемой при продольном сечении волнообразной границы сварного соединения. В этом случае фрактальный ландшафт представляет собой многочисленные протоки с изрезанными берегами и заливами (зонами локального расплавления). В свою очередь заливы содержат многочисленные острова, размерность которых также рассчитывалась.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов УрО РАН № 12-У-2-1011, 13-2-014-УТ, 12-2-2-007.

## INTRODUCTION OF FRACTALS TO DESCRIBE THE INTERFACE AFTER EXPLOSIVE WELDING

M. S. Pushkin<sup>1,2</sup>, A. V. Inozemtsev<sup>2</sup>, B. A. Greenberg<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: limon.5ddd@yandex.ru

When analyzed the transition zone in the joint produced by explosive welding, the various examples of fractals have been found: islands of different colors, multifractals, and a coastline. The formation of islands has been initiated by inhomogeneities located at the interface, namely, cusps and local melting areas. It is islands of different colors that inevitably occur during the interpenetration of dissimilar materials in the process of explosion welding. The complexes of islands of different colors, which are related with each other (multifractals), have been observed. The reasons for their formation have been studied. We have calculated the fractal dimension of the islands in the case of a plane interface and the dimension of the coastline in the case of a wavy interface. In the case of a copper–tantalum joint with a plain interface, islands that are longitudinal sections of tantalum cusps have the greatest fractal dimension ( $\approx 1.68$ ). This is explained by the greater indentation of the islands and cusp surfaces. Owing to the indentation, the cusps play the role of “wedges” by which the materials cohere with each other and this ensures their interpenetration. For the first time, the fractal analysis has allowed us to reveal the connection between two processes: flying away of particles and local melting. It is the formation of particles and their flying away that in the first place provoke local melting occurring due to friction between particles and their environment. The complexes consisting of islands of different colors (multifractals) provide support for this fact. The observation of the islands with irregular shapes brings us to give up the idea that cusps are conical-shaped. Despite the fact that the interface is considered to be plain, the observed cusps have the shapes of wave splashes. It can be assumed that cusps

4-52

## ВВЕДЕНИЕ ФРАКТАЛОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

М. С. Пушкин<sup>1,2</sup>, А. В. Иноземцев<sup>2</sup>, Б. А. Гринберг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
E-mail: limon.5ddd@yandex.ru

При анализе переходной зоны соединения, полученного сваркой взрывом, найдены различные типы фракталов: острова разного цвета, мультифракталы, береговая линия. Острова являются следствием неоднородностей поверхности раздела, таких как выступы и зоны локального расплавления. Именно острова разного цвета неизбежно возникают при взаимопроникновении разнородных материалов в процессе сварки взрывом. Обнаружены комплексы связанных друг с другом островов разного цвета (мультифракталы). Выяснены причины их возникновения. Вычислена фрактальная размерность островов для плоской границы раздела и размерность береговой линии для волнообразной границы. Для соединения медь–тантал с плоской границей наибольшую фрактальную размерность ( $\approx 1,68$ ) имеют острова, которые являются продольными сечениями выступов тантала. Это обусловлено большей изрезанностью как островов, так и самой поверхности выступов. С этим связана и особая роль выступов как «клиньев», удерживающих соединение от разрушения и обеспечивающих взаимопроникновение материалов. Фрактальный анализ впервые позволил выявить связь двух процессов: разлета частиц и локального расплавления. Именно образование и разлет частиц в первую очередь провоцируют локальное расплавление, благодаря трению между частицами и их окружением. Под-

serve as precursors of wavy relief, in which they develop as a result of their self-organization. We calculated the dimension of the coastline that was observed on the longitudinal section of the wavy interface of the welded joint, just as J. Feder calculated the dimension of the coastline of Norway. In this case, the fractal topography represents numerous channels with indented coastlines and bays (local melting areas). The bays, in turn, include numerous of the islands, whose dimensions have been calculated as well.

This work was supported by the Ural Division of the Russian Academy of Sciences, project nos. 12-U-2-1011, 13-2-014-UT, and 12-2-2-007.

4-53

**ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ  
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ  
НА ОСНОВЕ УСТАНОВЛЕННЫХ  
ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

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

Количественной характеристикой отклика системы на внешнее воздействие является обобщенная восприимчивость  $\chi$  [1]. При одинаковом значении параметра  $\chi$ , если не меняется размерность пространства, в котором протекает явление, релаксационные процессы в натурном объекте и в модели попадают в один класс универсальности и характеризуются одинаковыми критическими индексами и безразмерными соотношениями, описывающими релаксационные процессы в модели и натурном объекте.

Ранее было показано, что в металлах динамические деструктивные процессы на различных масштабно-временных уровнях носят кооперативный характер, что обусловлено фрактальной природой ансамблей диссипативных структур, возникающих при высокоинтенсивном внешнем воздействии на металлы, перколяционными переходами неравновесной системы с одного масштабно-временного уровня на другой, подчиняющихся концентрационному критерию [2, 3].

Концентрационный критерий показывает, что кинетика релаксационных процессов и ее количественные характеристики предыдущего масштабно-временного уровня формируют кинетику процессов на следующем масштабно-временном уровне.

При высокоинтенсивном воздействии на металлы в явлении динамического разрушения возникают эффекты диспергирования и предшествующие им эффекты течения кристаллической решетки и локальные области перемешивания (каскад диссипативных структур), т. е., возникают гидродинамические моды.

С помощью математического пакета программ интерактивной системы анализа изображений полу-

чены количественные характеристики диссипативных структур – безразмерные величины: фрактальная размерность  $d_f$  и показатель Херста  $H$ , которые позволяют количественно характеризовать гидродинамические течения металлов [4].

Фрактальная размерность  $d_f$  характеризует плотность гидродинамических мод в зависимости от их линейного размера, а значение  $1 < d_f < 2$  (для размерности пространства  $D = 2$ ) свидетельствует о том, что моды проявляют коррелированное (самоорганизованное) поведение.

Показатель Херста  $H$  показывает, имеет ли процесс случайный характер или предысторию (персистентный процесс). Так значение  $H > 0,5$  характеризует то состояние, при котором гидродинамические моды течения кристаллической решетки металла имеют кооперативный характер, а их возникновению предшествовали процессы, имеющие также кооперативный характер.

Полученные данные дают возможность и имеют важное значение для компьютерного прогнозирования поведения конструкционных металлов в экстремальных условиях в широких амплитудно-временных диапазонах внешнего воздействия  $t \sim 10^{-6}$ – $10^{-10}$  с,  $P \sim 0,5$ – $20$  ГПа.

#### Литература

1. Стенли Г. Фазовые переходы и критические явления. – Москва: Наука, 1973. – 419 с.
2. Р. И. Илькаев, В. Т. Пунин, А. Я. Учаев, С. А. Новиков, Е. В. Кошелева, Л. А. Платонова, Н. И. Сельченкова, Н. А. Юкина. Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения // ДАН, 2003, том 393, № 3. – С. 326–331.
3. Р. И. Илькаев, В. Т. Пунин, А. Я. Учаев, Н. И. Сельченкова, Л. А. Платонова, Е. В. Кошелева, А. С. Конкин. Физическая природа долговечности металлов в явлении динамического разрушения // Ядерная физика и инжиниринг. 2010, том 1, № 2, с. 99–103.
4. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – Москва: Мир, 1991. – 254 с.

**SUBSTANTIATION OF CAPABILITY FOR METALS' BEHAVIOR PREDICTABILITY UNDER EXTREME CONDITIONS ON THE BASIS OF SPECIFIED GENERAL REGULARITIES OF DYNAMIC FAILURE PROCESSES**

A. Ya. Uchaev, V. T. Punin,

N. I. Selchenkova, E. V. Kosheleva

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

A quantitative characteristic of the system response to external action is generalized susceptibility  $\chi$  [1]. At equal parameter value  $\chi$ , if there is no change in space dimension, where the phenomenon is going on, relaxation processes in the full-scale object and in the model belong to a single universality class and are characterized by similar critical indexes and dimensionless correlations, describing relaxation processes in the model and the full-scale object.

Earlier it was shown that in metals dynamic failure processes on different scale-time levels possess a cooperative character, what was conditioned by fractal nature



of dissipative structure ensembles, arising at high-intense external metals' action, percolation transitions of non-equilibrium system from one scale-time level onto another, obeying concentration criterion [2, 3].

The concentration criterion demonstrates that kinetics of relaxation processes and its quantitative characteristics of the previous scale-time level form kinetics of processes on the following time-scale level.

At high-intense action onto metals in the dynamic failure phenomenon there arise dispersion effects and preceding effects of crystal lattice current and local mixture areas (dissipative structures' cascade), i. e., hydrodynamical modes appear.

With the aid of mathematical software package of interactive system of image analysis there were obtained quantitative characteristics of dissipative structures - dimensionless quantities: fractal dimension  $d_f$  and Hearst index  $H$ , which allow a quantitative characteristics of hydrodynamical metal currents [4].

Fractal dimensions  $d_f$  characterize density of hydrodynamic modes depending on their linear size, and value  $1 < d_f < 2$  (for space dimensions  $D = 2$ ) testifies to the fact that, modes show correlated (self-organized) behavior.

Hearst index  $H$  shows, whether the process has a random character or it possesses a prehistory (a persistent process). Thus, value  $H > 0.5$  characterizes the state, at which hydrodynamic modes of crystal metal lattice current are of cooperative character, their appearance preceded by processes, which are of cooperative character.

Obtained data allow and are significant for computer prediction of structural metals' behavior under extreme conditions within wide time-amplitude ranges of the external action  $t \sim 10^{-6}$ – $10^{-10}$  s,  $P \sim 0.5$ – $20$  GPa.

## References

1. Stanly G. Phase transitions and critical phenomena. – Moscow: Nauka, 1973. – 419 p.
2. R. I. Il'kaev, V. T. Punin, A. Ya. Uchaev, S. A. Novikov, E. V. Kosheleva, L. A. Platonova, N. I. Selchenkova, N. A. Yukina. Time regularities of dynamic metals' failure process conditioned by hierarchy properties of dissipative structures – failure centers' cascade. // RAS, 2003, vol. 393, № 3. – P. 326–331.
3. 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. Feder E. Fractals: Transl. from Engl. – Moscow: Mir, 1991. – 254 p.

4-54

## АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОДИФФУЗИИ В $\gamma$ -U И $\gamma$ -U-Mo

Д. Е. Смирнова<sup>1</sup>, А. Ю. Куксин<sup>1,2</sup>,  
С. В. Стариков<sup>1,2</sup>, В. В. Стегайлов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Россия, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский Физико-технический Институт, Россия, Долгопрудный, Россия

E-mail: d. e.smirnov@gmail.com, stegailov@gmail.com

Представлены результаты исследования самодиффузии в чистом  $\gamma$ -U и в ядерных топливных сплавах U-Mo. Моделирование  $\gamma$ -U и сплавов U-Mo выполняется методом классической молекулярной динамики, с помощью разработанных авторами многочастичных потенциалов [1, 2], а также потенциала, предложенного Билером и др. [3] Для  $\gamma$ -U и сплава, содержащего 9 вес. процентов молибдена, рассчитаны энергии образования точечных дефектов и коэффициенты диффузии атомов вследствие диффузии дефектов; проведена оценка коэффициентов самодиффузии U и Mo.

Экспериментальные исследования свойств ОЦК структуры  $\gamma$ -U показывают, что диффузионная подвижность в этой фазе аномально высока (по сравнению с другими ОЦК металлами). На основании данных, полученных в настоящей работе, сделан вывод о том, что экспериментально наблюдаемые в  $\gamma$ -U особенности самодиффузии могут быть объяснены преобладанием межузельного механизма. Сопоставление температурной зависимости коэффициента самодиффузии U, рассчитанной в этом предположении, с экспериментальными данными показывает хорошее согласие.

Показано, что при переходе к моделированию сплавов U-Mo потенциал в форме «погруженного атома» [2] дает некорректное описание самодиффузии (исследован сплав U-9 вес.%Mo). Предлагается и обсуждается попытка дальнейшего развития потенциалов для системы U-Mo путем перехода к усложненной функциональной форме, позволяющей учитывать не центрально-симметричные силы межатомного взаимодействия (Angular-dependent potential – ADP). Показано, что только модель с уровнем сложности не ниже ADP-потенциала может быть использована для исследования процессов эволюции дефектов в бинарных компонентах системы U-Mo.

## Литература

1. Смирнова Д. Е., Стариков С. В., Стегайлов В. В. // ФММ, 2012, Т. 113, № 2, С. 115.
2. Smirnova D. E., Kuksin A. Yu., Starikov S. V. et al // MSMSE, 2013, V. 21, № 3, P. 035011.
3. Beeler B., Deo C., Baskes M., Okunewski M. // JPCM, 2012. V. 24. P. 075401.

## ATOMISTIC SIMULATION OF SELF-DIFFUSION IN $\gamma$ -U AND $\gamma$ -U-Mo

D. E. Smirnova<sup>1</sup>, A. Yu. Kuksin<sup>1,2</sup>,  
S. V. Starikov<sup>1,2</sup>, V. V. Stegailov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny,  
Russia

E-mail: d. e.smirnov@gmail.com, stegailov@gmail.com

We present results of investigation of self-diffusion in pure  $\gamma$ -U and in U-Mo fuel alloys. Simulation of  $\gamma$ -U and U-Mo alloys was performed using molecular dynamics with the different EAM and MEAM interatomic potentials: constructed by the authors of the present work [1,2], and by B. Beeler et al [3]. Point defects formation energies and atomic diffusivities via point defects were calculated both for  $\gamma$ -U and U-Mo alloy containing 9wt.% of Mo. The information obtained from this simulation was used for estimation of self-diffusion coefficients of U and Mo.

Experimental study of BCC  $\gamma$ -U shows that diffusion mobility in this phase is anomalously high, comparing the other BCC metals. Results of simulation performed in the present work allow to conclude that this peculiarity can be explained by the fact that the self-interstitial atoms (SIAs) play leading role in self-diffusion processes. Calculated self-diffusion coefficients (determined mostly by the SIAs contribution) compare well with the experimental data for self-diffusion of U in  $\gamma$ -U.

In case of U-Mo alloys, it is shown that EAM potential [2] provides inadequate description of self-diffusion in this material (simulation was performed for U-9 wt.%Mo). In this basis we assume and discuss the way of further development of interatomic potential for description of U-Mo system. It is suggested to change the potential form to a more complicated Angular-dependent potential (ADP). The latter allows to take into account non-centrosymmetrical interatomic forces. It is shown that only the model with the level of complexity at least equal to the ADP can be applied for investigation of the processes of defects evolution in binary components of U-Mo system.

### References

1. Smirnova D. E., Starikov S. V., Stegailov V. V. // JPCM, 2012, V. 24, P. 015702.
2. Smirnova D. E., Kuksin A. Yu., Starikov S. V. et al // MSMSE, 2013, V. 21, №. 3, P. 035011.
3. Beeler B., Deo C., Baskes M., Okunewski M. // JPCM, 2012, V. 24, P. 07540.

4-55

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

М. А. Соковиков<sup>1</sup>, В. В. Чудинов<sup>1</sup>, Д. А. Билалов<sup>1</sup>,  
В. А. Оборин<sup>1</sup>, А. Н. Петрова<sup>2</sup>, С. В. Уваров<sup>1</sup>,  
О. А. Плехов<sup>1</sup>, О. Б. Наймарк<sup>1</sup>, И. Г. Бродова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,  
Россия

<sup>2</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: sokovikov@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому изучению неустойчивости и локализации пластической деформации при динамическом нагружении и высокоскоростном пробивании.

Исследовалось поведение образцов в режиме близком к чистому сдвигу при динамическом нагружении на стержне Гопкисона – Кольского. Для этого были разработаны образцы специальной формы и оснастка, обеспечивающие реализацию плоского деформированного состояния. В режиме реального времени боковая поверхность образцов исследовалась с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Полученное распределение температурного поля в различные моменты времени позволило судить о развитии процесса локализации пластической деформации.

Изучение поверхности разрушения образцов с помощью просвечивающего электронного микроскопа показало, в областях локализации произошло образование участков полосовой структуры и ячеистой структуры в деформированном слое.

Проведено изучение пробивания преграды в виде формирования и выноса пробки с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры. На оригинальной баллистической установке по изучению пробивания были исследованы образцы, 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 в областях локализации деформации субзерна вытягиваются в полосы и фрагментируются, образуя ультрамикроструктурную структуру с размером зерен ~300 нм. За счет ротационных мод деформации возникают высокоугловые разориентировки зерен.

Проведено 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.

Данные теоретических и экспериментальных исследований позволяют предполагать, что один из механизмов неустойчивости пластического сдвига и локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении обусловлен структурно-кинетическими переходами в ансамблях микросдвигов.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы РАН 12-1-012-ЯЦ, грантов РФФИ 13-08-96025p\_ural\_a, 14-01-00842\_a, 14-01-31193.

#### INVESTIGATION OF PLASTIC DEFORMATION LOCALIZATION UNDER DYNAMIC LOADING

M. A. Sokovikov<sup>1</sup>, V. V. Chudinov<sup>1</sup>, D. A. Bilalov<sup>1</sup>,  
V. A. Oborin<sup>1</sup>, A. N. Petrova<sup>2</sup>, S. V. Uvarov<sup>1</sup>,  
O. A. Plekhov<sup>1</sup>, O. B. Naimark<sup>1</sup>, I. G. Brodova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

<sup>2</sup>Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

E-mail: sokovikov@icmm.ru

The paper focuses on the experimental and theoretical study of plastic deformation instability and localization in materials subjected to dynamic loading and high-velocity perforation. We investigate the behavior of samples dynamically loaded during Hopkinson-Kolsky pressure bar tests in a regime close to simple shear conditions. Experiments were carried out using samples of a special shape and appropriate test rigging, which allowed us to realize a plane strain state. The lateral surface of the samples was investigated in a real-time mode with the aid of a high-speed infrared camera CEDIP Silver 450M. The temperature field distribution obtained at different time made it possible to trace the evolution of plastic strain localization.

Use of a transmission electron microscope for studying the surface of samples showed that in the regions of strain localization there are parts taking the shape of bands and honeycomb structure in the deformed layer.

The process of target perforation involving plug formation and ejection was investigated using a high-speed infra-red camera. A specially designed ballistic set-up for studying perforation was used to test samples in different impulse loading regimes followed by plastic flow instability and plug ejection. Changes in the velocity of the rear surface at different time of plug ejection were analyzed by Doppler interferometry techniques. The microstructure of tested samples was analyzed using an optical interferometer-profilometer and a scanning electron microscope. The subsequent processing of 3D deformation relief data enabled estimation of the distribution of plastic strain gradients at different time of plug formation and ejection.

It has been found that in strain localization areas the subgrains are elongated taking the shape of bands and undergo fragmentation leading to the formation of super-microcrystalline structure, in which the size of grains is ~300 nm.

Rotational deformation modes give rise to the high angular disorientations of grains.

The development of plastic shear instability regions has been simulated numerically. For this purpose, we use a recently developed theory, in which the influence of microspheres on the deformation properties of materials has been studied by the methods of statistical physics and thermodynamics of irreversible processes.

The results of theoretical and experimental studies suggest that one of the mechanisms of the plastic shear instability and localization of plastic strain at high-velocity perforation is related to structural and kinetic transitions in microspheres ensembles.

The work was partially supported by the RFBR program 12-1-012-ЯЦ and RFBR grants 13-08-96025p\_ural, 14-01-00842\_a, and 14-01-31193.

4-56

#### ДИФфуЗИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В НИТРИДЕ УРАНА: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТЫ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

А. Ю. Куксин, Д. Е. Смирнова, С. В. Стариков

Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

Московский физико-технический институт, Москва, Россия

E-mail: starikov@ihed.ra.ru

С помощью атомистического моделирования исследуются свойства нитрида урана. Для решения поставленной задачи был разработан новый потенциал, описывающий межатомное взаимодействие в системе U-N. Потенциал был разработан на основе расчетов из первых принципов. Созданный потенциал использовался для моделирования диффузии точечных дефектов и фазовых переходов в широком диапазоне давлений и температур. Проанализированы механизмы самодиффузии атомов за счет точечных дефектов. Установлено, что в ходе миграции междоузельный атом урана с большой вероятностью может выбить азот из своей позиции и перейти в дефект замещения в азотной подрешетке. Преобладание данных дефектов в UN косвенно подтверждается согласием с закономерностями в изменении коэффициентов самодиффузии U и N при увеличении давления азота и тем, что область гомогенности для моонитрида урана при отклонении от стехиометрии очень узкая, в отличие от нитридов переходных металлов.

### DIFFUSION OF POINT DEFECTS IN URANIUM MONONITRIDE: ATOMISTIC SIMULATION AND AB-INITIO CALCULATION

A. Yu. Kuksin, D. E. Smirnova, S. V. Starikov

Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

E-mail: starikov@ihed.ra.ru

The properties of point defects in uranium mononitride are studied by ab initio calculation and atomistic simulation with a new interatomic potential. Each method discovers important features which must not be taken into account in other method. Thus both methods correct each other and the interatomic potential is bridge between these approaches. The interatomic potential is developed at using of the results of the density functional theory calculations. The energy hierarchy of the point defects and the diffusion mechanisms is investigated. It is noticed that uranium antisite defects plays key role in the defects diffusion and seems to be important for description of the structure stability in not stoichiometric system.

---

4-57

### ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ И ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Н. И. Талуц<sup>1</sup>, А. В. Добромыслов<sup>1</sup>, Е. А. Козлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

E-mail: NinaTaluts@imp.uran.ru

Изучение процессов локализации пластической деформации и образования вихревых структур в металлах и сплавах принадлежит к числу наиболее важных задач физики прочности и механики деформируемого твердого тела. В работе представлены результаты систематического изучения высокоскоростной пластической деформации металлов и сплавов с различным типом кристаллической решетки в условиях нагружения сферически сходящимися ударными волнами. Объектами исследования были монокристаллы (Cu, Nb), поликристаллические металлы (Pt, Fe, Ti, Zr, Cu) и сплавы (Al-Cu, Al-Zn-Mg, Zr-Nb). Шары, приготовленные из таких металлов и сплавов, были подвергнуты нагружению с различными амплитудами давлений на фронте ударной волны. Изучение деформационной структуры сохраненных после ударного нагружения шаров проводилось с помощью рентгеноструктурного анализа, оптической металлографии, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии и измерением микротвердости.

Было установлено, что величина амплитуды ударной волны, тип материала и размер зерна оказывают существенное влияние на деформационное поведение исследованных материалов. Высокоскоростная деформация в основном реализуется внутризерненным и зернограничным скольжением, а также двойникованием. Внутризерненное скольжение в некоторых случаях протекает неоднородно, путем образования полос сдвига. При повышении интенсивности нагружения в результате потери сдвиговой устойчивости происходит образование полос локализации деформации по границам зерен. Наряду с этим в некоторых случаях наблюдается образование вихревых структур и полос адиабатического сдвига.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 12-П-2-1009 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии».

### LOCALIZATION OF DEFORMATION AND VORTEX STRUCTURE IN SINGLE-CRYSTAL AND POLYCRYSTALLINE METALS AND ALLOYS UNDER LOADING BY SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES

N. I. Taluts<sup>1</sup>, A. V. Dobromyslov<sup>1</sup>, E. A. Kozlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

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

E-mail: NinaTaluts@imp.uran.ru

Study of the processes of plastic deformation localization and formation of vortex structures in metals and alloys is one of the most important tasks of physics of strength and mechanics of deformed solids. The results of a systematic study of high-rate plastic deformation of metals and alloys with different types of crystal lattice in the loading conditions of spherically converging shock waves are presented in the work. Single crystals (Cu, Nb), polycrystalline metals (Pt, Fe, Ti, Zr, Cu) and alloys (Al-Cu, Al-Zn-Mg, Zr-Nb) were objects of the investigation. The spheres made from these metals and alloys were subjected to loading with different amplitudes of pressure at the shock front. Study of deformation structure remained intact after shock loading spheres was performed using X-ray diffraction analysis, optical metallography, transmission and scanning electron microscopy, and microhardness measurements. It was found that the amplitude of the shock wave, material type and grain size have a significant effect on the deformation behavior of the investigated materials. The high-rate deformation proceeds mostly by intragranular slip, grain-boundary sliding and twinning. Intragranular slip proceeds in some cases heterogeneously by formation of shear bands. With increasing intensity of loading, localization of deformation along the grain boundaries occurs due to the loss of shear stability. Along with this, in some cases, the formation of vortex structures and adiabatic shear bands is observed.

This work was supported by the Program of Basic Research of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, project 12-P-2-1009.

---

4-58

**О СОВМЕЩЕНИИ МЕТОДИК  
ОПТИЧЕСКОГО РЫЧАГА  
И ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННОЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Е. А. Козлов, В. И. Таржанов, И. В. Теличко,  
Д. Г. Панкратов, Д. П. Кучко, М. А. Ральников

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

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

С использованием клиновых образцов из стали 12X18H10T и закаленной стали 30XГСА HRC 35..40, а также нелегированного церия, продемонстрированы новые возможности совмещенной методики оптического рычага и лазерно-гетеродинной для регистрации эволюции структуры и параметров волн напряжений в процессе распространения по образцам переменной толщины при их взрывном нагружении различной амплитуды и длительности. В дополнение к [1, 2] представлены новые данные по релаксации напряжений на фронтах упругого и фазового предвестников, а также затуханию основной пластической волны, изменению формы и параметров сигнала откольного разрушения.

**Литература**

1. Е. А. Козлов, В. И. Таржанов, И. В. Теличко, Д. Г. Панкратов. Сдвиговая и откольная прочности закаленной стали 30XГСА при взрывном нагружении в области протекания твердофазного превращения, Деформация и разрушение материалов, 2012, № 8, с. 32–38 [Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2013, No. 10, pp. 772–778].
2. Е. А. Козлов, В. И. Таржанов, И. В. Теличко, Д. Г. Панкратов, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, Дж. Грей III, М. Зочер. Новые результаты по кинетике фазовых превращений и откольной прочности церия, полученные по совмещенной методике оптического рычага и лазерно-гетеродинной методике, Труды XIII Российско-Американского семинара ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА АКТИНИДОВ, Саров, 09–13 сентября 2013.

**ON COMBINING THE OPTICAL LEVER  
AND LASER HETERODYNE TECHNIQUES  
TO STUDY DYNAMIC PROPERTIES  
OF STRUCTURAL MATERIALS**

E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, I. V. Telichko,  
D. G. Pankratov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov

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

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

Wedge samples made of 30KhGSA steel quenched up to HRC 35..40, 12Kh18N10T steel, and unalloyed cerium were used to demonstrate new possibilities of the combined optical lever and laser heterodyne technique to record the evolution of structure and parameters of the stress waves propagating through samples with different thickness under their impulse loading with varied amplitude and duration.

In addition to [1, 2], this paper gives new data on the relaxation of stresses at the fronts of elastic and phase precursors, as well as on the principle plastic wave attenuation and the variations in shape and parameters of spall fracture signal.

**References**

1. E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, I. V. Telichko, D. G. Pankratov. Shear and Spall Strengths of Quenched 30KhGSA Steel under Explosive Loading in the Range of Solid-Solid Phase Transformation, Rus.J. Deformation and Fracture of Materials, 2012, No. 8, pp. 32–38 [Russian Metallurgy (Metally), (Engl transl.), Vol. 2013, No. 10, pp. 772–778].
2. E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, I. V. Telichko, D. G. Pankratov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, G. Gray III, M. Zocher. New Results on Kinetics of Phase Transformations and Shear Strength for Cerium Obtained by Using the Combination of Optical-Lever and Laser-Heterodyne Techniques, XIII Russian-US Workshop FUNDAMENTAL PROPERTIES of PLUTONIUM, September 09–13, 2013, Sarov, Russia.

4-59

**КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ  
ПЛАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛА:  
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

А. О. Типеев, В. Г. Байдаков

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: tipeeff@ya.ru

Методом молекулярной динамики исследован процесс плавления метастабильного (растянутого) кристалла. Расчеты проведены при четырех значениях температур при положительных и отрицательных давлениях.

Исследуемые системы содержали от 2048 до 500000 леннард-джонсовских частиц с параметрами аргона. Частицы находились в кубической ячейке с периодическими граничными условиями. Исходная конфигурация – идеальный кристалл с гранцентрированной кубической решеткой. Радиус обрезания потенциала межчастичного взаимодействия принимался равным 6,58 молекулярных диаметра.

Моделирование производилось в NVE-ансамбле при температурах  $T = 48, 66, 84, 102$  К, которые задавались коррекцией скоростей всех частиц. Всего исследовано 25 термодинамических состояний. Заход в метастабильную область производился путем изотермического растяжения кристалла (линейного увеличения размеров ячейки). Для каждого изучаемого состояния получено от 50 до 200 событий плавления.

Момент начала фазового превращения фиксировался по резкому изменению температуры и давления системы. Построены гистограммы времен ожидания плавления, выявлен пуассоновский характер их распределения. Методом среднего времени жизни [1] рассчитана частота зародышеобразования и определена ее барическая зависимость в диапазоне давлений от  $-1470$  до  $-1500$  бар при  $T_{\min} = 48$  К и от 55 до 135 бар при  $T_{\max} = 102$  К.

При температурах  $T = 48$  и  $102$  К исследован размерный эффект плавления. Установлено, что термодинамические свойства метастабильного кристалла (давление,

внутренняя энергия) не зависят от количества частиц в ячейке. При фиксированном термодинамическом состоянии частота зародышеобразования в пределах погрешности ее расчета постоянна для систем, содержащих от 108000 до 8788 частиц и резко понижается при  $N < 8788$ .

Визуализирован процесс плавления кристалла. Для этого через каждые 100 МД шагов записывались координаты всех частиц в процессе фазового превращения. Полученные конфигурации были проанализированы с использованием параметра центральной симметрии [2]. Показано качественное различие механизмов разрушения кристаллической решетки при положительных и отрицательных давлениях.

Рассчитаны изотермические модули упругости кристалла, показано их монотонное убывание по мере увеличения степени метастабильности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 12-08-00467, 14-08-31761) и проекта ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН 13-2-039-ЯЦ.

#### Литература

1. Скрипов В. П. *Метастабильная жидкость*. М.: Наука, 1972. 312 с.
2. Kelchner C., Plimpton S., Hamilton J., *Phys. Rev. B*, 58, 11085 (1998).

#### KINETICS AND MECHANISM OF CRYSTAL MELTING: MOLECULAR DYNAMICS ANALYSIS

A. O. Tipeev, V. G. Baidakov

Institute of Thermophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

E-mail: tipeeff@ya.ru

The molecular dynamics method has been used to study the process of melting of metastable (stretched) crystals. Calculations have been carried out at four temperatures at positive and negative pressures.

The investigated systems contained from 2048 to 500000 Lennard-Jones particles with argon parameters. The particles were located in a cubic cell with periodic boundary conditions. The initial configuration was a perfect FCC crystal. The cutoff radius of the interparticle interaction potential was assumed to be equal to 6.58 molecular diameters.

Simulation was performed in the NVE ensemble at temperatures  $T = 48, 66, 84, 102$  K, which were set by correction of velocities of all particles. 25 thermodynamic states have been investigated in total. Entry in the metastable region was realized by isothermal stretching of the crystal (linear increase of the cell size). For each studied state from 50 to 200 events of melting have been obtained.

The beginning of a phase transition is revealed by a sharp change in the temperature and pressure of the system. Histograms of expectation times for melting have been constructed and the Poisson character of their distribution has been revealed. The mean lifetime method [1] was used to calculate the nucleation rate, its baric dependence was determined in the pressure range from  $-1470$  to  $-1500$  bar at  $T_{\min} = 48$  K and from 55 to 135 bar at  $T_{\max} = 102$  K.

At temperatures of  $T = 48$  and  $102$  K the size effect of melting has been investigated. It has been established that the thermodynamic properties of a metastable crystal (pressure, internal energy) are not dependent on the number of particles in the cell. For a fixed thermodynamic state the nucleation rate within the error of its calculation is constant for systems containing from 108000 to 8788 particles and drops sharply at  $N < 8788$ .

The process of crystal melting was visualized. To do this, every 100 MD steps the coordinates of all particles in the process of phase transformation were recorded. The obtained configurations were analyzed using the centrosymmetry parameter [2]. The qualitative difference in the mechanisms of destruction of the crystal lattice at positive and negative pressures has been shown.

Isothermal elastic moduli of the crystal have been calculated, their monotonic decrease with increasing metastability degree has been shown.

This work has been performed with a financial support of the project of Oriented Fundamental Research UB RAS 13-2-039-ЯЦ and The Russian Foundation for Basic Research (12-08-00467, 14-08-31761).

#### References

1. Skripov V. P., *Metastable Liquids*, Wiley, New York, 1974.
2. Kelchner C., Plimpton S., Hamilton J., *Phys. Rev. B*, 58, 11085 (1998).

---

4-60

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ, ВЫЗЫВАЕМОМ ИМПУЛЬСАМИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И РАЗГОНЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВОМ ЛАЙНЕРОВ

Е. В. Кошелева, В. В. Мохова, А. М. Подурец,  
В. Т. Пунин, Н. И. Сельченкова, А. В. Тилькунов,  
И. Р. Трунин, А. Я. Учаев

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

В связи с развитием научных высокоэнергетических импульсных установок (импульсные ускорители, импульсные реакторы, термоядерные реакторы, фемтосекундные лазеры) требуется знание поведения конденсированных сред в экстремальных условиях, поскольку мощностные возможности таких установок напрямую связаны со стойкостью элементов и узлов, входящих в их состав.

Следовательно, является актуальным проведение исследований кинетических релаксационных процессов, протекающих в неравновесных конденсированных средах различной геометрии, различной природы и установление временной границы сохранения их функциональных свойств.

Ранее в результате большого объема расчетно-теоретических и экспериментальных исследований было

показано, что конденсированные среды (металлы) проявляют универсальные синергетические признаки в явлении динамического разрушения. Исследования процесса динамического разрушения были проведены в режиме импульсного объемного разогрева при воздействии мощных импульсов проникающих излучений в одномерном приближении в диапазоне долговечности  $t \sim 10^{-6} - 10^{-10}$  с и диапазоне начальных температур  $T_0 \sim 4\text{K} - 0,8 T_{\text{пл}}$  [1–3].

В работе приведены результаты исследований процесса диспергирования металлов при ударно-волновом нагружении при воздействии импульсов релятивистских электронных пучков и разгоняемого электро-взрывом лайнера. Были нагружены образцы из Cu, Al с нанесенными возмущениями в виде пирамидок с различным углом раствора, в которых возникают динамические объемные деструктивные процессы.

При выходе ударной волны (УВ) на свободную поверхность, например, металлического образца при определенных амплитудно-временных характеристиках УВ могут происходить эффекты кумуляции, диспергирования, неустойчивости границ. Деструктивные процессы протекают в рамках гидродинамических мод.

Когда длина УВ существенно больше размера нанесенных возмущений (пирамидки), диспергирование происходит по периметру основания пирамидки, т. е., энергия УВ кумулирует среду [4]. При длине УВ существенно меньше размера нанесенных возмущений происходит кумуляция энергии УВ гранями пирамидок и диспергирование происходит из вершин пирамидок. В данном случае среда кумулирует энергию УВ.

Показано, что при определенных амплитудно-временных характеристиках УВ происходит диспергирование из вершин пирамидок. Процессу диспергирования предшествуют процессы структурирования течений кристаллической решетки близ граней пирамидок. Определен объем диспергированного металла и спектральное (по размерам) распределение продуктов диспергирования.

#### Литература:

1. Учаев А. Я., Новиков С. А., Цукерман В. А., Багряннов Б. В., Бонюшкин Е. К., Завада Н. И., Трунин И. Р., Юкина Н. А. Особенности откольного разрушения вольфрама в режиме быстрого объемного разогрева // Докл. АН СССР. 1990. Т. 310, № 3. С. 611–614.
2. Р. И. Илькаев, В. Т. Пунин, А. Я. Учаев, С. А. Новиков, Е. В. Кошелева, Л. А. Платонова, Н. И. Сельченкова, Н. А. Юкина. Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения // ДАН, 2003, том 393, № 3. – С. 326–331.
3. Р. И. Илькаев, В. Т. Пунин, А. Я. Учаев, Н. И. Сельченкова, Л. А. Платонова, Е. В. Кошелева, А. С. Конкин. Физическая природа долговечности металлов в явлении динамического разрушения // Ядерная физика и инжиниринг. 2010, том 1, № 2, с. 99–103.
4. Огородников В. А., А. Л. Михайлов, В. В. Бурцев и др. Регистрация выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов теневым способом // ЖЭТФ, т. 136, вып. 3, 2009. – С. 615–620.

#### STUDY OF PROCESSES OF METALS' DISPERSION UNDER SHOCK-WAVE LOADING, CAUSED BY PULSES OF RELATIVISTIC ELECTRONS AND LINERS ACCELERATED BY ELECTRIC EXPLOSION

E. V. Kosheleva, V. V. Mokhova, A. M. Podurets,  
V. T. Punin, N. I. Selchenkova, A. B. Til'kunov,  
I. R. Trunin, A. Ya. Uchaev

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

In connection with development of scientific high-energy pulsed facilities (pulsed accelerators, pulsed reactors, thermonuclear reactors, femtosecond lasers) the knowledge of condensed media behavior under extreme conditions is required, since such facilities' power capabilities are directly related to stability of elements and units entering their structure.

Consequently, acute are a study of kinetics relaxation processes, going on in non-equilibrium condensed media of different geometry, different nature as well as establishment of time boundary of retaining for their functional properties.

Earlier as a result of large amount of calculation-theoretical and experimental studies it was shown that condensed media (metals) revealed universal synergy attributes in the phenomenon of dynamic failure. Dynamic failure process was studied in the mode of pulsed volume heat-up under the action of powerful pulses of penetrating radiation in one-dimension approximation in the longevity range  $t \sim 10^{-6} - 10^{-10}$  s and initial temperature range  $T_0 \sim 4\text{K} - 0.8 T_{\text{melt}}$  [1–3].

Paper presents results of metals' dispersion process under shock-wave loading at impact of pulses of relativistic electron beams and the liner accelerated by electric explosion. Loaded were Cu, Al samples with existing disturbances in the form of pyramidion with different corner angle, where dynamic volume failure processes arise.

At the output of shock wave (ShW) on the free surface, for example, metallic sample at specific ShW time-amplitude characteristics there can take place effects of cumulating, dispersion, boundaries' non-stability. Failure processes are going on within the frames of hydrodynamic modes.

When ShW length is significantly larger than the size of existing disturbances (those of pyramidion), dispersion takes place over the perimeter of pyramidion base, i. e., ShW energy cumulates the medium [4]. When ShW length is significantly smaller than the size of existing disturbances ShW energy is cumulated by pyramidions' faces and dispersion takes place from the pyramidions' vertexes. In this case the medium cumulates ShW energy.

It is shown that at specific ShW time-amplitude characteristics dispersion takes place from pyramidions' vertexes. Dispersion process is preceded by processes of structuring the crystal lattice currents near the pyramidion faces. Dispersed metal volume and spectral (by sizes) distribution of dispersion products has been determined.

#### References

1. Uchaev A. Ya., Novikov S. A., Tsukerman V. A., Bagryanov B. V., Bon'ushkin Ye. K., Zavada N. I., Trunin I. R., Yukina N. A.

Specific features of tungsten spalling failure in the fast volume heat-up // Report of Academy for Sciences, USSR. 1990. V. 310, № 3. P. 611–614.

2. R. I. Il'kaev, V. T. Punin, A. Ya. Uchaev, S. A. Novikov, E. V. Kosheleva, L. A. Platonova, N. I. Selchenkova, N. A. Yukina. Time regularities of dynamic metals' failure process conditioned by hierarchy properties of dissipative structures – failure centers' cascade. // RAS, 2003, vol. 393, № 3. – P. 326–331.

3. 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. Ogorodnikov V. A., Mikhailov A. L., Burtsev V. V. et al. Registering of particle ejection from the free surface of shock-loaded samples by the shadow method // ZhETF, vol. 136, issue 3, 2009. – P. 615–620.

4-61

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ  
ПОВЕДЕНИЯ СВИНЦА  
ПРИ УДАРНОВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ  
И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РАЗГРУЗКЕ**

A. V. Фёдоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин,  
Д. В. Назаров, Е. А. Чудаков,  
Д. А. Калашников, Е. И. Бутусов

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Определение массы, размера и скорости частиц, возникающих вследствие микрокумулятивного выброса с поверхности металлов при выходе на нее ударной волны, является сложной и многофакторной задачей. Целью работы являлось определение границ области плавления свинца и измерение поля скоростей облака частиц, инжектируемых с поверхности при ударноволновом нагружении. С помощью метода гетеродин-интерферометра (PDV) регистрировалась одновременно скорость свободной поверхности и скорость пылевого облака частиц.

Зарегистрировано, что плавление свинца наступает после нагружения ударной волной с амплитудой давления  $\geq 25$  ГПа и последующей разгрузке. Показано, что плотность облака расплавленных частиц на порядок больше плотности пылевого облака твердых частиц. Рассмотрены механизмы дробления жидких капель при движении в газовой среде. Произведены оценки размеров твердых и жидких частиц при их торможении в воздухе.

**STUDY OF LEAD BEHAVIOR FEATURES  
AT SHOCK LOADING  
AND FURTHER UNLOADING**

A. V. Fedorov, A. L. Mikhailov, S. A. Finyushin,  
D. V. Nazarov, E. A. Chudakov,  
D. A. Kalashnikov, E. I. Butusov

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

The determination of mass, size and velocity of particles, which appear as a result of microcumulative ejection from the metal surface at the moment of shock wave arrival, is a very complicated and multivariate problem. The object of this presentation is to value boundaries of lead melting area and to measure velocity field of particle cloud ejected from the surface under shock loading. The free surface velocity and the particle cloud velocity were simultaneously recorded using the method of heterodyne-interferometer (PDV).

It was obtained that lead melting occurs after shock loading with the pressure of 25 GPa and more, and the further unloading. It was shown that the density of melted particle cloud is ten times higher than the density of solid particle cloud. The mechanisms of fragmentation of liquid droplets at the motion in gaseous medium were considered. The sizes of solid and liquid particles were estimated at braking in the air.

4-62

**МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ  
СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВ В ОБЛАСТИ УДАРНЫХ  
СЖАТИЙ И ТЕПЛОВЫХ РАСШИРЕНИЙ**

В. Ф. Куропатенко, С. Ю. Филатов

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

E-mail: otdeldou@vniitf.ru

Предложен способ построения уравнений состояния в области не очень больших давлений. Подбор основных параметров уравнения состояния выполнен при помощи оригинальной версии симплекс метода. В основе способа лежит использование линейной зависимости скорости ударной волны от скорости вещества и данные по тепловому расширению при постоянном давлении. В качестве целевой функции выбрана сумма квадратичных разностей между расчетными и экспериментальными значениями теплового расширения вещества и теплоемкости при постоянном давлении. Сравниваются теоретические и экспериментальные величины, такие как, ударные адиабаты, теплоемкости при постоянном давлении. Для ряда материалов получено удовлетворительное совпадение. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №13-01-00072.

**SMALL-PARAMETRIC EQUATIONS OF STATE  
IN THE REGION OF SHOCK COMPRESSIONS  
AND THERMAL EXPANSIONS**

V. F. Kuropatenko, S. Yu. Filatov

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

E-mail: otdeldou@vniitf.ru

The new method of building equation of state is offered in the region for not too big pressures. Selection of base parameters of equation of state is done with original version of simplex-method. The method has been used a linear dependence of shock wave velocity from a substance velocity and



thermal expansion data for constant pressure. Target function is selected a sum of quadratic differences between calculation and experimental values of the thermal expansion substance and the specific heat for constant pressure. The theoretical and experimental values are compared for such Hugoniot adiabats and specific heat for constant pressure. The work was supported by RFBR. Grant 13-01-00072.

4-63

**ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ  
ХРОМОЦИРКОНИЕВОЙ БРОНЗЫ,  
ПОДВЕРГНУТОЙ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМУ  
ПРЕССОВАНИЮ И СТАРЕНИЮ**

Н. Ю. Фролова<sup>1</sup>, В. И. Зельдович<sup>1</sup>, И. В. Хомская<sup>1</sup>,  
А. Э. Хейфец<sup>1</sup>, Е. В. Шорохов<sup>2</sup>,  
П. А. Насонов<sup>2</sup>, А. А. Гранский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

E-mail: frolova@imp.uran.ru

Высокоэнергетические воздействия открывают возможность получения объемных наноструктурированных материалов в течение микросекундных интервалов времени за счет импульсных источников энергии. Динамическое канально-угловое прессование (ДКУП) является одним из таких способов воздействия. Метод ДКУП был предложен в Российском Федеральном Ядерном Центре – ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина. ДКУП представляет собой высокоскоростной ( $10^4$ – $10^5$  с<sup>-1</sup>) метод деформации. Установлено, что при динамическом канально-угловом прессовании формирования наноструктурного состояния в бронзе (сплав1: Cu-0.09Cr-0.08Zr, сплав2: Cu-0.14Cr-0.04Zr) происходит в результате высокоскоростных процессов фрагментации и динамической полигонизации, вследствие чего повышается микротвердость. При ДКУП хромоциркониевой бронзы возникает субмикроструктурная структура со средним размером кристаллитов 200 нм, повышается микротвердость в 2.4 раза.

Изучение изменения микротвердости сплава 2 при старении после прокатки до 96%, после ДКУП в 4 прохода и после закалки показало, что старение недеформированного сплава повышает его микротвердость на 280 МПа, а деформация прокаткой в ~2 раза больше, на 550 МПа. Старение деформированного прокаткой сплава приводит к дополнительному повышению микротвердости на 350 МПа. ДКУП повышает микротвердость сплава (на 850 МПа), но дополнительное старение лишь незначительно увеличивает микротвердость. Таким образом, полученные данные позволили разделить эффекты увеличения микротвердости за счет собственно деформации (550 МПа) и старения (~300 МПа). Показано, что ДКУП бронзы сопровождается процессом распада твердого раствора.

Установлено, что на ранних стадиях старения наноразмерные частицы закрепляют дислокации, затрудняя образование центров рекристаллизации. На более поздних

стадиях частицы хрома задерживают миграцию большеугловых границ, препятствуя развитию рекристаллизации. Полученная устойчивая дисперсная наноструктурированная бронза сохраняет стабильность до 550 °С. Сделано заключение, что сочетание небольшого подогрева хромоциркониевой бронзы с деформацией при ДКУП повысит термическую стабильность исследуемой бронзы при последующем нагреве.

Работа выполнена по плану РАН (тема «Структура», № г. р. 01201064335), Проекта Президиума РАН № 12-П-2-1030.

**THERMAL STABILITY  
OF CHROMIUM-ZIRCONIUM BRONZE  
SUBJECTED TO CHANNEL-ANGULAR PRESSING  
AND AGING**

N. Yu. Frolova<sup>1</sup>, V. I. Zel'dovich<sup>1</sup>, I. V. Khomskaya<sup>1</sup>,  
A. E. Kheifetz<sup>1</sup>, E. V. Shorokhov<sup>2</sup>,  
P. A. Nasonov<sup>2</sup>, A. A. Granskii<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metal Physics, Ural Division of RAS, Ekaterinburg,  
Russia

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

High energy open the possibility of production of bulk nanostructured materials for microsecond intervals by pulsed energy sources. Dynamic channel-angular pressing (DCAP) is one such means of influence. DCAP method was proposed at the Russian Federal Nuclear Center – VNIITF Acad. E.I. Zababakhin. DCAP is a high speed ( $10^4$ – $10^5$  s<sup>-1</sup>) the method of deformation. Found that under dynamic channel-angular pressing formation of nanostructured state in bronze (alloy 1: Cu-0.09Cr-0.08Zr, alloy 2: Cu-0.14Cr-0.04Zr) occurs as a result of fast processes of fragmentation and dynamic polygonization, thereby increasing the microhardness. When DCAP of chromium-zirconium bronze arises submicrocrystalline structure with an average crystallite size of 200 nm, the microhardness increases by 2.4 times.

Study changes microhardness of alloy 2 during aging after rolling to 96%, after DCAP in 4 passages and after quenched shows that the aging of the alloy 2 improves its undeformed microhardness of 280 MPa, and the deformation by rolling in a ~2-fold more 550 MPa. Aging is deformed by rolling of the alloy leads to a further increase in the microhardness of 350 MPa. DCAP increases the microhardness of the alloy (850 MPa), but the extra aging only slightly increases the microhardness. Thus, the obtained data allowed to separate the effects due to the increase of microhardness actual deformation (550 MPa) and aging (~300 MPa). It is shown that the process is accompanied by a bronze DCAP decomposition.

Found that in the early stages of aging nanoscale particles fixed dislocations, impeding the formation of centers of recrystallization. In the later stages of chromium particles delay migration of large-borders, preventing the development of recrystallization. The resulting stable dispersion nanostructured bronze maintains stability up to 550°C. Concluded that the combination of a small heating chromium-zirconium bronze with deformation at DCAP increase thermal stability study of bronze upon subsequent heating.

This work was supported by RAS theme «Structure» (g.r. 01201064335) and partially supported by projects of Presidium of RAS (12-P-2-1030).

4-64

### УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

К. В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Рассматриваются модели полуэмпирических уравнений состояния вещества в широкой области давлений и температур на фазовой диаграмме. Представлены результаты расчетов термодинамических характеристик металлов (бериллий, алюминий, вольфрам и др.) с учетом полиморфных фазовых переходов, плавления и испарения. Дано сравнение с имеющимися экспериментальными данными при высоких плотностях энергии.

### EQUATIONS OF STATE FOR METALS AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

K. V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Models of semiempirical equations of state for matter over a broad region of pressures and temperatures in phase diagram are considered. Calculated results are presented for thermodynamic characteristics of metals (beryllium, aluminum, tungsten and others) with taking into account polymorphic phase transformations, melting and evaporation effects. A comparison is done with available experimental data at high energy densities.

4-65

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ МЕДИ И БРОНЗЫ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТОДОМ ДКУП

И. В. Хомская<sup>1</sup>, В. И. Зельдович<sup>1</sup>, Е. В. Шорохов<sup>2</sup>, Н. Ю. Фролова<sup>1</sup>, А. В. Макаров<sup>3</sup>, А. Э. Хейфец<sup>1</sup>, П. А. Насонов<sup>2</sup>, К. В. Гаан<sup>2</sup>, Г. В. Майкова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия<sup>2</sup>Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия<sup>3</sup>Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: khoms kaya@imp.uran.ru

Высокоэнергетические воздействия открывают возможность создания объемных наноструктурированных

(НС) материалов в течение микросекундных интервалов времени за счет импульсных источников энергии, без использования энергоемкого и дорогостоящего прессового оборудования. Метод динамического канально-углового прессования (ДКУП), разработанный в РФЯЦ–ВНИИТФ, позволяет реализовать сверхвысокие скорости (до  $10^5$  с<sup>-1</sup>) деформирования материалов. Показано, что на результирующую структуру меди при ДКУП оказывают влияние высокоскоростная деформация сдвига, ударно-волновая деформация сжатия и повышение температуры. Установлено, что формирование НС-меди (99,8%Cu) при ДКУП происходит в результате высокоскоростных циклических процессов фрагментации, динамической полигонизации и динамической рекристаллизации. Показано, что структурообразование в бронзе (Cu-0,09%Cr-0,08%Zr) при ДКУП происходит за счет фрагментации, динамической полигонизации и частичного распада пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора меди с выделением наночастиц упрочняющих фаз. Методами кинетического микроиндентирования были исследованы твердость, удельная контактная твердость и величина упругого восстановления НС-бронзы, полученные результаты сопоставлены с аналогичными характеристиками НС-меди. Показано, что деформирование меди методом ДКУП обеспечивает увеличение твердости по Виккерсу, Мартенсу и твердости вдавливания в 1,4–1,5 раза по сравнению с исходным крупнокристаллическим состоянием. Более значительный рост указанных характеристик прочности (в 2,4–2,8 раза) при повышении контактного модуля упругости на 21–27% достигается при ДКУП бронзы. Исследование структуры показало, что существенное упрочнение бронзы, по сравнению с медью, обусловлено выделением наночастиц ( $\leq 5$  нм) хромовой и циркониевой фаз при динамическом деформационном старении в процессе ДКУП. Таким образом, установлена повышенная способность НС-меди и, особенно, НС-бронзы выдерживать механические контактные нагрузки без пластического деформирования по сравнению с исходным крупнокристаллическим состоянием.

Работа выполнена по плану РАН тема «Структура» (No г. р. 01201064335) и при частичной поддержке проектов Президиума РАН (12-П-2-1030) и УрО РАН (14-2-НП-111).

### STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED COPPER AND BRONZE, OBTAINED BY HIGH-RATE DEFORMATION BY MEANS OF DCAP METHOD

I. V. Khoms kaya<sup>1</sup>, V. I. Zeldovich<sup>1</sup>, E. V. Shorokhov<sup>2</sup>, N. Yu. Frolova<sup>1</sup>, A. V. Makarov<sup>3</sup>, A. E. Kheifets<sup>1</sup>, P. A. Nasonov<sup>2</sup>, K. V. Gaan<sup>2</sup>, G. V. Maikova<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Metal Physics, Ural Division of RAS, Ekaterinburg, Russia<sup>2</sup>Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia<sup>3</sup>Institute of Engineering Science, Ural Division of RAS, Ekaterinburg, Russia

E-mail: khoms kaya@imp.uran.ru

The high-energy actions lead to possibility of obtaining the bulk nanostructured (NS) materials during micro-second intervals of time by means of pulse source of energy, without using of energy-intensive and expensive press equipment. The method of dynamic channel-angular pressing (DCAP), developed in VNIITF, allows to use the ultra-high speed (up to  $10^5 \text{ sec}^{-1}$ ) deformation of materials. It is shown that the high-speed shear deformation, shock wave compression deformation and temperature rise have an influence on the resulting structure of copper at DCAP. The formation of the NS-copper (99,8% Cu) at DCAP occurs as a result of high-speed cyclical processes of fragmentation, dynamic polygonization and dynamic recrystallization. It is shown that the structure formation in bronze (Cu-0,09%Cr-0,08%Zr) at DCAP is due to fragmentation, dynamic polygonization and partial decomposition of the supersaturated  $\alpha$ -solid solution of copper, an also due to segregations of nanoparticles and hardening phases. The hardness, the normalized contact hardness and the elastic recovery value of NS-bronze were investigated by kinetic microindentation methods, the results were compared with similar characteristics of NS-copper. It is shown that deformation of copper by DCAP provides an increase Vickers hardness, Martens hardness and hardness of indentation in 1.4–1.5 times in comparison with the initial coarse-grained state. A more significant increase of these strength characteristics (in 2.4–2.8 times) with increasing of contact elastic modulus for 21–27% achieved at DCAP of bronze. Investigation of the structure revealed that so substantial hardening of bronze (compared to copper) due to the segregation of nanoparticles ( $\leq 5 \text{ nm}$ ) of chromium and zirconium phases during the dynamic aging at deformation by DCAP. Thus, it is found, that the NS-copper and especially NS-bronze have an increased ability to withstand of mechanical contact stresses without of plastic deformation, in compared with the initial coarse-grained state.

This work was supported by RAS theme «Structure» (g. r. 01201064335) and partially supported by projects of Presidium of RAS (2-P-2-1030) and Ural Division of RAS (14-2-NP-111).

4-66

#### УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ 30ХГСА ПРИ НАГРУЖЕНИИ В ОБЛАСТЬ ТВЕРДОФАЗНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Д. М. Шалковский, А. В. Петровцев,  
Д. А. Варфоломеев, М. Н. Якимова,

В. В. Дремов, Е. Е. Миронова, Е. А. Козлов,  
В. И. Таржанов, С. А. Бричиков, А. В. Ольховский,  
Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. Е. Ширококов,  
А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, А. С. Майорова

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

Представленный доклад посвящен анализу особенностей поведения закаленной стали 30ХГСА HRc35...40 в условиях взрывного и ударно-волнового

нагружения. Цель данной работы – уточнение построенной ранее модели [1] для обеспечения аккуратного описания при численном моделировании реальной структуры волн напряжений в этом материале, включая амплитуды волн многоволновой (упругий предвестник, фазовый предвестник, основная пластическая волна) конфигурации и характера его разрушения.

Приводятся постановки экспериментов по регистрации двух- и трехволновых конфигураций волн напряжений с клиновыми (фотохронографический метод оптического рычага) и плоскими (лазерно-интерферометрические измерения методами Фабри-Перо, PDV и VISAR), результаты которых использованы для калибровки моделей.

Основу термодинамического описания свойств стали 30ХГСА в разработанной модели составляет многофазное уравнение состояния железа, представленное в [2] и кинетические уравнения релаксационного типа, описывающие фазовые изменения в частицах материала в зависимости от степени метастабильности реализующихся состояний [3]. Они дополнены определяющими соотношениями для сдвиговых напряжений и уравнениями кинетики роста повреждений, учитывающих историю изменений фазового состояния материала. Новая экспериментальная информация использована для уточнения параметров всех указанных составляющих модели.

#### Литература

1. А. В. Петровцев, Е. А. Козлов, В. Н. Ногин, В. И. Таржанов, Д. А. Варфоломеев, Д. Г. Панкратов, И. В. Теличко, А. В. Воробьев, Д. М. Шалковский. Расчетно-теоретическое описание динамических свойств закаленной стали 30ХГСА на основе экспериментов по взрывному нагружению в области протекания твердофазного превращения. X Забабахинские Научные Чтения, г. Снежинск Челябинской области, Россия. 15–19 марта 2010, с. 223 (тезисы).
2. Dremov V. V., Kutepov A. L., Petrovtsev A. V., and Sapozhnikov A. T. Equation of state and phase diagram of iron. Shock Compression of Condensed Matter-2001. AIP Conference Proceedings #620. Editors M. D. Furnish, N. N. Thadhani, and Y. Horie. American Institute of Physics. 2002. P. 87–90.
3. Г. А. Задорожный, Г. В. Коваленко, А. В. Петровцев. Моделирование полиморфного  $\alpha$ - $\epsilon$  превращения железа в широком диапазоне состояний. VII Забабахинские Научные Чтения, г. Снежинск Челябинской области, Россия. 8–12 сентября 2003, с. 183 (тезисы, полный текст <[www.vniitf.ru/rig/konfer/7zst/reports/s5/5-45.pdf](http://www.vniitf.ru/rig/konfer/7zst/reports/s5/5-45.pdf)>).

#### AN ELABORATED MODEL OF 30HGSA STEEL UNDER SHOCK LOADING IN THE REGION OF THE SOLID-PHASE TRANSFORMATION

D. M. Shalkovsky, A. V. Petrovtsev, D. A. Varfolomeyev,  
M. N. Yakimova, V. V. Dremov, E. E. Mironova,  
E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, S. A. Brichikov,  
A. V. Olkhovsky, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov,  
A. E. Shirobokov, A. V. Pavlenko,  
S. N. Malyugina, A. S. Mayorova

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

The paper discusses the response of hardened 30HGSA HRc35...40 steel to explosive and shock loading. The

objective of our work was to elaborate an earlier model [1] so as to accurately reproduce the actual structure of stress waves in the material, including the amplitudes of waves in the multi-front configuration (elastic precursor, phase precursor and main plastic wave) and the fracture pattern.

We describe the setup of experiments with wedge (photochronographic optic lever measurements) and plane (Fabry-Perot, PDV and VISAR laser-interferometric measurements) samples which were taken to register the two- and three-front configurations of stress waves. Their results were used for model normalization.

In the developed model, the thermodynamic description of 30HGSA steel properties is based on a multiphase equation of state for iron [2] and a kinetic equation of relaxation type, which describes phase transformations in material particles with respect to the degree of metastability in the implemented states [3]. They are complemented with constitutive relations for shear stresses and equations which describe damage growth kinetics with account for phase state history. The new experimental results were used to adjust parameters for all the above components of the model.

## References

1. A. V. Petrovtsev, E. A. Kozlov, V. N. Nogin, V. I. Tarzhanov, D. A. Varfolomeyev, D. G. Pankratov, I. V. Telichko, A. V. Vorobiov, and D. M. Shalkovsky. Computational-theoretical description of the dynamic properties of hardened 30HGSA steel from experimental data on shock loading in the region of solid-phase transition. Zababakhin Scientific Talks X, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russia, 15–19 March 2010, Book of Abstracts, p. 233.
2. V. V. Dremov, A. L. Kutevov, A. V. Petrovtsev, and A. T. Sapozhnikov. Equation of state and phase diagram of iron. Shock Compression of Condensed Matter – 2001, AIP Conference Proceedings #620. Editors M. D. Furnish, N. N. Thadhani, and Y. Horie, American Institute of Physics, 2002, P. 87–90.
3. G. A. Zadorozhny, G. V. Kovalenko, and A. V. Petrovtsev. Simulation of the polymorphous  $\alpha$ - $\gamma$  transformation in iron in a wide range of states. Zababakhin Scientific Talks VII, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russia, 8–12 September 2003, p. 183 (Abstract, full text <[www.vniitf.ru/rig/konfer/7zst/reports/s5/5-45.pdf](http://www.vniitf.ru/rig/konfer/7zst/reports/s5/5-45.pdf)>).

4-67

## УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕЙТЕРИДОВ Ti И Zr В УСЛОВИЯХ НАГРЕВА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ ДО 1200 °C

В. Г. Шевченко<sup>1</sup>, В. Ю. Давыдов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт химии твердого тела УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>ОАО «Научно-исследовательский машиностроительный  
институт», Москва, Россия

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

Материалы на основе гидридов и дейтеридов переходных металлов представляют интерес в качестве эффективных энергоносителей. Однако, не все физико-химические свойства и характеристики этих материалов изучены в достаточной мере.

В работе представлены результаты изучения процесса взаимодействия с кислородом воздуха порошков

TiD и ZrD<sub>1,8</sub> в условиях нагрева до 1200 °C со скоростью 10 град/мин.

Для получения дейтеридов использовали металлы с содержанием основного компонента не ниже 99,9%. Металлы насыщали из газовой фазы дейтерием, очищенным пропусканием через палладиевый фильтр. Перед насыщением металлы отжигали в течении 1 часа при температуре не ниже 700 °C в вакуумной печи с вольфрамовым нагревателем. Насыщение проводилось в той же печи с водоохлаждаемым кожухом. Процесс насыщения проходил при переменной температуре. Концентрацию дейтерия определяли весовым методом. Таким образом были получены TiD<sub>2</sub> и ZrD<sub>1,8</sub> с рентгеновской плотностью 3,8475 г/см<sup>3</sup> и 5,638 г/см<sup>3</sup> – соответственно.

Окисление циркония начинает фиксироваться на кривой ТГ при температуре около 400 °C и заканчивается при 900 °C образованием ZrO<sub>2</sub>. Максимальной скорости процесс достигает около 700 °C. Дейтерид циркония состава ZrD<sub>1,8</sub> начинает взаимодействие при температуре на 10–15° выше, но его окисление заканчивается приблизительно на 100° ниже. Такая же картина характерна для Ti и его дейтерида. Отличие состоит лишь в том, что температуры начала окисления, максимальной скорости процесса и его окончания смещаются в сторону более высоких значений. Так максимальной скорости тепловыделения образец достигает при нагреве до 970 °C.

С использованием термокинетических характеристик, полученных в инертной среде, проанализированы причины влияния абсорбированного водорода на устойчивость Ti и Zr в воздушной среде в условиях программированного нагрева на воздухе до 1200 °C.

Рассмотрено изменение морфологии частиц в ходе протекающих процессов.

## SHAPE DEUTERIDOV Ti AND Zr IN AIR AT THE TEMPERATURE OF <1200 °C

V. G. Shevchenko<sup>1</sup>, V. Yu. Davydov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chemistry of Solid State Institute UrO RAS, Yekaterinburg,  
Russia

<sup>2</sup>Mecanical Engineering Research Institute, Moscow, Russia  
E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

Materials based on hidridov and deuteridov of transition metals are of interest as energy efficient. However, not all of the physical and chemical properties and characteristics of the materials studied.

The paper presents the results of studying the process of interaction with air oxygen powders TiD and ZrD<sub>1,8</sub> in a 1200 °C with a speed up to 10 deg/min.

To obtain the deuteridov used the metals with the content of the basic component not less than 99.9%. Metals saturated gas phase of deuterium, purified through filter. The saturation of the metal burned during 1:0 at temperature not more low 700 °C in vacuum furnaces with a tungsten heater. Saturation in the same furnace with vodoohlaždaemym casing. The process of with variable saturation temperature. Deuterium concentration determined weight method. Thus received TiD<sub>2</sub> and ZrD<sub>1,8</sub>, with the x-ray density 3.8475 g/cm<sup>3</sup> and 5,638 g/cm<sup>3</sup> respectively.

Oxidation zirconium begins to be recorded on a curve at about 4000 s and ends with 900 education  $ZrO_2$ . maximum speed of process reaches about 700 °C. Zirconium deuteride composition  $ZrD_{1.8}$  begins interacting with the temperature at 10–15° above, but its oxidation is approximately 100° below. The same picture applies to Ti and its deuteride. The difference is that the temperature started to speed the process of oxidation, and the move toward higher values. So the maximum speed of the heat the sample reaches when heated to 970 °C.

Using the thermokinetic characteristics obtained in an inert environment, analysed the impact of the absorbed hydrogen on the stability of Ti and Zr in the air in a programmed heating in air to 1200 °C.

Considered change of morphology of particles during the proceeding processes.

4-68

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО ОБЖАТИЯ МЕДНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ АМПУЛ

В. А. Аринин, В. В. Бурцев, А. Л. Михайлов,  
В. Д. Орлов, А. М. Подурец, А. В. Руднев,  
М. А. Сырунин, И. А. Терешкина, Б. И. Ткаченко,  
М. И. Ткаченко, И. Р. Трунин,  
А. П. Цой, И. В. Шиберин

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

Представлены результаты экспериментов по обжатию сферических медных ампул (толщина стенки ампулы – 11 мм), заполненных водородом при давлении 30 атм и воздухом. В экспериментах на ускорителе У-70 ИФВЭ (г. Протвино) и бетатронном комплексе ИФВ ВНИИЭФ проведены протонографическая и рентгенографическая регистрации процессов схождения медных ампул.

Приведены результаты металлографического анализа сохраненных в экспериментах фрагментов ампул.

Результаты регистрации процессов схождения оболочек к центру и постопытные металлографические исследования сравниваются с численным моделированием, выполненным с использованием дислокационной модели прочности и модели вязкого откольного разрушения.

#### EXPERIMENTAL STUDY AND CALCULATION MODELING OF THE EXPLOSIVE COMPRESSION OF SPHERICAL COPPER AMPULES

V. A. Arinin, V. V. Burtsev, A. L. Mikhailov, V. D. Orlov,  
A. M. Poduretc, A. V. Rudnev, M. A. Syrunin,  
I. A. Tereshkina, B. I. Tkachenko, I. R. Trunin,  
A. P. Tcoi, I. V. Shiberin

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

Consideration is given to the results of experiments on compression of spherical copper ampules (ampule wall

thickness is 11 mm) filled with hydrogen under the pressure of 30 atm and air. In the experiments, U-70 IHEP accelerator (the city of Protvino) and IFV betatron complex (VNIIEF) were used for protonographic and X-ray registration of copper ampules convergence.

Metallographic analysis results are given for ampule fragments recovered in the experiment.

Results of registering convergence of shells to the center and results of post-experiment metallographic analysis are compared to numerical modeling performed using the dislocational strength model and the viscous spall fraction model.

4-69

#### ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ МАНГАНИНОВЫМИ ДАТЧИКАМИ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИХСЯ И РАСХОДЯЩИХСЯ УДАРНО-ИЗЭНТРОПИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

А. О. Борщевский, Е. А. Козлов, А. И. Клёнов,  
А. В. Петровцев, В. Н. Ногин, К. С. Сидоров,  
Д. М. Шалковский, Д. Т. Юсупов

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

В дополнение к [1] представлены постановки и результаты взрывных экспериментов с многоканальной регистрацией методикой низкоомных манганиновых датчиков профилей волн напряжений  $\sigma_R(t)$  в преградах из мрамора при их нагружении сферически сходящимися или расходящимися ударно-изэнтропическими волнами.

Проведено расчетно-теоретическое моделирование изучаемых волновых процессов. Разработан алгоритм внесения поправок в показания датчиков, учитывающий их деформацию в сходящихся и расходящихся ударных волнах.

#### Литература

1. А. О. Борщевский, Е. А. Козлов, А. В. Петровцев, Д. Т. Юсупов. Постановка и результаты опыта по регистрации множественных откольных разрушений в пластине из аустенитной стали 12X18H10T с регистрацией профилей продольных напряжений в преграде из мрамора по многоканальной методике манганиновых датчиков, Доклад на XI Международной конференции «Забабахинские Научные Чтения», 16–20 апреля 2012 года, Снежинск, Челябинская обл., Россия, с. 233–234.

#### SPECIAL FEATURES OF REGISTRATION BY MANGANIN GAGES OF STRESS WAVES IN SPHERICALLY CONVERGING AND DIVERGING SHOCK-ISENTROPIC WAVES

A. O. Borschevsky, E. A. Kozlov, A. I. Klenov,  
A. V. Petrovstev, V. N. Nogin, K. S. Sidorov,  
D. M. Shalkovsky, D. T. Yusupov

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

Experimental setups and results of explosion experiments wherein low-resistivity manganin gages were used to perform multi-channel registration of stress waves profiles  $\sigma_R(t)$  in marble barriers under their loading by spherically converging or diverging shock-isentropic waves are provided in addition to [1].

The registered wave processes were numerically simulated. The algorithm to correct readings of gages with the regard for their deformation in the converging and diverging shock waves was developed.

## References

1. A. O. Borschevsky, E. A. Kozlov, A. V. Petrovtsev, D. T. Yusupov. Setup and results of experiment aimed to register multiple spall fractures in the austenitic 12Kh18N10T steel plate with registration of longitudinal stress profiles in the marble barrier using multichannel manganin-gauges technique, Int. Conf. on High Energy Density Physics ZABABAKHIN SCIENTIFIC TALKS – 2012, Snezhinsk, Russia, April 16–20, 2012, pp. 233–234.

4-70

## О СОВМЕЩЕНИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННОЙ МЕТОДИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТЫХ МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ В ИНТЕРЕСАХ ВЕРИФИКАЦИИ И КАЛИБРОВКИ СОВРЕМЕННЫХ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Е. А. Козлов, Д. Г. Панкратов,  
Д. П. Кучко, М. А. Ральников,  
А. Г. Попцов, А. К. Якунин

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

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

На примере изучения ступенчатых образцов из аустенитной стали 12X18N10T, магния и нелегированного U при их низко- и высокоинтенсивном ударно-волновом нагружении в диапазоне  $\sigma_{xx} = 20\text{--}250$  ГПа продемонстрирована эффективность совмещения в каждом взрывном эксперименте измерений по двум методикам, а именно: фотоэлектрической (ФЭМ) и лазерно-гетеродинной (ЛГМ).

В области низких нагрузок, пока «индикаторная жидкость» работает как оконный материал, сохраняя прозрачность, лазерно-интерферометрически регистрируется изменение во времени скорости движения границы раздела материала изучаемого образца и вещества-индикатора. В области высокоинтенсивных нагрузок обеспечивается устойчивая работа фотоэлектрической методики [1–3]. Лазерно-гетеродинной методикой непрерывно во времени регистрируется при этом скорость движения фронта стационарной ударной волны в индикаторном веществе, вплоть до момента его догона первой характеристикой веера волны разрежения. В промежуточной области нагрузок работают обе методики. Лазерно-гетеродинная методика фиксирует начальный участок профиля скорости контактной гра-

ницы образец-индикатор, позволяя независимо проконтролировать и уточнить параметры ударного сжатия изучаемого образца.

Предложенное и апробированное на образцах из стали 12X18N10T и магния техническое решение позволило преодолеть существовавшие в литературе противоречия в результатах измерений продольных и объемных скоростей звука в ударно-сжатых до 100–150 ГПа материалах, в частности, в некоторых акти-нидах.

## Литература

1. E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, V. M. Yelkin, V. N. Mikhaylov, Application of Optical Analyzer Technique for Measurements of Sound Velocities in Shock-Compressed Al-Mn Alloy for Calibration of Recent Elastic-Viscous-Plastic Models. Int. Conf. on High Energy Density Physics ZABABAKHIN SCIENTIFIC TALKS – 2005, Snezhinsk, Russia, September 5–10, 2005, Melville, New York, 2006, AIP Conference Proceedings, Vol. 849, pp. 406–410.
2. Е. А. Козлов, Д. Г. Панкратов, О. В. Ткачев, А. К. Якунин. Измерение скоростей звука в аустенитной нержавеющей стали 12X18N10T в диапазоне напряжений до 200 ГПа, Международная конференция УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В КОНДЕНСИРОВАННОМ ВЕЩЕСТВЕ (SWCM-2012), 16–21 сентября 2012, Киев, Украина, стр. 263–265.
3. Е. А. Козлов, Д. Г. Панкратов, О. В. Ткачев, А. К. Якунин. Скорости звука и сдвиговая прочность ударно-сжатого урана в диапазоне 10–250 ГПа, 19-я Европейская конференция по разрушению (ECF19), 26–31 августа 2012, Казань, Россия, CD ROM, № 603, 6 стр.

## ON COMBINING THE OPTICAL ANALYZER AND LASER HETERODYNE TECHNIQUES FOR MEASURING SOUND VELOCITIES IN SHOCK-COMPRESSED METALS AND ALLOYS FOR VERIFICATION AND CALIBRATION OF MODERN ELASTIC-VISCOUS-PLASTIC MODELS

E. A. Kozlov, D. G. Pankratov, D. P. Kuchko,  
M. A. Ralnikov, A. G. Poptsov, A. K. Yakunin

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

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

Stepped samples made of austenitic 12Kh18N10T steel, magnesium, and unalloyed uranium were loaded by both low- and high-intensity shock waves in the range of  $\sigma_{xx} = 20\text{--}250$  GPa. In each explosive experiment, two measurement techniques, namely the optical analyzer and laser heterodyne techniques, were used. Effectiveness of combining these two techniques was demonstrated.

In the region of low-intensity loading, laser interferometry is used to register the velocity vs. time profile of the interface between the test sample material and the “indicator substance”. This registration is performed during a full period of time while the “indicator fluid” remains transparent and acts as a window material. In the region of high-intensity loading, optical analyzer technique ensures reliable registration [1–3]. At the same time, laser heterodyne technique is used to continuously register the velocity of steady-state shock wave front in indicator substance up to the moment this front is caught up by the first characteristic of rarefaction wave. In the intermediate region, laser

heterodyne technique is used to record the initial velocity of the interface between investigated material and indicator substance. This makes it possible to independently control and verify parameters of the shock compression of test sample.

Technical solution was proposed and approved using the samples made of 12Kh18N10T steel and magnesium. Realization of this solution allowed us to resolve differences in literature data on the longitudinal and volumetric sound velocities measured in shock-compressed (up to 100–150 GPa) materials, particularly in some actinides.

## References

1. E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, V. M. Yelkin, V. N. Mikhaylov, Application of Optical Analyzer Technique for Measurements of Sound Velocities in Shock-Compressed Al-Mn Alloy for Calibration of Recent Elastic-Viscous-Plastic Models. Int. Conf. on High Energy Density Physics ZABABAKHIN SCIENTIFIC TALKS – 2005, Snezhinsk, Russia, September 5–10, 2005, Melville, New York, 2006, AIP Conference Proceedings, Vol. 849, pp. 406–410.
2. E. A. Kozlov, D. G. Pankratov, O. V. Tkachev, A. K. Yakunin. Measurements of Sound Velocities in 12Kh18N10T Austenitic Steel in the Range of Longitudinal Stress  $\sigma_{xx}$  up to 200 GPa, Int. Conference SHOCK WAVES IN CONDENSED MATTER (SWCM-2012), September 16–21, 2012, Kiev, Ukraine, pp. 263–265.
3. E. A. Kozlov, D. G. Pankratov, O. V. Tkachyov, A. K. Yakunin. Sound Velocities and Shear Strength of Shocked U within 10–250 GPa, 19th European Conference on Fracture – Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety, August 26–31, 2012, Kazan, CD ROM, paper 603, 6 pages.

и бромида калия ( $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{KBr}$ , метод ВТУС), помещенных между медными пластинами, выполнявшими роль стенок ампулы сохранения, до давлений 36 и 50 ГПа. Аналогичные эксперименты, для сравнения, проведены по «классической» схеме сжатия смеси нитрида кремния и медного порошка ( $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}$ ). Нагружение образцов производилось алюминиевыми ударниками, разогнанными продуктами взрыва. С использованием манганиновых датчиков измерены профили давления перед входом ударной волны в образец и после выхода из образца. Установлено, что для используемых конфигураций экспериментальныхборок давление в образцах, набираемое за счет циркуляций ударной волны, достигает требуемого значения до начала разгрузки. На основании оценок скорости теплообмена между компонентами показано, что за время существования высокого давления в смесевых образцах успевает установиться термическое равновесие. В рамках однопериодической модели среды построены уравнения состояния образцов и рассчитаны температуры их ударного сжатия. С использованием уравнений состояния проведено численное моделирование эксперимента, показавшее, что его результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, что, в свою очередь, указывает на возможность использования построенных уравнений состояния образцов для прогнозирования картины волновых взаимодействий в экспериментальной сборке при изменении ее конфигурации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-02-00989-а.

4-71

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ $P$ , $T$ -УСЛОВИЙ, РЕАЛИЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ УДАРНОМ СЖАТИИ НИТРИДА КРЕМНИЯ В ПЛОСКИХ АМПУЛАХ СОХРАНЕНИЯ

В. В. Якушев, А. В. Уткин, А. Н. Жуков,  
Д. В. Шахрай, В. В. Ким

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,  
Россия

E-mail: yakushev@icp.ac.ru

Повышенный интерес к нитриду кремния в последнее время связан с открытием его новой модификации ( $\gamma$ -фазы), образующейся при высоких давлениях и температурах и обладающей твердостью, сравнимой с твердостью стшовита. Трудности наработки  $\gamma$ -фазы стимулируют поиск оптимальных условий для ее получения, в том числе ударно-волновыми методами. Проводимые нами исследования зависимости степени превращения нитрида кремния от условий ударного сжатия требуют четкого контроля этих условий. В настоящей работе выполнено определение  $P$ ,  $T$ -условий реализующихся в образцах из нитрида кремния при их нагружении по методу высокотемпературного ударного сжатия (ВТУС).

В рамках работы проведены эксперименты по ударному сжатию смесевых образцов из нитрида кремния

## THE DETERMINATION OF $P$ , $T$ -CONDITIONS GENERATED AT HIGH TEMPERATURE SHOCK COMPRESSION OF SILICON NITRIDE IN PLANAR RECOVERY AMPOULES

V. V. Yakushev, A. V. Utkin, A. N. Zhukov,  
D. V. Shakhrai, V. V. Kim

The Institute of Problems of Chemical Physics RAS,  
Chernogolovka, Russia

E-mail: yakushev@icp.ac.ru

The growing interest in silicon nitride is caused by the discovery of its new modification ( $\gamma$ -phase), which forms at high pressure and temperature and has a high hardness comparable to that of stishovite. The difficulties in synthesis of  $\gamma$ -phase stimulate a search of optimal conditions for its preparation, also by means of shock-wave methods. The research of the influence of these conditions, arisen from shock compression, on transformation degree requires their accurate control. In the present work we determined  $P$ ,  $T$ -conditions generated in silicon nitride subjected to the loading by high temperature shock compression method (HTSC).

The loading of silicon nitride and potassium bromide mixture samples ( $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{KBr}$ , HTSC method) was performed at 36 and 50 GPa. The samples were placed between two copper plates used as an imitation of top and bottom sides of plane recovery ampoule. The loading of the samples was carried out by aluminium flyers accelerated by explosion products. For the comparison, the same experiments were performed by «classical» scheme of shock compression of

substance in a mixture with copper powder ( $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}$ ). Using manganin gauges shock wave profiles were measured in front of the sample and behind it in the direction of wave propagation. The measurements indicated that for chosen configurations of experimental setups the reverberations of shock wave in the samples had enough time to be completed and the pressure in the samples achieved its maximum value before unloading. Estimations of the heat transfer rate between the components of the samples showed that during high pressure pulse the thermic equilibrium had enough time to be settled. On the basis of one-temperature model of a medium the calculations of the equations of state (EOS) and estimations of shock compression temperatures of the samples were made. Using the EOSs a simulation of the experiments was performed. A good agreement with experimental data pointed to the possibility of the use of calculated equations of state for the prediction of the scheme of wave interactions in experimental setup at different variants of its configuration.

The work was supported by RFBR grant No 12-02-00989-a.

и клубков дислокаций. С удалением от поверхности образца обнаруживается присутствие полосовой структуры и рекристаллизованных зерен. При распространении ударной волны вдоль направлений  $\langle 100 \rangle$  в приповерхностных слоях наблюдается образование четкой ячеистой структуры. В средних слоях наблюдаются микрополосы сдвига и деформационные дефекты, обнаруживающие контраст, аналогичный контрасту от дефектов упаковки. Изучены кристаллографические особенности образующейся деформационной структуры. Предложено объяснение влияния ориентации на образование ячеистой дислокационной структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 12-П-2-1009 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии».

**INFLUENCE OF THE ORIENTATION  
OF A COPPER SINGLE CRYSTAL  
ON THE FORMATION AND THE EVOLUTION  
OF A DISLOCATION CELL STRUCTURE  
UNDER LOADING BY SPHERICAL CONVERGING  
SHOCK WAVES**

A. V. Dobromyslov<sup>1</sup>, N. I. Taluts<sup>1</sup>, E. A. Kozlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

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

E-mail: Dobromyslov@imp.uran.ru

4-72

**ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ  
МОНОКРИСТАЛЛА МЕДИ НА ОБРАЗОВАНИЕ  
И ЭВОЛЮЦИЮ ЯЧЕИСТОЙ  
ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ  
ПРИ НАГРУЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКИ  
СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ**

А. В. Добромыслов<sup>1</sup>, Н. И. Талуц<sup>1</sup>, Е. А. Козлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

E-mail: Dobromyslov@imp.uran.ru

Применение сферически сходящихся ударных волн для нагружения монокристаллов позволяет с помощью проведения только одного эксперимента получить данные об особенностях деформационной структуры для разных ориентаций. Целью данной работы было изучение особенностей образования и эволюции ячеистой дислокационной структуры в зависимости от кристаллографического направления распространения ударных волн в монокристалле меди. Для исследования был подготовлен шар диаметром 34 мм. Изучение структуры сохраненного после ударного воздействия образца было проведено методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что образование ячеистой дислокационной структуры зависит как от кристаллографического направления исходного монокристалла, так и от положения слоя в образце по радиусу. Обнаружено, что при распространении ударной волны вдоль направлений  $\langle 110 \rangle$  образование ячеистой структуры не происходит. В приповерхностных слоях деформационная структура состоит из хаотически распределенных дислокаций

The application of spherical converging shock waves for loading of single crystals allows for obtaining data on features of deformation structure for single crystals of different orientations during only one experiment. This work was aimed at studying the features of the formation and the evolution of dislocation cell structure depending on the crystallographic direction of the propagation of shock waves in a copper single crystal. Copper single crystal in the form of a sphere, 34 mm in diameter, was loaded by a spherical converging detonation waves. The investigation of the structure of the recovered sample was performed using the X-ray diffraction analysis and transmission electron microscopy. It is established that the formation of dislocation cell structure depends on both the crystallographic direction of the single-crystal, and the position of layer on radius. It is revealed that dislocation cell structure doesn't form at propagation of a shock wave along the directions  $\langle 110 \rangle$ . In near-surface layers the deformation structure consists of chaotically distributed dislocations and tangles of dislocations. With the distance from the surface of the sample, band structure and the recrystallized grains are found. In the case of the propagation of a shock wave along the  $\langle 100 \rangle$  directions, the formation of dislocation cell structure is observed in near-surface layers. Deformation defects having the contrast typical of that of stacking faults are also present in the middle layers. Crystallographic features of formed deformation structure are studied. The explanation of influence of orientation on the formation of dislocation cell structure is suggested.



**Секция 5**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ  
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
И РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ**

---

**Section 5**

**SCIENTIFIC BASES  
OF NUCLEAR POWER ENGINEERING  
AND NUCLEAR MEDICINE**



## КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В. А. Симоненко

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

В настоящее время областью использования ядерной энергетики (ЯЭ), в основном, является производство электричества. В отдельных случаях частично используется энергия в виде тепла. В мировой энергетике, как и в России, доля ЯЭ в электрогенерации составляет примерно 16%, уступая компонентам, использующим ископаемое топливо органического происхождения. Ряд причин не позволил ЯЭ занять лидерство в производстве энергии и препятствует этому в будущем. По современным представлениям энергетика, основанная на потенциально доступной энергии деления тяжелых ядер, может удовлетворить потребности цивилизации в течение несколько тысячелетий. Осуществление таких возможностей требует решения ряда научных, технологических, экономических и даже социально-политических проблем.

Условно такие проблемы можно объединить в четыре укрупнённые, тесно связанные группы: (1) научно-технологические проблемы, (2) производственно-экономические, (3) проблемы безопасности и экологии и (4) проблемы нераспространения ядерно-оружейных материалов и технологий. В представляемой работе основное внимание уделяется тем проблемам, решение которых важно для расширенного развития ЯЭ в ближнесрочной и среднесрочной перспективах.

Для современной ЯЭ, основанной на тепловых реакторах (ТР) с легководным теплоносителем, актуальными являются проблема надёжного обеспечения безопасности и проблемы эффективной (с позиций технологий и экономики) утилизации накопленного отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Приближающее исчерпание основного делящегося материала ТР – урана-235 – приводит к необходимости решения следующих двух связанных комплексов научно-технологических проблем: (1) создание и внедрение коммерчески эффективных реакторов на быстрых нейтронах (БР), в которых параллельно с производством энергии осуществляется наработка новых делящихся материалов (ДМ) в количестве, превосходящем использованное для производства энергии; (2) разработка и внедрение технологий извлечения наработанных ДМ и изготовление из них свежего топлива. Оптимальные решения отмеченных проблем должны учитывать требования обеспечения безопасности и нераспространения. Такой анализ необходим в ближнесрочной перспективе при формировании планов развития ЯЭ, а в среднесрочной – при построении реалистичных прогнозов.

В силу множества влияющих факторов, многоплановости действующих процессов и сложности взаимосвязей необходимо создание и развитие математически представляемой модели ядерно-энергетической

отрасли и программного комплекса, предоставляющего возможности количественного описания и оптимизации сценариев развития. Особую ценность с позиций обеспечения надёжности разрабатываемых планов и реалистичности прогнозов составляет углублённое описание ресурсных потребностей и происходящих материальных потоков всех технологических компонентов ядерно-энергетического комплекса. Именно так развивается создаваемый во ВНИИТФ комплекс АТЭК.

## KEY PROBLEMS OF NUCLEAR POWER

V. A. Simonenko

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

At present nuclear power (NP) operates mainly for electricity generation, and just in some cases thermal energy is used partly. Contribution of NP in global electricity production and in Russian Federation too comprises near 16% conceding to energy generating industries based on fossils of organic origin. There are a set reasons which prohibited to NP to take leading position in past and would impede in future. On current understanding NP based on use of potentially accessible energy heavy nuclei fission may meet demands in energy of our civilization for several thousand years. To achieve such opportunity it is necessary to solve a set of scientific, technological, economical and even social and political problems.

These problems can be combined in four aggregative, mutually connected groups: (1) science and technology problems, (2) economy and production, (3) safety and ecology problems and (4) non-proliferation of nuclear weapon materials and technologies. In presented work the main attention is devoted to the problems important for NP extended development for near-term and medium-term prospective.

Current NP based on thermal reactors (TR) with water coolant and opened nuclear cycle. For the extended development become acute the problems of reliable safety provisions including prevention and neutralization of heavy accidents and the problems of technologically and economically effective utilization of accumulated spent nuclear fuel (SNF). Forthcoming exhaustion of the main fissile for TR – uranium-235 – forces to solve the following two mutually connected composed problems: (1) to develop and to implement economically effective nuclear power reactors with fast neutron spectrum (FR) which are able to produce new fissile materials in parallel with energy production in amount exceeding of spent fuel; (2) development and implementation the technologies to extract new fission products and to produce a fuel with the recycled materials. Optimal solutions for the mentioned problems should meet the demands of safety and non-proliferation. Similar analysis is necessary to generate the detailed plan of NP development in near-term prospective and to create a realistic forecast in medium-term prospective.

On the reason of impact factors multiplicity, multi-aspect of acting processes and complexity of their interaction it is necessary to create and develop mathematical model to describe the activity of the nuclear power sector of economy and the code for numerical modeling to describe various scenarios of NP development and to optimize them. It is of

great value for reliability of plans under development and realistic forecast to have a wide description of demanded resources and material flows for all components of nuclear power technologies. These capabilities are included into the code ATEC developed in VNIITF.

5-2

### КОНЦЕПЦИЯ БЫСТРОГО РЕАКТОРА С ЖИДКИМ U-PU ТОПЛИВОМ

Л. И. Пономарёв

ВНИИНМ им. Академика А. Бочвара, Москва, Россия

В последние два года экспериментально установлено, что в расплаве соли LiF-NaF-KF эвтектического состава при  $T=700^\circ\text{C}$  растворимость фторидов лантанидов и актинидов чрезвычайно высока. В частности, для  $\text{PuF}_3$ ,  $\text{UF}_4$  и  $\text{AmF}_3$  растворимость соответственно равна ~30, ~45 и ~40 мол. %, что соответствует концентрации ~60 масс % тяжёлых металлов в топливной композиции (ТК) LiF-NaF-KF- $\text{UF}_4$ -PuF<sub>3</sub>. Спектр нейтронов в такой ТК близок к спектру быстрых реакторов, что позволяет рассмотреть возможность создания на её основе быстрых реакторов различного назначения с жидким топливом. Выполненные расчёты показывают, что нейтронно-физические и тепло-гидравлические характеристики такого реактора близки к характеристикам твердотопливных реакторов. Высокая растворимость  $\text{AmF}_3$  позволяет также создать подкритический реактор-сжигатель минорных актинидов, в котором топливом служит америций и который позволяет трансмутировать 300 кг Am/год. ГВт(тепл.), т. е. весь Am, выгружаемый ежегодно из ~ 90 тепловых реакторов типа ВВЭР-1000, или Am из ОЯТ ~10 таких реакторов после 30 лет хранения.

### CONCEPTION OF THE FAST REACTOR WITH THE LIQUID U-PU FUEL

L. I. Ponomarev

VNIINM A. Bochvar Institute, Moscow, Russia

In the last two years it was established experimentally that the solubility of the lanthanides and actinides in the eutectics LiF-NaF-KF is extremely high: ~ 45, ~ 30 and ~ 40 mol. % for  $\text{UF}_4$ ,  $\text{PuF}_3$  and  $\text{AmF}_3$  correspondingly at  $700^\circ\text{C}$ , i.e. ~ 60 mass % of the heavy metals. The neutron spectrum in the fuel composition LiF-NaF-KF- $\text{UF}_4$ -PuF<sub>3</sub> is similar to the fast reactor ones and this fact opens the way to create the various fast reactors with liquid U-Pu fuel (FRLF).

The preliminary calculations confirm that neutronics and thermo hydraulics of FRLF is similar to the solid fuel fast reactor ones. The high solubility of  $\text{AmF}_3$  allows also to create the subcritical reactor-transmuter for the minor actinides incineration. Particularly, such a reactor can burn ~ 300 kg Am/year. GW (term.), i.e. all Am from ~ 90 VVER-1000 reactors or Am from the spent fuel of ~ 10 such reactors after 30 years storing.

5-3

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА АТЭК

И. Р. Макеева, И. А. Доровских, И. А. Волков,  
Н. Д. Дырда, Е. А. БелоноговаРоссийский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

Перспективное развитие ядерной энергетики предполагает постепенное включение в структуру ядерной энергетики реакторов на быстрых нейтронах (РБН), позволяющих наиболее полно использовать ресурсные возможности запасов уранового и в дальнейшем ториевого сырья. При этом даже на теоретическом уровне большинство вопросов организации работы собственно реакторных установок на быстрых нейтронах и соответствующих топливных циклов имеет ряд альтернативных решений. Оценка приемлемости и жизнеспособности совокупности этих решений и выбор конкретного варианта для реализации является многопараметрической и многокритериальной задачей системного анализа. Одним из наиболее важных вопросов при этом является оптимизация нуклидных потоков в ядерном топливном цикле.

В РФЯЦ-ВНИИТФ с 2008 г. развивается программный комплекс АТЭК [1], основным назначением которого является моделирование ядерного энергетического комплекса, его подсистем и технологий ядерного топливного цикла. Особое внимание при моделировании уделяется отслеживанию эволюции нуклидных составов во внешнем топливном цикле. При этом информация о нуклидной кинетике в активной зоне реакторной установки поступает из расчета по комплексу ПРИЗМА+РИСК [1, 2].

Комплекс АТЭК применялся для расчета и анализа различных вариантов внедрения РБН в структуру ядерной энергетики:

- постепенный ввод в эксплуатацию РБН различного типа с различным коэффициентом воспроизводства при поддерживающем вводе тепловых реакторов;
- переход на РБН после 2030 г.;
- производство топлива для РБН из различных источников делящихся материалов (рециклированное и природное сырье);
- влияние глубины выгорания на интегральные характеристики топливного цикла;
- пристанционная и централизованная организация топливного цикла.

Оцениваются ресурсные и производственные потребности, набор необходимых технологий и влияние ключевых технологических решений на ядерный топливный цикл в целом. Приводятся возможные критерии интегральных оценок развития ядерной энергетики.

#### Литература

1. Макеева И. Р., Симоненко В. А., Соколов В. П., Петунин С. А. Математическое моделирование технологий ядерного

топливного цикла: потребности и возможности. Доклад на международной конференции «X Забабакхинские научные чтения», Снежинск, 2010. – С. 248–250.

2. Кандиев Я. З. Оценка эффектов малых возмущений в многовариантных расчетах по программе ПРИЗМА-Д / Кандиев Я. З., Малахов А.А. и др. // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99, В. 3. – С. 203–210.

3. Модестов Д.Г. Решение уравнений радиоактивного распада // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2006. – Вып. 3. – С. 54–58.

### THE ANALYSIS OF POSSIBLE VARIANTS OF DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER ENGINEERING USING ATEK CODE

I. R. Makeyeva, I. A. Dorovskikh, I. A. Volkov,  
N. D. Dyrda, E. A. Belonogova

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

The prospective development of nuclear power engineering (NPE) implies gradual inclusion into NPE structure of fast reactors (FR) which allow using resource capacity of uranium and later on thorium. At that, even on theoretical level the majority of problems, related to the organization of fast reactors operating and corresponding fuel cycles, has several alternative solutions. The estimate of acceptability and viability of combined solutions and the choice of concrete variant for implementation is a multiparametric and multicriterion problem of systems analysis. One of the major items is the optimization of nuclide flow in nuclear fuel cycle.

In VNIITF since 2008 the program code ATEK [1] has been being developed for simulating nuclear power complex, its subsystems and nuclear fuel cycle technologies. While simulating the special attention is given to tracing nuclide compositions evolution in outer fuel cycle. The information on nuclide kinetics in reactor active core is received from computations by program complex PRIZMA+RISK[1, 2].

ATEK complex has been used for calculation and analysis of different variants of including fast reactors into NPE structure:

- gradual putting into operation fast reactors of different types with different breeding ratio while sustaining use of thermal reactors;

- switch to fast reactors after 2030;

- fuel production for FR of different fissible material sources (recycled and natural raw);

- the burn-up influence on fuel cycle integral characteristics;

- power plant and centralized organization of fuel cycle.

Resource and productive requirements, the combination of necessary technologies and influence of dominant technological solutions on nuclear fuel cycle as a whole are estimated in the paper. Possible criteria of NPE development integral estimates are given.

### References

1. Makeyeva I. R., Simonenko V. A., Sokolov V. P., Petunin S. A. Mathematical Modeling of Nuclear Fuel Cycle: Requirements and capabilities. International Conference “X Zababakhin Scientific Talks”. Snezhinsk, 2010. – С. 248–250.

2. Kandiev Ya.Z. The estimation of small perturbation effects in multiversion computations by means of PRIZMA-D code/ Kandiev Ya.Z., Malakhov A.A. and others // Nuclear Energy. – 2005. – V. 99, Is. 3. – P. 203 – 210.

3. Modestov D. G. The solution of radioactive decay equations. Issues of nuclear science and engineering // Mathematical simulation of physical processes. – 2006. – 3. – P. 54–58.

---

5-4

### СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ КАМПАНИИ РЕАКТОРА ВВЭР-1200

Д. Г. Модестов<sup>1</sup>, А. С. Бикеев<sup>2</sup>,

Л. М. Зуева<sup>1</sup>, М. А. Калугин<sup>2</sup>, Е. А. Кашаева<sup>1</sup>,

Г. Н. Малышкин<sup>1</sup>, М. В. Никульшин<sup>1</sup>,

И. Ю. Силантьева<sup>1</sup>, Д. А. Шкаровский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Заббахина,  
Снежинск, Россия

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: d.g.modestov@vniitf.ru

Современное развитие вычислительной техники позволяет использовать прецизионные компьютерные программы, взамен инженерных, для моделирования физических процессов, происходящих в активных зонах энергетических реакторов. Предполагается, что такой подход позволит повысить точность расчетов, что в свою очередь позволит уменьшить стоимость разработки и увеличить эффективность эксплуатации реакторных установок. Однако при его реализации возникают различные проблемные моменты как методического, так и организационного характера. В частности непостоянной задачей является даже проверка адекватности детальной математической модели, связанная со сложностью последней.

Поэтому, в рамках работ по созданию прецизионных программных комплексов в КИ и ВНИИТФ, для выявления таких моментов были проведены сравнительные расчеты кампании первой топливной загрузки базового 12-месячного топливного цикла реактора ВВЭР-1200. Расчеты проводились по двум программным комплексам. Используемый в КИ комплекс содержит программы МСУ [1] (решение задач переноса методом статистического моделирования) и BURNUP [2] (решение уравнений ядерной кинетики). В состав комплекса, реализованного во ВНИИТФ, входят программы ПРИЗМА [3] (аналог МСУ) и РИСК (аналог BURNUP). Описание алгоритмов последней приводится в [4] и [5]. Также оба комплекса включают программы расчета теплогидравлических характеристик. При проведении расчетов в КИ использовалась методика, представленная в работе [6]. В комплексе ВНИИТФ применялась методика, описанная в [7] и [8], с использованием оценки возмущений, приведенной в [9] для оценки критической концентрации борной кислоты.

Расчеты показали согласие ряда физических характеристик, в частности продолжительности кампании. Но в тоже время выявлены и различия, причины которых выясняются в настоящее время.

## Литература

1. Алексеев Н. И., Большагин С. Н., Гомин Е. А. и др. Статус MCU-5. ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов. – 2011. – Вып. 4. – С. 5–23.
2. Юдкевич М. С. Пакет прикладных программ BURNUP для расчета изотопного состава материалов работающего реактора. ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов. – 2011. – Вып. 4. – С. 24–28.
3. Зацепин О. В., Кандиев Я. З., Кашаева Е. А. и др. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000. ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов. – 2011. – Вып. 4. – С. 64–74.
4. Модестов Д. Г. Интегрирование уравнений, описывающих выгорание ядерного топлива. ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов. – 2011. – Вып. 3. – С. 63–71.
5. Модестов Д. Г. Адаптивная схема решения уравнений выгорания ядерного топлива с оценкой равновесной концентрации короткоживущих ядер. ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов. – 2013. – Вып. 3. – С. 120–130.
6. Бикеев А. С., Калугин М. А., Шкаровский Д. А. Прецизионный расчет по программе MCU энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 на номинальной мощности с учетом обратных связей. Атомная энергия. – 2013. – Т. 114, вып. 5. – С. 254–255.
7. Модестов Д. Г. Разработка программного комплекса для расчета кампании реактора. Заббахинские научные чтения: XI международная конференция 16–20 апреля 2012. Снежинск: Издательство РФЯЦ–ВНИИТФ, 2012.
8. Модестов Д. Г. О построении схемы расчета стационарного состояния реактора при использовании методов статистического моделирования. ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов. – 2013. – Вып. 3. – С. 112–119.
9. Кандиев Я. З., Малахов А. А., Серова Е. В., Спирина С. Г. Оценка эффекта малых возмущений в многовариантных расчетах по программе ПРИЗМА-Д. Атомная энергия. – 2005. – Т. 98, вып. 6. – С. 203–210.

## COMPARATIVE VVER-1200 REACTOR CALCULATIONS

D. G. Modestov<sup>1</sup>, A. S. Bikeyev<sup>2</sup>, L. M. Zueva<sup>1</sup>,  
M. A. Kalugin<sup>2</sup>, E. A. Kashaeva<sup>1</sup>, G. N. Malyshkin<sup>1</sup>,  
M. V. Nikulshin<sup>1</sup>, I. Yu. Silantieva<sup>1</sup>, D. A. Shkarovsky<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>National Research Center – Kurchatov Institute,  
Moscow, Russia

E-mail: d.g.modestov@vniitf.ru

The state-of-the-art computers allow the physical processes that occur in the core of power reactors to be simulated with precision codes instead of engineering applications. With such an approach it is believed to make reactor calculations more accurate which, in turn, will help reduce costs for reactor development and increase operating efficiency. Its implementation, however, faces problems, both methodical and organizational. So, it is not easy even to see whether a detailed mathematical model is adequate or not because it is very sophisticated.

In order to identify these problems we performed comparative calculations by the precision code packages being developed at the Kurchatov Institute and RFNC-VNIITF. In these calculations we simulated VVER-1200 first core campaign in the base 12-month fuel cycle. The package

which is used at the Kurchatov Institute consists of two codes: MCU [1] (statistic radiation transport simulation) and BURNUP [2] (nuclear reaction kinetics). VNIITF's package unites PRIZMA [3] (MCU analog) and RISK (BURNUP analog). RISK algorithms are described in [4] and [5]. The two packages also use codes for thermal hydraulics calculations. At the Kurchatov Institute they are done with a technique described in [6]. At VNIITF a technique described in [7] and [8] is used with perturbations estimated as described in [9] for the critical concentration of boric acid.

Our calculations agree well for some characteristics, for example, campaign duration. Others however disagree and we are clearing up why.

## References

1. Alexeyev N. I., Bolshagin S. N., Gomin E. A. et al. MCU-5 status. VANT, Nuclear Reactor Physics Series. – 2011. – Is. 4. – P. 5–23.
2. Yudkevich M. S. BURNUP applications for isotopic compositions in an operating reactor. VANT, Nuclear Reactor Physics Series. – 2011. – Is. 4. – P. 24–28.
3. Zatsepin O. V., Kandiev Ya. Z., Kashaeva E. A. et al. VVER-1000 neutronics calculations by the Monte Carlo method implemented in PRIZMA. VANT, Nuclear Reactor Physics Series. – 2011. – Is. 4. – P. 64–74.
4. Modestov D. G. Integration of fuel burnup equations. VANT, Nuclear Reactor Physics Series. – 2011. – Is. 3. – P. 63–71.
5. Modestov D. G. An adaptive scheme for burnup equations with the estimated equilibrium concentrations of short-lived nuclei. VANT, Nuclear Reactor Physics Series. – 2013. – Is. 3. – P. 120–130.
6. Bikeyev A. S., Kalugin M. A., and Shkarovsky D. A. MCU precision calculation of energy deposition in the VVER-1000 full-power core with feedback. J. Nuclear Energy. – 2013. – Vol. 114, Is. 5. – P. 254–255.
7. Modestov D. G. Development of a code package for reactor campaign calculations. XI Zababakhin Scientific Talks, 16–20 April 2012, Snezhinsk, RFNC–VNIITF Publishers, 2012.
8. Modestov D. G. An algorithm of steady-state reactor calculations with statistic simulation methods. VANT, Nuclear Reactor Physics Series. – 2013. – Is. 3. – P. 112–119.
9. Kandiev Ya. Z., Malakhov A. A., Serova E. V., and Spirina S. G. Perturbation calculations by PRIZMA-D. J. Nuclear Energy. – 2005. – Vol. 98, Is. 6. – P. 203–210.

5-5

## О ВЫБОРЕ ДЕМОНСТРАЦИОННОГО РАСПЛАВНО-СОЛЕВОГО РЕАКТОРА

М. Н. Белоногов, И. А. Волков,  
Н. Д. Дырда, М. А. Трапезников

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

E-mail: m.n.belonogov@vniitf.ru

Доклад посвящен разработке концепции демонстрационного расплавно-солевого реактора, нейтронно-физическим и теплогидравлическим расчетам активной зоны предложенной модели.

Осуществлена оптимизация геометрии активной зоны реактора на основе гидродинамических и тепло-

физических расчетов. Проведен анализ различных конфигураций активной зоны расплавно-солевого реактора (в том числе проекта MOSART – Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter [1]). На основе этих расчётов решено отказаться от цилиндрической геометрии активной зоны в связи с наличием локальных перегревов, застойных областей и гидродинамической неустойчивости. Предложена эллиптическая модель активной зоны, которая исключила данные сложности.

Разработана физическая схема реакторной установки для тепловой мощности 10 МВт, состоящая из эллиптической активной зоны, бокового отражателя из пиролитического графита, стальной защиты и корпуса реактора, изготовленного из сплава хастеллой-N. Для обеспечения теплосъема из активной зоны выбраны следующие параметры теплоносителя/топлива: температура на входе 600°C, подогрев 115°C, скорость прокачки 0,31 м/с. Осуществлена оптимизация толщины графитового отражателя, обеспечивающей минимизацию утечки нейтронов из системы, с помощью программного комплекса ПРИЗМА+РИСК [2, 3], разработанного в РФЯЦ–ВНИИТФ.

Для выбранной компоновки активной зоны реактора с предварительным разбиением на 15 областей по высоте был проведен расчет нейтронно-физических характеристик. Рассчитанные значения энерговыделения по областям были использованы для теплогидравлического расчета.

Проведено моделирование эволюции нуклидного состава на протяжении 2-х лет работы с периодом переработки растворимых и нерастворимых продуктов деления 73 дня. 7% топливной соли после 73-х дней работы реактора извлекалось для последующей выдержки и переработки. Взамен в активную зону добавлялась соль исходного состава до достижения критичности системы, далее реактор работал 73 дня на полной мощности и процесс повторялся вновь. Показано изменение изотопного состава плутония и определение времени выхода реактора на стационар.

На основе проведенных исследований были сделаны выводы о необходимости дальнейшего продолжения работ по развитию предложенной концепции и проработке компоновки реакторной установки.

### Литература

1. Victor Ignatiev, Olga Feynberg. Progress in Development of Li, Be, Na/F Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter Concept / Victor Ignatiev, Olga Feynberg and others // Proceedings of ICAPP 2007, Nice, France, May 13–18, 2007.
2. Кандиев Я. З. Оценка эффектов малых возмущений в многовариантных расчётах по программе ПРИЗМА-Д / Кандиев Я. З., Малахов А. А. и др. // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99, В.3. – С. 203 – 210.
3. Модестов Д. Г. Решение уравнений радиоактивного распада // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2006. – Вып. 3. – С. 54– 58.

## CHOICE OF THE DEMONSTRATION MOLTEN-SALT REACTOR

M. N. Belonogov, I. A. Volkov,  
N. D. Dyrda, M. A. Trapeznikov

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

E-mail: m.n.belonogov@vniitf.ru

The report is devoted to the development of the concept of a demonstration molten-salt reactor, neutron-physical and thermal-hydraulics calculations of the offered model active zone.

Paper describes the search technique of optimum reactor active zone geometry on the basis of hydrodynamic and thermal physics calculations. Using this technique the analysis of various configurations of molten-salt reactor active zone has been carried out (including project MOSART – Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter [1]). Calculation results have shown the necessity of refusing the cylindrical geometry of an active zone because of the presence of local overheats, stagnant areas and hydrodynamic instability. During the analysis of preliminary calculations the elliptic model of an active zone has been offered which has not revealed such deformities and all further studies have been carried out for the given geometry.

Report describes the developed reactor prototype consisting of an elliptic active zone, a lateral reflector made of pyrolytic graphite, steel protection and the carcass of the reactor made of an alloy Hastalloy-N. Calculations of speed of the heat-carrier/fuel through the active zone of a reactor have been carried out, on the basis of the chosen capacity 10 MW, speed of fuel 0.31 m/s and heating 115°C. Also the calculation has been accomplished to search the optimum thickness of the graphite reflector providing minimization of neutrons leak from the system, by means of the program complex PRIZMA + RISK [2, 3] developed in RFNC–VNIITF.

For the chosen reactor active zone configuration with preliminary splitting in 15 areas by height calculation of neutron-physical characteristics has been carried out. The calculated energy-release values were used for thermal-hydraulics calculation. The received results are described in the report.

During research the simulation of nuclide composition evolution of considered reactor has been carried out for two years functioning and 73 days reprocessing period for soluble and insoluble clearance products: about 7% of fuel salt was extracted after 73 days functioning for posterior cooling and reprocessing, then it was replaced by salt with initial composition up to reaching criticality, then reactor was working for 73 days at full power. The report gives information on change in plutonium isotopic composition and time of reaching a reactor steady-state operation.

The accomplished research has shown the necessity of further optimization of reactor prototype configuration for model development.

### References

- 1 Victor Ignatiev, Olga Feynberg. Progress in Development of Li, Be, Na/F Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter Concept

/ Victor Ignatiev, Olga Feynberg and others // Proceedings of ICAPP 2007, Nice, France, May 13–18, 2007.

2 Kandiev Ya. Z. The estimation of small perturbation effects in multiversion computations by means of PRIZMA-D code/ Kandiev Ya. Z., Malakhov A. A. and others // Nuclear Energy, – 2005. – V. 99, Is. 3. – P. 203 – 210.

3 Modestov D.G. The solution of radioactive decay equations. Issues of nuclear science and engineering // Mathematical simulation of physical processes. – 2006. – 3. – P. 54–58.

5-6

## ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Н. Д. Дырда, И. Р. Макеева, В. А. Симоненко

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

Расширенное развитие ядерной энергетики на основе реакторов на быстрых нейтронах (БР) потенциально открывает грандиозные перспективы для обеспечения энергией нашей цивилизации на несколько тысячелетий вперед. В работе рассматриваются различные режимы работы перспективных БР. Обсуждается влияние этих режимов на время перехода БР к равновесному или стационарному составу топлива, величину коэффициента воспроизводства и другие параметры, характеризующие кампанию реактора.

В работе рассмотрена организация замыкания топливного цикла быстрых реакторов с натриевым теплоносителем для различных типов (оксидное или нитридное) и составов (энергетический плутоний или обогащенный уран) стартовых топливных загрузок. Рассмотрены компоновки активной зоны (а.з.) с зонами воспроизводства топлива и без них. Показано влияние длительности облучения топлива в а.з. БР и продолжительности внешнего ТЦ на время перехода к стационарному или равновесному составу топлива.

В качестве начальных данных использовались доступные данные о геометрии и составах активных зон БР с натриевым теплоносителем. В расчетах использовались трехмерные модели а.з. Нейтронно-физический расчет и расчет выгорания топлива проводился с помощью разработанного в РФЯЦ–ВНИИТФ программного комплекса ПРИЗМА+РИСК [1]. Учет внешней части топливного цикла проводился с использованием комплекса АТЭК [2].

### Литература

1. Кандиев Я. З. Оценка эффектов малых возмущений в многовариантных расчётах по программе ПРИЗМА-Д / Кандиев Я. З., Малахов А. А. и др. // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99, В. 3. – С. 203 – 210.
2. Макеева И. Р., Симоненко В. А., Соколов В. П., Петунин С. А. Математическое моделирование технологий ядерного топливного цикла: потребности и возможности. Доклад на международной конференции «X Забабахинские научные чтения». Снежинск, 2010. – С. 248 – 250.

## THE QUESTIONS OF ORGANIZING MODES OF FAST REACTORS

N. D. Dyrda, I. R. Makeyeva, V. A. Simonenko

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

Advanced development of nuclear energy based on fast reactors potentially provides enormous opportunities to produce energy for our civilization during the coming millennia. The paper discusses various modes of perspective fast reactors. It also discusses the effect of these modes to the transition of the fast reactor to equilibrium or stationary fuel composition and reproduction rate and other parameters characterizing the campaign reactor.

In this paper we discuss the organization of the closed fuel cycle of fast reactors with sodium coolant for various types (oxide or nitride) and fuel starting compositions (reactor-grade plutonium or enriched uranium). We discuss the core design with fuel breeding areas and without them. Besides dependence of burning time of fuel in the core of the fast reactor and the time of the external fuel cycle for transition to the stationary or equilibrium fuel composition are showed.

As initial data available data on the geometry and composition of the cores of fast reactors with sodium coolant were used. In the calculations, we used three-dimensional models of the cores.

The neutronic calculations and calculation of fuel burning were conducted using the software package of the PRISMA+RISK [1] developed by the VNIITF. The account of the outer part of the fuel cycle was performed by using the АТЕК [2] complex.

### References

1. Kandiev Ya. Z. The estimation of small perturbation effects in multiversion computations by means of PRIZMA-D code/ Kandiev Ya. Z., Malakhov A. A. and others // Nuclear Energy. – 2005. – V. 99, Is. 3. – P. 203–210.
2. Makeyeva I. R., Simonenko V. A., Sokolov V. P., Petunin S. A. Mathematical Modeling of Nuclear Fuel Cycle: Requirements and capabilities. International Conference «X Zababakhin Scientific Talks». Snezhinsk, 2010. – С. 248–250.

5-7

## ПРОГРАММА «ТАНДЕМ» ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СВЯЗАННЫХ РАСЧЕТОВ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

И. Ю. Силантьева, Л. М. Зуева, Е. А. Кашаева,  
Г. Н. Мальшкин, Д. Г. Модестов, Д. В. Могиленских,  
С. Ю. Мокшин, М. В. Никульшин,  
В. Г. Орлов, Е. Ю. Язова

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

E-mail: i.yu.silantieva@vniitf.ru



Полномасштабный физический расчет кампании реактора включает как минимум три вида расчетов: расчеты нейтронно-физических параметров активной зоны, расчеты изменения со временем нуклидного состава топлива за счет его выгорания, теплогидравлические расчеты. Для решения подобных задач в РФЯЦ–ВНИИТФ разработан программный комплекс ТАНДЕМ, обеспечивающий проведение параллельных связанных расчетов активных зон реакторов различных типов. В настоящее время, кроме вспомогательных компонент, обеспечивающих управляющие и сервисные функции, комплекс содержит ряд программ, предназначенных для описания физических процессов. Это такие программы как ПРИЗМА [1], предназначенная для решения задач переноса методом статистического моделирования, РИСК [2], служащая для расчетов эволюции ядерного состава в радиационном поле. Также для проведения теплогидравлических расчетов активной зоны реакторной установки рассматриваются различные CFD программы [3, 4].

Связанные расчеты проводятся под управлением ОС LINUX и являются итерационным процессом. На основе набора команд штатного интерпретатора bash ОС LINUX разработан скрипт запуска комплекса расчетов, который обеспечивает совместную работу программ комплекса ТАНДЕМ на вычислительных серверах как в параллельном, так и в распределенном режимах. Прототип графического интерфейса пользователя позволяет задавать входные данные, необходимые интегрированному расчетному коду для проведения связанных расчетов.

Проводимые связанные расчеты для реакторных установок типа БРЕСТ, ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 показывают возможность вычисления на современных вычислительных системах теплогидравлических характеристик реактора с использованием нейтронно-физических характеристик, оцененных методами статистического моделирования. В то же время проверочные расчеты позволили наметить пути дальнейшего развития методик.

### Литература

1. Зацепин О. В., Кандиев Я. З., Кашаева Е. А. и др. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000. ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов. – 2011. – Вып. 4. – С. 64–74.
2. Модестов Д. Г. Разработка программного комплекса для расчета кампании реактора. Забабахинские научные чтения: XI международная конференция, 16–20 апреля 2012. Снежинск: Издательство РФЯЦ–ВНИИТФ, 2012.
3. Chudanov V. V. et al. Current status and validation of CONV2D&3D code. Proc. OECD/CSNI Workshop on in vessel core debris retention and coolability, Garching near Munich, Germany, March 3–6, 1998. Nuclear Safety NEA/CSNI/R (98) 18, 1999. – P. 223–224.
4. OpenFOAM, <http://opencfd.co.uk/openfoam>.

### TANDEM PROGRAM FOR PARALLEL COMPUTING OF COUPLED NEUTRON-PHYSICAL AND THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF REACTOR CORES

I. Yu. Silantieva, L. M. Zueva, E. A. Kashaeva,  
G. N. Malyshkin, D. G. Modestov, D. V. Mogilenskikh,  
S. Yu. Mokshin, M. V. Nikulshin, V. G. Orlov, E. Yu. Yazova

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

E-mail: [i.yu.silantieva@vniitf.ru](mailto:i.yu.silantieva@vniitf.ru)

The full-scale simulation of reactor physics includes calculations of three types at least: computing of neutron-physical parameters of the core, computing how nuclide composition of fuel changes with time due to fuel burnup, and thermal-hydraulic computations. For these problems RFNC–VNIITF developed a package TANDEM for parallel computing of different-type reactor cores in a coupled manner. Besides some auxiliary components for management and service, the package now unites a number of codes which simulate reactor physics. These are PRIZMA [1] which solves radiation transport through statistical modeling and RISK [2] which simulates how the nuclear composition evolves in a radiation field. Also, different CFD codes [3, 4] are considered for thermal hydraulics calculations of reactor cores.

The coupled calculations are controlled by LINUX operational system; they are iterative. Using instructions of the LINUX standard bash interpreter, we developed a script which starts up TANDEM package and controls the operation of its codes on compute servers either in parallel or in distributed mode. A graphic user interface prototype helps define the input the codes require for coupled computing.

The coupled calculations performed for the cores of the BREST-type, VVER-1000 and VVER-1200 reactors show usability of the state-of-the-art computer systems for reactor thermal hydraulics calculations with neutronics characteristics estimated through statistical modeling. A number of test calculations helped directed the way to further improvements.

### References

1. Zatselin O. V., Kandiev Ya. Z., Kashaeva E. A. et al. Modestov. VVER-1000 neutronics calculations by the Monte Carlo method implemented in PRIZMA. VANT, Nuclear Reactor Physics Series. – 2011. – Is. 4. – P. 64–74.
2. Modestov D. G. Development of a code package for reactor campaign calculations. XI Zababakhin Scientific Talks, 16–20 April 2012, Snezhinsk, RFNC–VNIITF Publishers, 2012.
3. Chudanov V. V. et al. Current status and validation of CONV2D&3D code. Proc. OECD/CSNI Workshop on in vessel core debris retention and coolability, Garching near Munich, Germany, March 3–6, 1998. Nuclear Safety NEA/CSNI/R (98) 18, 1999. – P. 223–224.
4. OpenFOAM, <http://opencfd.co.uk/openfoam>.

5-8

### РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПРОГРАММНОГО КОДА СОКРАТ-БН

Ю. Ю. Виноградова, Н. И. Рыжов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики  
РАН, Москва, Россия

E-mail: vinogradova@ibrae.ac.ru

Современный подход к обоснованию безопасности АЭС требует углубленного анализа аварийных режимов, включая тяжелые запроектные аварии. Для анализа аварий с вероятностью повреждения активной зоны используются интегральные расчетные коды. Код СОКРАТ-БН разрабатывается в рамках ФЦП ЯЭНП по направлению: Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для анализа и обоснования безопасности перспективных атомных электростанций и ядерного топливного цикла. Основным назначением кода является расчетное обоснование безопасности РУ с натриевым теплоносителем (РУ БН-800, БН-1200). СОКРАТ-БН является интегральным кодом, позволяющим моделировать динамику реактора в переходных и аварийных режимах, связанных с нарушением в работе оборудования 1-го, 2-го и 3-го контуров, включая запроектные и тяжелые аварии. В состав кода СОКРАТ-БН интегрированы и интегрируются модули для расчета: теплогидравлических процессов; связанных нейтронно-физических процессов; поведения топлива в условиях аварии; выхода продуктов деления и переноса их в контуре теплоносителя; переноса продуктов деления в помещениях АЭС и в окружающей среде. При моделировании аварийных процессов код СОКРАТ-БН дает реалистичную оценку рассчитываемых параметров. Точность оценки параметров по разным явлениям устанавливается на основе верификационных процедур. Была проведена верификация кода СОКРАТ-БН на отечественных и зарубежных экспериментах. В настоящем докладе представлены результаты верификации теплогидравлического модуля кода СОКРАТ-БН на основе наиболее представительных экспериментов, которые моделируют основные теплогидравлические процессы, происходящие в переходных и аварийных режимах работы в РУ с натриевым теплоносителем.

### DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF HEAT-HYDRAULICS UNIT FOR SOCRAT-BN CODE

Yu. Yu. Vinogradova, N. I. Ryzhov

Nuclear safety institute of the Russian academy of sciences,  
Moscow, Russia

E-mail: vinogradova@ibrae.ac.ru

Today's approach to substantiation of NPP safety calls for profound analysis of accident modes including severe accidents beyond the design basis. Integrated software codes are used for analysis of accidents having some probability of reactor core damage. SOCRAT-BN code is devel-

oped within the federal targeted program "New generation of nuclear power" in the field "Development of integrated codes of new generation for analysis and safety substantiation of promising nuclear power plants and nuclear fuel cycle". The code is aimed mostly at simulation and substantiation of safety for reactor with sodium coolant (BN-800, BN-1200). SOCRAT-BN is integrated code allowing simulation of reactor dynamics in transient and accident modes associated with failures of hardware in 1st, 2nd and 3rd loops including accidents beyond the design basis and severe accidents. The following units have been integrated within the SOCRAT-BN code or are currently integrated: heat-hydraulics processes; couples neutron-physics processes, fuel behavior during accident; fission products release and transport in coolant loop; transport of fission products in nuclear power plant rooms and in environment. SOCRAT-BN code yields realistic estimate of simulated parameters during accident simulation. Accuracy of parameter estimation for various phenomena is set up based on verification procedures. Code SOCRAT-BN was verified using Russian and global experimental data. This presentation covers results of heat-hydraulics unit verification based on the most relevant experiments, modeling major heat and hydraulics processes transpiring in transient and accident modes of operation for reactor with sodium coolant.

5-9

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА «МЕЧЕННЫХ ЧАСТИЦ» ДЛЯ УЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ ФУНКЦИОНАЛОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ПО ПРОГРАММЕ ПРИЗМА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

А. С. Доросев<sup>1,2</sup>, С. И. Самарин<sup>1</sup>, Е. В. Серова<sup>1</sup><sup>1</sup> Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

Один из актуальных вопросов при численном моделировании реакторов связан с учетом влияния неопределенностей начальных данных на результирующие функционалы. Возмущения начальных данных могут быть связаны как с геометрическими особенностями системы, так и с параметрами, влияющими на протекание реакций деления (например, обогащение топлива).

В статье [1] был предложен метод прямого учета неопределенностей исходных данных в расчетах методом Монте-Карло. Достоинством такого подхода является очевидная возможность получения распределения оценки интересующей величины в зависимости от распределения значений неопределенных данных. Для этого достаточно знать закон распределения исходных данных. Как утверждается в работе(1), при наличии корреляции между значениями нескольких параметров, при оценке методом Монте-Карло эти корреляции могут быть учтены автоматически.

В рамках совместных работ РФЯЦ–ВНИИТФ и КИ проводилось исследование влияния неопределенностей

исходных данных, вызванных технологическими допусками при изготовлении конструктивных элементов активной зоны реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Оценивались суммарные стандартные неопределенности [2] Кэф и потвэльного энерговыделения в зависимости от неопределенностей: плотности и обогащения топлива, внешнего диаметра оболочки твэлов\твэгов, а так же содержания Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в твэгах. Расчеты проводились по трем программам MCU [3], РАДАР и ПРИЗМА [4]. При этом расчет по программам MCU и ПРИЗМА проводился в манере прямого учета неопределенностей, что приводило к значительным вычислительным затратам, и не позволило оценить влияние возмущения некоторых параметров на результирующий функционал.

В данной работе рассматривается другой подход для учета неопределенностей, основанный на оценке коэффициентов чувствительности методом Монте-Карло. В работе [5, 6] описана технология проведения оценок функционалов, реализованная в программе ПРИЗМА, с использованием меченых частиц, которая позволяет в одном расчете оценить некоторое количество различных вариантов задач с незначительными различиями.

На примере одной из задач показано, что предлагаемый в данной работе подход позволяет проводить оценки влияния неопределенностей в тех случаях, когда метод прямого учета неопределенностей неоправдан, и требует значительных вычислительных затрат.

## Литература

1. Андросенко П. А., Колганов К. М. Прямой учет неопределенности исходных данных в расчетах методом Монте-Карло. Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, № 3, 2008.
2. Guide to expression of uncertainty in measurement. International Standard ISO 13005. 1993.
3. Гомин Е. А. Статус MCU-4. ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, 2006. Вып. 1. С. 6–32.
4. Зацепин О. В., Кандиев Я. З., Кашаева Е. А., Малышкин Г. Н., Модестов Д. Г. Расчёты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ВВЭР-1000. ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, 2011. Вып. 4. С. 64–73.
5. Кандиев Я. З., Серова Е. В. Меченные частицы в расчетах переноса излучения методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА. Атомная энергия, 2005. Т. 98, вып.5. С. 386–393.
6. Кандиев Я. З., Малахов А. А., Серова Е. В., Спирина С. Г. Оценка эффекта малых возмущений в многовариантных расчетах по программе ПРИЗМА-Д. Атомная энергия, 2005. Т. 99, вып. 3. С. 203–210.

### PRIZMA CODE: TAGGED PARTICLES FOR RESOLVING INITIAL DATA UNCERTAINTIES IN RADIATION TRANSPORT BY THE MONTE CARLO METHOD

A. S. Dorosev<sup>1,2</sup>, S. I. Samarin<sup>1</sup>, E. V. Serova<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> NNRU MEPI, Snezhinsk, Russia

An important issue in reactor calculations is their sensitivity to uncertainties in initial data. Perturbations in initial data can be associated with parameters which control

fission (e.g., fuel enrichment) as well as with geometrical parameters of the system.

Reference (1) describes a method which directly treats initial data uncertainties in Monte Carlo calculations. It is advantageous in making it clearly possible to obtain a distributed estimate dependent on the distribution of uncertain data values. For this end one only needs to know initial data distribution law. As stated in (1), if the values of several parameters are correlated, the correlations can automatically be treated in Monte Carlo calculations.

The effect of uncertainties in initial data due to manufacturing tolerances for the structural components of the VVER-1000 and VVER-1200 reactor cores was investigated in a collaborative effort by RFNC–VNIITF and Kurchatov Institute (KI). We estimated total standard uncertainties in  $k_{\text{eff}}$  and energy release in fuel elements versus uncertainties in fuel density and enrichment, in the outer diameter of fuel elements and Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents, etc. Calculations were done with three codes: MCU(2), RADAR (KI), and PRIZMA (3.). MCU and PRIZMA calculations treated uncertainties directly; they were very demanding and did not allow us to estimate the effect of perturbations in some parameters.

This paper offers another approach to uncertainty treatment which is based on the estimation of sensitivity coefficients by the Monte Carlo method. It is implemented in PRIZMA and uses tagged particles (4, 5). With this method we can do correlated calculations and obtain results for some variants of a parameter in one run.

A sample problem is provided to show that the approach we propose helps estimate the effect of uncertainties in cases where their direct treatment is unreasoned and expensive.

## References

1. Androsenko P. A., Kolganov K. M. Direct treatment of initial data uncertainties in Monte Carlo calculations. Higher Education Proceedings, Nuclear Power, No. 3, 2008.
2. Gomin E. A. MCU-4 Status. J. VANT, Reactor Physics Series, Is. 1, 2006, P. 6–32.
3. Zatsepin O. V., Kandiev Y. Z., E. A. Kashayeva et all. VVER-1000 core neutronics calculations by the Monte Carlo method implemented in PRIZMA. J. VANT, Reactor Physics Series, 2011, Is. 4, P. 64–73.
4. Kandiev Y. Z. and Serova E.V. Tagged particles in radiation transport calculations by the Monte Carlo method implemented in PRIZMA. J. Atomic Energy, 2005, V. 98, Is. 5, P. 386–393.
5. Kandiev Y. Z., Malakhov A. A., Serova E.V. and Spirina S. G. Evaluation of the effect of perturbations in correlated calculations by the PRIZMA-D code. J. Atomic Energy, 2005, V. 99, Is. 3, P. 203–210.

5-10

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ  
РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО  
РЕАКТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПИК.  
ПРОЕКТ ФИЗПУСКА**

И. Г. Вавилова, А. Р. Голиков, М. Р. Колхидашвили,  
В. В. Марченков, Л. М. Площанский, Т. В. Савельева,  
С. Л. Смольский, В. А. Соловей, Е. Ю. Фокин

Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт», ФГБУ ПИЯФ  
им. Б.П. Константинова, Гатчина, Россия

E-mail: igvavilova@pnpi.spb.ru

В работе представлено аппаратное и программное обеспечение системы контроля радиационной безопасности в варианте исполнения, соответствующего проекту физпуска высокопоточного исследовательского реактора ПИК.

Приведены алгоритмические и методические сведения при получении данных в результате автоматического оперативного контроля радиационной безопасности в среде иерархической трехуровневой распределенной системы.

**HARDWARE AND SOFTWARE  
OF CONTROL SYSTEM OF RADIATION SAFETY  
FOR COMPLEX PIK.  
VARIANT IS PHYSICAL STARTUP**

I. G. Vavilova, A. D. Golikov, M. R. Kolhidashvili,  
V. V. Marchenkov, L. M. Ploshyansky, T. V. Savel'eva,  
S. L. Smol'sky, V. A. Solovei, E. Yu. Fokin

National research centre «Kurchatov institute»,  
B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute, Russia

E-mail: igvavilova@pnpi.spb.ru

This work presents hardware and software of control system of radiation safety for reactor complex PIK. Variant is a physical startup.

A algorithmic and methodic witting indicated at realization of date into a field of a hierarchy three-level distributed system.

5-11

**ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС**

И. В. Лавренюк, О. В. Валеева,  
Н. Б. Аникин, С. М. Ульянов

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

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

Авария на АЭС Фукусима Дайичи в марте 2011 года показала, что остаются проблемы обеспечения водородной безопасности для некоторых проектов АЭС с легководными реакторами. Углублённый анализ перспективных проектов АЭС с ВВЭР, выполненный специалистами РФЯЦ-ВНИИТФ, ИБРАЭ РАН, НИЦ КИ, ГНЦ ФЭИ в 2012 году, показал целесообразность дальнейшего развития расчётно-теоретических моделей процессов, характерных для тяжёлых аварий, и получения экспериментальных данных для этих моделей и кодов. С этой целью разрабатывается программа экспериментальных исследований, включающая:

1. Уточнение критериев воспламенения и детонации водородосодержащих парогазовых смесей (ВПГС), в том числе в присутствии аэрозолей, в однородных условиях.

2. Получение детальной информации по распространению пламени, смене режимов горения, взаимодействию пламени с препятствием в масштабе 1:200.

3. Получение экспериментальных данных по развитию струйных течений ВПГС, стратификации газов, воспламенению и распространению пламени в макетах помещений парогенераторов (ПГ) в масштабе 1:10.

Программы исследований, постановка экспериментов и предварительные результаты по каждому направлению представлены в отдельных докладах.

Характерные условия газовых смесей при тяжелых авариях (ТА): температура газов ~200°C, давление до 5 атм, объемная доля водяного пара до 0,6, возможно присутствие капель воды, генерируемых системой безопасности, размером в  $50\text{--}500 \times 10^{-6}$  м, наличие CO. В экспериментах п. 1 будут получены дополнительные данные по критерию воспламенения и детонации ВПГС в условиях ТА. Дополнительно исследуется влияние параметров источника иницирования.

Эксперименты п. 2 позволяют исследовать распространение пламени и смену режимов горения в однородных покоящихся смесях и в смесях, образующихся при струйном истечении, а также – влияние препятствий на распространение пламени. В экспериментах используются прецизионные методы регистрации распространения пламени. Совместно с экспериментами п. 3 они позволяют оценить влияние изменения масштаба на исследуемые процессы.

Особую опасность представляет истечение ВПГС на этапе осушения активной зоны реактора в ходе ТА. Темп поступления водорода может достигать значений ~ 1 кг/с. При этом становятся непригодными критерии воспламенения, полученные для однородных смесей. Перемешивание компонентов смеси может ускорить процесс горения или привести к его затуханию. При переходе пламени между сообщающимися помещениями АЭС пламя может остановиться на препятствии или наоборот, ускориться.

Эксперименты по п. 3 проводятся в двух постановках: в непрочных прозрачных макетах помещений ПГ в условиях, близких к атмосферным; и в прочных контейнерах. Эксперименты первого типа необходимы для отработки методик регистрации и отладки обеспечивающего оборудования. Эксперименты второго типа выполняются при условиях, характерных для ТА, и являются основными.

Все данные будут использоваться для развития моделей и верификации программных комплексов.

### PROBLEMS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS FOR NPS HYDROGEN SAFETY ENSURING

I. V. Lavrenyuk, O. V. Valeeva,  
N. B. Anikin, S. M. Ulyanov

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

Fukushima Daiichi accident in March 2011 pointed to unresolved hydrogen safety problems for some NPS with BWR.

During the combined work of specialists of RFNC–VNIITF, SSC RF – IPPE, NRC KI, IBRAE in 2012 the analysis of perspective NPS with PWR has been carried out. This analysis has shown the appropriateness of further developing mathematical models of processes typical for severe accidents (SA) and obtaining experimental data for these models and computational codes.

For this purpose the program of experimental research is being developed. It includes:

Correction of ignition and detonation criteria for hydric gas-vapor mixture (HGVM) in homogeneous conditions, including presence of sprays.

Getting the detailed information about flame propagation, change in propagation regimes, flame – obstacle interaction on scale 1:200.

Obtaining the experimental data on outflow jet HGVM propagation, gases stratification, ignition and flame propagation in 1:10 scale prototypes of steam-generating buildings.

Research programs, formulation of experiments and preliminary results on each point are presented in individual reports.

Typical conditions for gas mixtures in the event of severe accident (SA) are: temperature  $\sim 200^\circ\text{C}$ , pressure up to 5 atm, water steam inclusion volume fraction up to 0.6, possible presence of water drops with diameter  $50\text{--}500 \times 10^{-6}$  m generated by safety systems, possible presence of carbon monoxide. Additionally, ignition and detonation criteria data for SA conditions will be received in the first paragraph's experiments. Influence of ignition source parameters is investigated.

Second paragraph's experiments allow to investigate flame propagation, change in propagation regimes and influence of obstacles in homogeneous and generated by jet outflow mixtures. In these experiments precision methods of flame propagation registration are used. These experiments together with third paragraph's experiments allow to estimate the influence of scale changing.

HGVM jet outflow is of particular danger while drying of active core under SA. Hydrogen outflow rate may reach values up to  $\sim 1$  kg/c. Therefore ignition criterion obtained for homogeneous mixtures is no more applicable. Stirring of mixture components may accelerate or reduce deflagration. Obstacles may accelerate or reduce deflagration in the event of flame crossing between communicating facilities of NPS.

Third paragraph's experiments have two formulations: in transparent weak prototypes of steam-generating build-

ings under conditions similar to atmospheric and in strong containers. First type experiments are necessary to work through registration methods and to checkout accessory equipment. Second type experiments implemented in SA conditions are primary.

Obtained information will be used for the development of mathematical models and verification of computational codes.

---

5-12

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫХ ПЛАМЕН В ИНТЕРЕСАХ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В МАСШТАБЕ 1:200

Н. Б. Аникин, А. В. Павленко,  
С. И. Балабин, О. Е. Шестаченко,  
А. Н. Григорьев, И. Л. Бугаенко, Ю. А. Пискунов

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

В работе представлены результаты экспериментального исследования пламен в предварительно перемешанных водородо-воздушных смесях при нормальных условиях. Пламена инициировались искровым разрядом энергией  $\sim 10$  мДж в канале квадратного ( $138 \times 138$  мм) сечения. Эволюция пламен исследовалась теньвым методом с использованием прибора ИАБ-451. Содержание водорода в смеси варьировалось в диапазоне 6–16%. Было исследовано развитие пламен как вблизи искрового промежутка, так и на расстоянии 1 м от него. В смесях, содержащих 6% и 10% водорода, было исследовано влияние горизонтальной и вертикальной перегородок сечением 1:10 и 3:100 к сечению канала.

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDROGEN-AIR FLAMES FOR HYDROGEN SAFETY CONCERN IN 1:200 SCALE

N. B. Anikin, A. V. Pavlenko,  
S. I. Balabin, O. E. Shestachenko,  
A. N. Grigoriev, I. L. Bugaenko, Yu. A. Piskunov

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

In this work results of an experimental investigation of premixed hydrogen-air flames under normal conditions are presented. The flames were initiated by spark with energy  $\sim 10$  mJ in a squared channel with section  $138 \times 138$  mm. The flames evolution was investigated using shadowgraph IAB-451. Hydrogen content in the investigated mixtures was varied in the range 6–16%. Flame propagation both near the spark gap section and 1 m away from it has been investigated. In the mixtures containing 6% and 10% of hydrogen the influence of both horizontal and vertical diaphragms with openings of 1:10 and 3:100 of full channel cross-section has been investigated.

---

5-13

### РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ВОДОРОД-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ ПОД КУПОЛОМ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПРИ ТЯЖЕЛОЙ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ

И. В. Глазырин, С. И. Балабин, И. Л. Бугаенко,  
А. В. Карпеев, О. Г. Котова, Н. А. Михайлов,  
А. А. Надольский, А. В. Павленко,  
В. А. Симоненко, О. В. Шульц

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

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

Представлены результаты численного моделирования поступления водяного пара и водорода под купол реактора в аварийном режиме. Рассчитано горение водород-кислородной смеси и возникающее максимальное давление под куполом. Исследована зависимость результатов от механизма инициализации реакции горения.

Для характерных параметров аварии определены: время накопления водорода под куполом, процентное содержание и однородность распределения веществ.

Время воспламенения водород-кислородной смеси не оказывает существенного влияния на процесс горения, избыточное давление достигает 9 атм, что критично для сохранности конструкции.

### NUMERICAL STUDY OF HYDROGEN-OXYGEN MIXTURE COMBUSTION IN NUCLEAR REACTOR DOME DURING SEVERE ACCIDENT

I. V. Glazyrin, S. I. Balabin, I. L. Bugaenko,  
A. V. Karpeev, O. G. Kotova, N. A. Mikhaylov,  
A. A. Nadolskii, A. V. Pavlenko,  
V. A. Simonenko, O. V. Shults

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

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

The simulation analyzes the water vapor and hydrogen inflow into a nuclear reactor dome during the accident. Calculation has been made for the combustion of hydrogen-oxygen mixture and maximal pressure under the reactor dome. The dependence of results from the initialization model of the combustion reaction has been investigated.

Time interval of hydrogen accumulation under the dome, percentage, and uniformity of matters distribution have been calculated for typical parameters of the accident.

The ignition moment of the hydrogen-oxygen mixture doesn't have significant influence on the combustion process. Overpressure has come up to about 9 atm that is critical for the construction safety.

5-14

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА НИТРИДНОГО ОЯТ

А. М. Потапов

Институт Высокотемпературной электрохимии УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: A.Potapov\_50@mail.ru

Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) содержит большое количество осколочных элементов. Для целей переработки нужно знать его вещественный состав, то есть в состав каких соединений входят эти элементы.

Целью настоящей работы является установление равновесного вещественного состава нитридного ОЯТ.

Для достижения этой цели: (1) были собраны термодинамические данные по большому количеству возможных соединений элементов, содержащихся в ОЯТ; (2) оценены недостающие термодинамические величины. Это, например, термодинамические величины для CmN, для ряда сплавов (UPuPd, UPuRu) и некоторые другие; (3) использованы аналогии и тенденции в изменении свойств в периодической системе, чтобы оценить свойства некоторых элементов и соединений. Это, например, свойства технеция, взаимная устойчивость сплавов благородных металлов.

Моделирование проводилось с использованием термодинамической программы HSC-7.1 Chemistry. Было найдено, что при температурах порядка 1000 К и выше, ОЯТ представляет собой гомогенный твердый раствор нитридов большинства элементов в исходной матрице  $U_{0.8}Pu_{0.2}$ . В виде отдельных фаз находятся такие металлы, как Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, а также ряд интерметаллидов UPd<sub>3</sub>, URh<sub>3</sub>, URu<sub>3</sub>, CeRu<sub>2</sub>, BaTe. При понижении температуры из твердого раствора происходит выделение дополнительных фаз.

### THERMODYNAMIC SIMULATION OF THE NITRIDE SNF

А. М. Потапов

Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch  
of RAS, Ekaterinburg, Russia

E-mail: A.Potapov\_50@mail.ru

Spent nuclear fuel (SNF) contains a large number of elements – fission products. For the purpose of processing is necessary to know its chemical composition, ie substances which are composed of these elements.

The aim of this work is to establish the equilibrium, material composition of the nitride SNF.

To achieve this goal: (1) the thermodynamic data on a large number of possible compounds of the elements contained in spent fuel were collected; (2) the missing thermodynamic quantities were evaluated. These are, for example, the thermodynamic quantities for CmN, for a number of alloys (UPuPd, UPuRu) and some others; (3) to evaluate the properties of certain elements and compounds various analogies and trends in properties in the periodic system were used. These are, for example, properties of technetium

and information on mutual stability of some alloys of noble metals.

Simulation was carried out using the thermodynamic program HSC-7.1 Chemistry. At the temperatures of about 1000 K and above, it was found, the SNF is homogeneous solid solution nitrides of most elements in the original matrix  $U_{0.8}Pu_{0.2}$ . Metals such as Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, and a number of intermetallic compounds,  $UPd_3$ ,  $URh_3$ ,  $URu_3$ ,  $CeRu_2$ , BaTe, are as separate phases. With decreasing temperature, extra phases segregate from the solid solution.

---

5-15

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ  
ПРОЦЕССА КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО  
СИНТЕЗА ПОРОШКОВ  
МОНОНИТРИДА УРАНА И ПЛУТОНИЯ**

И. В. Пешкичев, О. В. Шульц, А. А. Скибо,  
Е. А. Белоногова, А. Е. Паукова, В. А. Симоненко,  
В. П. Соколов, И. Р. Makeeva

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

Для сокращения количества экспериментов, необходимых для оптимизации режима проведения синтеза нитридов урана и плутония целесообразно использование средств математического моделирования.

При разработке модели процесса карботермического синтеза нитридов рассмотрены два варианта транспорта углерода внутрь зерен диоксидов урана и плутония: газотранспортный и поверхностной диффузией. Сформулирован предположительный механизм процесса для варианта транспорта углерода через газовую фазу. Процесс разбит на следующие стадии:

1. диффузионное насыщение азотом каналов (пространства между зёрнами) брикета;
2. образование газообразного промежуточного продукта, обеспечивающего транспорт углерода;
3. диффузия промежуточного продукта к поверхности зерен оксидов;
4. диффузия промежуточного продукта и азота в поры зерен оксидов;
5. реакция с образованием нитридов и CO;
6. диффузия CO с поверхности зерен в каналы брикета;
7. диффузия CO из каналов брикета в объем реактора;
8. отвод CO из объема реактора потоком азота.

Для этих механизмов в виде дифференциальных уравнений записаны уравнения математической модели для кинетики изменения количеств компонентов в системе в ходе реакции. В состав уравнений входят параметры, описывающие свойства вещества, характеризующие условия проведения процесса и геометрию частиц и брикета. Результаты тестовых расчетов показали качественное и удовлетворительно количественное совпадение с экспериментальными данными.

Таким образом, для карботермического синтеза сформулирована математическая модель процессов в

параметрическом виде, что обеспечивает возможность описания целого спектра режимов. Создан макет программного модуля для расчета состава получаемых порошков в зависимости от режима и исходных параметров процесса.

**DEVELOPING OF COMPUTER MODELS  
FOR CARBOTHERMIC REDUCTION  
OF URANIUM AND PLUTONIUM OXIDES**

I. V. Peshkichev, O. V. Shults, A. A. Skibo,  
E. A. Belonogova, A. E. Paukova, V. A. Simonenko,  
V. P. Sokolov, I. R. Makeeva

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

Mathematical simulation makes it possible to reduce a set of experiments which are necessary for optimization of uranium and plutonium nitrides synthesis process.

While working out the carbothermic synthesis model two variants of transport of carbon in uranium and plutonium oxides grains are considered: gas-transport and superficial diffusion. The presumable mechanism of process for the variant of transport of carbon through a gas phase has been formulated. The process is divided into following stages:

1. Diffusion saturation of briquette channels (space between grains) by nitrogen.
2. Formation of the gaseous intermediate product providing transport of carbon.
3. Diffusion of an intermediate product to the surface of oxides grains.
4. Diffusion of an intermediate product and nitrogen into the pores of oxides grains.
5. Reaction with formation of nitrides and CO.
6. Diffusion of CO from the surface of grains into briquette channels.
7. Diffusion of CO from briquette channels into reactor body.
8. Removal of CO from a reactor body by nitrogen stream.

The kinetics of change in number of system components during reaction for these mechanisms is written down in the form of the differential equations. The equations contain parameters describing substance properties and characterizing the conditions of carrying out the process and also particles and briquette geometry. Results of test calculations have shown qualitative and satisfactory quantitative coincidence with the experimental data.

Thus, for carbothermic synthesis the mathematical model of processes has been formulated in a parametrical form, which provides the possibility of describing the whole spectrum of modes. The program prototype for calculating the composition of obtained powders has been created depending on process mode and initial parameters.

---

5-16

**АДРОННАЯ ТЕРАПИЯ**С. И. Самарин<sup>1</sup>, В. И. Костюченко<sup>2</sup><sup>1</sup>Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия<sup>2</sup>ФГБУ ГНЦ РФ Институт Теоретической  
и Экспериментальной Физики, Москва, Россия

E-mail: Samarine@mail.ru; kv-i@ya.ru

В работе представлено одно из направлений радиационной терапии – так называемая адронная терапия и ее частный случай – протонная терапия. Представлены истоки данного способа лечения злокачественных опухолей, его достоинства и недостатки. Приведен обзор используемых технологий, текущее состояние этого направления в Мире и в России, крупных корпораций, вовлеченных в эту сферу деятельности, истории развития и тенденции данного направления.

Данное направление в медицине является одним из самых сложных в техническом плане и требует кооперации усилий специалистов из различных областей науки и техники: медики, биологи, физики – дозиметристы, физики – ускорительщики, конструктора, программисты. Поэтому в работе уделено внимание обзору конференций, посвященных этой теме, особенно специализированной ежегодной конференции PTCOG (Particle Therapy Co-Operative Group), которая специально была создана для обеспечения возможности общения между такими специалистами.

Кроме того, в работе приведен обзор совместных работ РФЯЦ ВНИИТФ и ИТЭФ по созданию программного обеспечения для системы планирования лечения в центре протонной терапии ИТЭФ, Москва. Приведен обзор возможных направлений сотрудничества в области развития методик для проведения прецизионных расчетов дозовых полей.

**HADRON THERAPY**S. I. Samarin<sup>1</sup>, V. I. Kostyuchenko<sup>2</sup><sup>1</sup>Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research  
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia<sup>2</sup>ITEP, Moscow, Russia

E-mail: Samarine@mail.ru; kv-i@ya.ru

The paper presents a radiation therapy, specifically hadron therapy and proton therapy as its special case. It considers the background of this method for cancer treatment along with its advantages and disadvantages. The consideration includes an overview of technologies in use, current status in the world and in Russia, and in large corporations involved in the area, historical development and current tendencies.

This type of therapy is one of the most complicated technologically and requires a cooperative effort of experts in different areas of science and technology: medicine, biology, health physics, accelerator physics, engineer-

ing, programming etc. That is why we draw attention to conferences in the area, especially the dedicated PTCOG (Particle Therapy Co-Operative Group) meetings which are conducted once a year to allow active communication between the experts.

Also, the paper discusses activities implemented jointly by RFNC-VNIITF and ITEP to develop a software package for treatment planning at the ITEP Proton Therapy Center, Moscow. Potential directions of further cooperation are proposed, including advanced techniques for precision dose calculations.

5-17

**ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ МК IThMC**В. И. Костюченко<sup>1</sup>, А. С. Макарова<sup>1</sup>,  
С. И. Самарин<sup>2</sup>, А. С. Углов<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский  
институт», РФ, Москва<sup>2</sup> Российский Федеральный Ядерный Центр –  
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,  
Снежинск, Россия

E-mail: s.i.samarin@vniitf.ru; kv-i@ya.ru

Специализированная программа Монте-Карло IThMC разработана в ходе выполнения проекта МНТЦ № 3563 специалистами ВНИИТФ и ИТЭФ. Она предназначена для моделирования пучков ускоренных протонов, используемых в протонной терапии, и расчета дозовых полей в сложных гетерогенных объектах с подробным воксельным представлением информации. Доклад посвящен проблемам верификации физических моделей, используемых в IThMC.

Специфика использования программы в радиационной медицине, а в частности, в составе Системы Планирования PROCOM, с помощью которой прогнозируются дозовые поля для облучения реальных мишеней, накладывает жесткие требования не только на точность расчетов, но и на надежность и достоверность получаемой информации. Поэтому, прежде чем ввести программу в эксплуатацию, требуется детальная верификация как отдельных физических моделей, используемых в коде, так и влияния неточностей на конечный результат. Конечным результатом работы должно быть получение государственного сертификата на использование этой программы в медицине.

На ЗНЧ-11 в 2012 году представлялся доклад о верификации модели учета ядерных взаимодействий, происходящих при взаимодействии протонов медицинского диапазона энергий с облучаемой средой. Тогда нам удалось смоделировать условия эксперимента, который описан в литературе и использовался для верификации всех наиболее известных кодов МК, провести расчеты и сравнить их с экспериментальными результатами. Теперь мы дополнили эти сравнения с расчетами по GEANT 4, международным программным комплексом, основанным на методе Монте-Карло, считающимся «золотым» стандартом в области физики высоких энергий. Результаты, полученные с помощью про-



граммы IThMC не уступают полученным с помощью GEANT 4. Кроме того, результаты сравнения доведены до количественного представления в терминах поглощенной дозы.

Кроме того, в настоящем докладе приводятся результаты верификации модели расчета многократного кулоновского рассеяния, используемой в IThMC. Многократное рассеяние не только влияет на форму дозовых распределений при прохождении протонного пучка через сложные гетерогенные структуры, этот физический процесс с успехом используется при конструировании систем формирования дозовых распределений. Верификация проведена на основе экспериментального материала, полученного в ИТЭФ. Как и в случае с ядерными взаимодействиями расчеты дублировались по программе, основанной на GEANT 4 и было установлено, что модель, используемая в IThMC, учитывает многократное рассеяние лучше, чем модель, которая используется по умолчанию в GEANT 4.

#### VERIFICATION OF A MONTE CARLO-BASED PROGRAM ITHMC

V. I. Kostjuchenko<sup>1</sup>, A. S. Makarova<sup>1</sup>,  
S. I. Samarina<sup>2</sup>, A. S. Uglov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Federation Research Center ITEP, The Kurchatov Institute Association, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia  
E-mail: s.i.samarin@vniitf.ru; kv-i@ya.ru

A special-purpose Monte Carlo-based program IThMC has been developed at VNIITP and ITEP in the framework of the MSTC project 3563. The program was designed to model the beams of accelerated protons used in proton therapy, and to compute dose distributions in complex heterogeneous objects rendered by detailed voxelized data. This report presents the results of a verification of the physical models employed in IThMC.

Specific nature of the program's application in radiation medicine – and, in particular, within the PROCOM dose planning system used for dose distribution calculations in clinical targets – places high requirements on the precision, reliability and accuracy of the computed results. Therefore the program's commissioning must be preceded by a verification of physical models used in the code and by testing the robustness of the output against input data uncertainties. This development project should conclude with the receipt of a national certificate for the clinical use of the program.

A verification of a model for proton-medium nuclear interactions in a clinical energy range was presented during the 2012 Zababakhin Scientific Readings. The authors reported on modeling of an experiment that had been previously published in the literature and used as a benchmark for other MC codes. Computation results were presented and compared with the published experimental data. The current report adds similar computations using GEANT 4, a MC-based program developed in an international collaboration and regarded as a golden standard in high-energy physics modeling. The results obtained with IThMC are presented in terms of absorbed dose and compare favorably with those of GEANT 4.

This report also presents verification results of a multiple Coulomb scattering model (MCS) employed in the IThMC code. MCS is important in calculating dose distributions resulting from the interaction of a proton beam with a heterogeneous medium. It is also used in the design of passive scattering dose delivery systems. The verification was performed using experimental data obtained at ITEP. As in the case of the nuclear interaction model verification, computations were also compared to GEANT 4. A conclusion is made that the IThMC model describes the multiple Coulomb scattering more accurately than the default GEANT 4 model.

5-18

#### КОМПЛЕКСНОЕ ЛЕЧЕНИЕ РЕЦИДИВОВ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ГЛИОМ

О. Н. Давыдова, А. В. Важенин, Т. М. Шарабура,  
М. М. Пименова, А. В. Сеницын

Челябинский областной клинический онкологический диспансер, Челябинск, Россия

Южно-Уральский государственный медицинский университет, Челябинск, Россия

E-mail: Olga\_davydova\_641@mail.ru

Цель работы: изучение результатов комплексной терапии рецидивов злокачественных глиом головного мозга для оптимизации выбора метода лечения.

Материалы и методы: изучены результаты комплексного лечения 40 пациентов с рецидивами злокачественных глиом за период с 2007 по 2012 гг. 55% (22 человека) исследуемых составили мужчины, 45% (18 человек) – женщины. Медиана возраста 46 лет. Все пациенты получили лечение по поводу первичной опухоли в соответствии со стандартами. Медиана выживаемости до рецидива составила 15 месяцев. У половины пациентов был зафиксирован рецидив глиобластомы; у 12 – анапластической астроцитомы; у 5 – анапластической олигодендроглиомы. Отдельно была выделена группа больных, у которых в процессе рецидива возникла трансформация доброкачественной астроцитомы в злокачественную глиому (Grade III, либо IV) – 5 человек. Повторно оперированы 19 человек. Всем больным проведено повторное облучение. В 22 случаях проведена дистанционная лучевая терапия (6 пациентам – комформная, конвенциональная – 16). Суммарная доза повторного облучения составила от 18 Гр до 55 Гр до суммарной кумулятивной дозы, не превышающей 100 Гр. 18 пациентам проведено стереотаксическое облучение (от 5 до 9 Гр за 3–7 сеансов) на аппарате Cyber Knife. 28 больных получили циклы химиотерапии темодалом, либо бевазизумабом.

Результаты исследования: медиана общей выживаемости составила 31 месяц. Медиана выживаемости после выявления рецидива была равна 14 месяцам. Наименьшая продолжительность жизни отмечена у пациентов с глиобластомой. Показатели выживаемости были выше при благоприятных факторах прогноза. Анализ выживаемости в зависимости от метода проведенного лечения показал, что дольше жили пациенты, которым была проведена повторная операция и химиотерапия.

Выводы: высокопрецензионные методики (стереотаксическая, конформная лучевая терапия) расширяют возможности повторного облучения, поскольку они позволяют точнее подвести дозу к опухоли с меньшей травматизацией здоровых тканей. Комплексная терапия, включающая хирургическое лечение, лучевую и системную терапию обеспечивает наиболее высокую выживаемость.

#### COMBINATION THERAPY OF RECURRENT MALIGNANT GLIOMAS

O. N. Davydova, A. V. Vazhenin, N. M. Sharabura,  
M. M. Pimenova, A. V. Sinitsyn

Chelyabinsk region clinical oncologic dispensary, Chelyabinsk,  
Russia

South Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: Olga\_davydova\_641@mail.ru

Work objective: studying results of combination therapy for the recurrent cerebral malignant glioma to optimize therapeutic decision.

Materials and methods: consideration was given to the results of combination therapy taken by 40 patients with recurrent malignant glioma in 2007 through 2012. A total of 55% (22 persons) of patients were men, 45% (18 persons) – women. Median age was 46 years. All patients were treated for primary tumor in accordance with standards. Median survival up to a recurrent tumor was 15 month. Half of patients were diagnosed to have recurrent glioblastoma; 12 patients had recurrent anaplastic astrocytoma; and another 5 patients – anaplastic oligodendroglioma. There was a group of patients who suffered transformation of benign astrocytoma into malignant glioma in the course of recurrence (Grade III or IV) – 5 patients. A total of 19 persons were operated for the second time. All patients took radiotherapy for the second time. The external-beam radiotherapy was taken in 22 cases (for 6 patients – conformal, conventional – 16). The total dose of reirradiation ranged from 18 Gy to 55 Gy up to the accumulated dose that is not higher than 100 Gy. A total of 18 patients underwent stereotaxic irradiation (from 5 to 9 Gy during 3–7 treatment sessions) with the help of the Cyber Knife apparatus. A total of 28 patients took temozolomide or bevacizumab chemotherapy.

Study results: total median survival was 31 month. Median survival after recurrent diagnosis was 14 months. Patients with glioblastoma had the shortest life time. The survival rate was higher in the case of favorable prognosis for a disease. Survivability analysis depending on the treatment method demonstrated that the life time was longer with the patients who were operated for the second time and then took a course of chemotherapy.

Conclusions: high-precision techniques (stereotaxic, conformal radiotherapy) expand capabilities of reirradiation as they make it possible to deliver a dose to a tumor with the least injurious exposure of sound tissues. Combination therapy that includes surgical treatment, radiotherapy, and systemic treatment make provisions for higher survivability.

5-19

#### КОНФОРМНАЯ ЛУЧЕВАЯ ТЕРАПИЯ, КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЩЕЙ ВЫЖИВАЕМОСТИ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ЛЕЧЕНИИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ГЛИОМ ГОЛОВНОГО МОЗГА

М. М. Пименова, А. В. Важенин, Т. М. Шарабура,  
О. Н. Давыдова, А. В. Синицын

Челябинский областной клинический онкологический  
диспансер, г. Челябинск, Россия

Южно-Уральский государственный медицинский  
университет, г. Челябинск, Россия

*Цель работы:* анализ результатов общей выживаемости с использованием конформной лучевой терапии при комплексной терапии злокачественных глиом головного мозга.

*Материалы и методы:* Изучены результаты комплексной терапии у 85 пациентов со злокачественными глиомами головного мозга, получивших лечение с 2008 г. по 2012 г. Из них 65 пациентов было с глиобластомами (ГБ) и 20 пациентов с анапластическими астроцитомами (АА). Средний возраст составил 50,1±13,4 лет, соотношение мужчин и женщин 1:1. У пациентов с ГБ была проведена химиолучевая терапия препаратом Темодал.

В зависимости от техники проведения лучевой терапии все пациенты были разделены на 2 группы: 39 пациентам проведена конформная лучевая терапия и 46 пациентов получили конвенциональное облучение.

Результаты исследования: проведена оценка результатов лечения в зависимости от техники проведения лучевой терапии. Медиана общей выживаемости больных со злокачественными глиомами составила 18,2 месяцев. Показатель общей выживаемости оказался достоверно выше у пациентов, получивших конформное облучение в сравнении с пациентами, получившими конвенциональное облучение и составил 11 и 17 месяцев ( $p=0,003$ ), в группе ГБ 19 и 23 месяцев в группе АА ( $p=0,664$ ).

*Выводы:* применение конформной лучевой терапии в комплексном лечении злокачественных глиом головного мозга позволяет достигнуть более высоких показателей общей выживаемости по сравнению с конвенциональной лучевой терапией.

#### CONFORMAL RADIOTHERAPY AS A FACTOR INFLUENCING OVERALL SURVIVAL IN COMBINATION THERAPY FOR CEREBRAL MALIGNANT GLIOMA

M. M. Pimenova, A. V. Vazhenin, N. M. Sharabura,  
O. N. Davydova, A. V. Sinitsyn

Chelyabinsk region clinical oncologic dispensary,  
Chelyabinsk, Russia

South Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia

Work objectives: analysis of overall survival due to conformal radiotherapy in combination therapy for cerebral malignant glioma.

Materials and methods: consideration was given to the results of combination therapy taken by 85 patients with malignant glioma in 2008 through 2012. Among them, 65 patients had glioblastoma and 20 patients – anaplastic astrocytoma. Average age was  $50.1 \pm 13.4$  years, men-women ratio was 1:1. Patients with glioblastoma took temozolomide chemotherapy.

Depending on the chemotherapy technique, all patients were divided into 2 groups: 39 patients took conformal radiotherapy and 46 patients took conventional radiotherapy.

Study results: results of treatment were estimated depending on radiotherapy technique. Overall median survival of patients with malignant glioma was 18.2 months. The overall survival rate was reliably higher for patients who took conformal radiotherapy compared to those who took conventional radiotherapy, i.e. 11 and 17 months ( $p=0.003$ ): in the glioblastoma group – 19 months and in the anaplastic astrocytoma group – 23 months ( $p=0.664$ ).

Conclusions: conformal radiotherapy in combination therapy for cerebral malignant glioma makes provisions for higher total survivability compared to conventional radiotherapy.

---

5-20

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ РАКА ОРОФАРИНГЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

А. А. Ложков, А. В. Важенин, Т. М. Шарабура

ГБУЗ «Челябинский областной клинический онкологический диспансер», г. Челябинск, Россия

ГБОУ ВПО «Южно-Уральский Медицинский Государственный Университет», г. Челябинск, Россия

E-mail: roc\_chel@mail.ru

*Введение:* Лучевая и химио-лучевая терапия занимают ведущие положения в структуре методов специального лечения орофарингеальной зоны. Внедрение в практику современных методов лучевой терапии, основанных на использовании трехмерной визуализации, позволяет индивидуализировать выбор объема облучения.

*Цель работы:* определение эффективности и токсичности лучевой терапии, проводимой по радикальной программе у пациентов с раком орофарингеальной области с использованием конвенциональной методики с расщепленным курсом, методики конформной лучевой терапии и сочетанного лучевого лечения с включением в схему лечения высокоомощной внутритканевой конформной брахитерапии.

*Материалы и методы:* С 2010 по 2012 годы 105 человек с плоскоклеточным раком орофарингеальной области получили курсы лучевой терапии по радикальной программе. В том числе 70 человек получили лечение с использованием конвенциональной методики с расщепленным курсом, 20 человек – с использованием конформной лучевой терапии и 15 человек – с использованием внутритканевой конформной брахитерапии с высокой мощностью дозы.

*Результаты:* Лучевые реакции в виде мукозита 2–3 степени зафиксированы у всех пациентов в группе конвенциональной лучевой терапии, что требовало

проведение плановых перерывов. При проведении конформной лучевой терапии мукозит 1 степени зафиксирован у 9 (45%) пациентов, 2 степени – у 9 (45%) и 3 степени – у 2 (10%) пациентов. В двух случаях понадобился перерыв до 5 дней для купирования лучевой реакции. Лучевой мукозит после проведения брахитерапии развивался через 4–7 дней после окончания лечения и носил локальный характер в области установленных интрастатов. У 9 (60%) пациентов зафиксирован мукозит 1 степени, у 6 (40%) – 2 степени. Однолетняя безрецидивная выживаемость составила в 1 группе 36%, во 2 группе – 40% и в 3 группе – 54%.

*Выводы:* Применение современных методов конформной лучевой терапии и сочетанной лучевой терапии с внутритканевой брахитерапии с высокой мощностью дозы позволяют снизить степень выраженности лучевых реакции и повысить локальный контроль в сравнении с конвенциональной методикой.

### MODERN RADIOTHERAPY TECHNOLOGY OF OROPHARENCEAL CANCER

A. A. Lozhkov, A. V. Vazhenin, T. M. Sharabura

GBUZ «Chelyabinsk Regional Clinical Oncology Dispensary», Chelyabinsk, Russia

Medical University «South Ural State Medical University», Chelyabinsk, Russia

E-mail: roc\_chel@mail.ru

*Introduction:* Radiation and chemo- radiotherapy occupy the leading position in the structure of special treatment methods oropharyngeal cancer. Implementation in practice of modern methods of radiation therapy based on the use of three-dimensional visualization, helps to individualize the choice of irradiation volume.

*Purpose:* To determine the efficacy and toxicity of radical radiation therapy of oropharyngeal cancer using conventional techniques with a split course, methods of conformal radiation therapy and radiation therapy combined with high dose rate conformal interstitial brachytherapy.

Materials and Methods: From 2010 to 2012, 105 patients with oropharyngeal squamous cell carcinoma received radiation therapy by radical program. Including 70 people have been treated using conventional methods with a split course, 20 people – using conformal radiotherapy and 15 people – with conformal high dose interstitial brachytherapy.

*Results:* Radiation toxicity in the form of grade 2–3 mucositis were recorded in all patients in the conventional radiotherapy, which required the holding of scheduled breaks. During the conformal radiation therapy of mucositis grade one fixed in 9 (45%) patients, grade 2 – 9 (45%) and grade 3 – у 2 (10%) patients. In two cases needed a break up to 5 days for relief of radiation toxicity. Radiation mucositis after brachytherapy developed after 4–7 days after treatment and wore local character set in Intrastat. In 9 ( 60%) patients recorded mucositis grade 1, 6 (40%) – grade 2 1 one-year free survival in group 1 was 36% in group 2 – 40% and in group 3 – 54%.

---

5-21

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУЙНЫХ ВЫБРОСОВ  
И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ХАРАКТЕРА  
ТЕЧЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ  
ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ИЗОЛИРОВАННЫХ  
КАМЕРАХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ПОМЕЩЕНИЯ  
ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АТОМНЫХ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

С. Д. Пасюков, М. В. Никифоров

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

Практика проектирования АЭС с водо-водяным энергетическим реактором требует достоверного предсказания распространения в объеме защитной оболочки АЭС водородосодержащих парогазовых смесей (ВПГС), условий возникновения горения этих смесей и моделирования воздействия и последствий горения на защитную оболочку в процессе тяжелых аварий. Авария на АЭС «Фукусима» заострила вопрос обеспечения водородной взрывобезопасности АЭС. В докладе приведены результаты первого этапа работ по изучению распространения струйных выбросов ВПГС в изолированных и связанных камерах, моделирующих помещения защитной оболочки атомных электростанций.

Основной частью доклада является представление результатов опытов по визуализации струйных выбросов и пространственного характера течения ВПГС в системе связанных помещений. В зависимости от состава и скорости истечения ВПГС использовались различные методики визуализации:

- BOS-метод;
- теневая съемка;
- высокоскоростная видеосъемка;
- инфракрасная видеосъемка;
- видеосъемка с лазерной подсветкой и другие методики.

В докладе также дано описание постановки опытов, приведены полученные фото.

Продолжение данной работы позволит получить экспериментальные данные для модернизации и верификации существующих CFD и контайментных кодов. Также, полученные результаты лягут в основу дальнейшего изучения влияния на водородную безопасность АЭС работы таких систем безопасности как рекомбинаторы водорода, спринклеры, и т.п.

**VISUALIZATION OF JET EMISSIONS  
AND SPATIAL BEHAVIOR  
OF THE HYDROGENEOUS VAPOR-GAS MIXTURE  
FLOW IN ISOLATED CHAMBERS MODELING  
NUCLEAR POWER PLANT CONTAINMENT**

S. D. Pasyukov, M. V. Nikiforov

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

Designing of NPP with water-cooled power reactor requires reliable prediction of hydrogenous vapor-gas

mixture (HVGМ) propagation within NPP containment, as well as of conditions for this mixture combustion initiation. Combustion impact on the containment under severe accidents and consequences thereof shall be also simulated.

The Fukushima Plant accident has pinpointed the issue of hydrogen-explosion safety. This paper provides results of the first stage aimed to investigate propagation of HVGМ jet emissions in the isolated and coupled chambers that model nuclear power plant containment.

The main body of the paper gives the experimental results on visualization of jet emissions and spatial behavior of HVGМ flow in the system of coupled chambers. Depending on HVGМ composition and outflow rate, the following visualization techniques and methods were used:

- BOS-method,
- Shadow photography,
- High-speed video recording,
- Infrared video recording,
- Laser-illumination video recording, etc.

The paper also describes the experimental setup and gives pictures obtained with the help of the above methods.

Further stages of investigations will provide experimental data for updating and validation of CFD and containment codes. The obtained results will serve the basis for the follow-on studies how NPP hydrogen-explosion safety depends on such safety systems as hydrogen recombiners, sprinklers, etc.

5-22

**ХИТИН-ХИТОЗАН КАК СОРБИРУЮЩИЙ  
МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ  
УТЕЧКИ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ  
ПРИ АВАРИЙНОМ ЗАТОПЛЕНИИ**

Т. В. Казаковская, В. М. Щербаков,  
Э. Ю. Горячев, А. М. Горелов

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

E-mail kaz@astra.vniief.ru

Как известно, при аварийном затоплении возможна разгерметизация узлов и утечка радиоактивных веществ в окружающую среду. Одним из вариантов решения проблемы сохранения безопасности окружающей среды является использование порошковых сорбирующих материалов. Таким образом, актуальной остается задача изучения имеющихся и поиск новых сорбентов для предотвращения опасных ситуаций. Одним из таких натуральных сорбентов является натуральный сорбент-биополимер на основе хитина-хитозана, который получается

Цель настоящего исследования состояла в исследовании сорбирующей способности сыпучих материалов на основе хитин-хитозана различных партий, изучение структуры и определение физической стабильности этих материалов в условиях, имитирующих глубоководное затопление.

## Объект и методы исследований

Для проведения работ использовали: порошкообразный материал ХИЗИТ-03 трех фракций, ХИЗИТ-02 омедненный, ХИТОЗАН диацетилованный. Кроме того, исследования проводили на двух партиях хитин/хитозана в виде гелей. В ходе исследования измеряли удельную массу, микротвердость, степень набухания в различных растворах, определяли элементный состав порошков и гелей, проводили дисперсионный анализ, использовали метод электронной микроскопии. Имитацию хранения хизита в условиях, приближенным к условиям глубоководного затопления подводной лодки проводили в морской воде при температуре  $-1^{\circ}\text{C}$  и давлении 170 атм на лабораторной установке. Эту же установку использовали для изучения сорбционных свойств материала по отношению к радиоактивным изотопам при давлении. Определение концентраций радиоактивных изотопов в морской воде осуществляли с помощью масс-спектрометрического метода с использованием метода изотопного разбавления.

## Результаты

Содержание радиоактивных изотопов в растворе морской воды при комнатной температуре в присутствии хитин-хитозанового геля существенно уменьшается в диапазоне рН 5,6–8,6. Были рассчитаны «кажущиеся» коэффициенты распределения радиоактивного изотопа между морской водой и гелем на основе хитин/хитозана. Было получено, что хитин/хитозан действует избирательно по отношению к различным радиоактивным изотопам: эффективно поглощает изотопы Pu-239 и Am-241, однако по отношению к ионам урана хитин/хитозан является неэффективным сорбентом. Это можно объяснить тем, что при уменьшении температуры раствора некоторые радиоактивные металлы переходят в раствор в виде карбонатов, что существенно снижает эффективность использования хитин/хитозана в качестве сорбента при аварийном затоплении.

Кроме того, были исследованы локализирующие свойства хитин/хитозана. Изучение проводили на 4 видах образцов. Было показано, что слой композита толщиной 10 мм надежно удерживает радиоактивные вещества в течение не менее 120 часов.

## Заключение

1. Показано, что плутоний-239 и америций-241 эффективно сорбируются из морской воды всеми видами образцов хитин/хитозана, в том числе и в условиях, близких к условиям аварийного глубоководного затопления.

2. Отмечено существенное влияние технологии приготовления композитов на микроструктуру матриала.

3. В процессе выдержки при гидростатическом давлении 170 атм наблюдается непрогнозируемое набухание.

4. На основе полученных результатов исследований представляется целесообразным применение хитозана для концентрирования и радиохимической очистки урана и трансурановых элементов, а также повышение надежности изоляции могильников радиоактивных отходов.

## Список литературы

1. Громов В. В. Растворение интерметаллида плутония в морской воде. Радиохимия. – 1996. – Т. 38, вып. 3.
2. Громов В. В. и др. Техногенная радиоактивность Мирового океана. М, Энергоатомиздат, 1985.

## CHITIN-CHITOSAN- A SORBENT PREVENTING RELEASE OF RADIOACTIVE COMPOUNDS UNDER EMERGENCY SUBMERSION

T. V. Kazakovskaya, V. M. Shcherbakov,  
E. Yu. Goryachev, A. M. Gorelov

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

E-mail kaz@astra.vniief.ru

## Introduction

It is widely known that under emergency submersion the seal failure could occur, so contaminating radioactivity could transfer to environment. One of the most promising methods to keep the environment safety is the use of powder sorbing agents. So the investigation of existing and search of new sorbents to prevent dangerous situations is a very actual task.

One of such natural sorbents is the natural sorbent-biopolymer on the basis of chitin-chitosan.

The aim of this work is to investigate the sorption of various loose materials based on chitin-chitosan, to study the structure, to determine the physical stability in conditions imitating deep-water flooding.

## Object and methods

Three kinds of materials based on chitin-chitosan were used: powdery material CHISIT-03 of three fractions, CHISIT-02 copper plated, and CHITOSAN acetylated. Besides two parties of gel chitin-chitosan were studied.

During research the specific weight, microhardness, swelling index in various solutions were measured, element composition of powders and gels was defined, such methods as dispersive analysis and electronic microscopy were used. The storage of CHISIT in the conditions of deep-water flooding was imitated using laboratory-scale plant. The tests were conducted in artificial sea water at temperature minus  $1^{\circ}\text{C}$  and pressure equal to 170 atm. The same plant was used to study sorption of the radioactive isotopes onto CHISIT under pressure.

The concentration of radioactive isotopes in sea water was determined using mass - spectrometer method with isotope dilution.

## Results

At room temperature the radioactive isotope content in sea water in the presence of chitin gel significantly decreases in the pH range 5.6–8.6. “Seeming” coefficients of distribution of a radioactive isotope between sea water and chitin gel were calculated.

It was demonstrated that chitin is a selective sorbent of various radioactive isotopes: it effectively absorbs Pu-239 and Am-241 isotopes, but is inefficient sorbent of uranium ions. It can be explained supposing that reduction of the solution temperature leads to transformation of some radioactive metals into form of carbonates, and this fact significantly decreases the efficiency of sorption properties of chitin.

Besides, localizing properties of chitin were investigated. Study was carried out using 4 types of samples. It was shown that the 10 mm thick layer reliably holds radioactive materials within not less than 120 hours.

### Conclusion

1. It was shown that plutonium-239 and americium-241 are effectively sorbed from sea water by all samples of chitin / chitosan in the conditions imitating emergency deep-water flooding.

2. The essential influence of preparation technology of composites on material microstructure was noted.

3. During the exposure under pressure equal to 170 atm the non-predicted swelling was observed.

4. It is advisable to use chitin-chitosan for concentration and radiochemical purification of uranium and transuranium elements, and to increase the reliability of isolation of radioactive waste repositories.

### References

1. Gromov V. V. Dissolving of plutonium intermetallic compound in seawater. Radiochemistry, 1996. – V. 38, issue. 3.
2. Gromov V. V. et al. Technogenic radioactivity of the World ocean. M, Energoatomizdat, 1985. Scientific and

новок» с различными актуальными толщинами листов, которые разыгрывались на стадии задания исходных данных в соответствии с нормальным распределением с математическим ожиданием, соответствующим средней толщине листов. Среднеквадратичное отклонение от средней величины соответствует 2%.

Учет неопределенностей приводит к естественному разбросу в рассчитываемых значениях из-за возможных различных суммарных толщин пластин, находящихся на пути пучка протонов. В работе показано, что поскольку функция, описывающая зависимость заряда от пройденной протоном толщины вещества, имеет резко выраженный пик, разброс возможных значений оцениваемого функционала значителен в местах наибольшего градиента и может достигать 50%.

Сильное влияние неопределенности исходных данных может проявляться на значениях доз при расчете дозовых полей в пациенте при планировании лечения, особенно в области пика Брега. В работе [3] уже указывалось на необходимость учета неопределенностей, связанных не только с геометрическими параметрами, которые могут достигать 2,5% (неопределенности данных компьютерной томографии), но и неточностями данных о взаимодействии, биологических эффектах и описании материалов. Здесь даже не упоминаются неопределенности, связанные с подвижностью органов пациента. Для учета целого комплекса неопределенностей большие надежды возлагаются на использование методов Монте-Карло и методы прямого учета неопределенностей.

### Литература

1. Gottchalk B., Platais R., Paganetti H. Nuclear Interactions of 160 MeV Protons Stopping in Copper: A test of Monte Carlo Nuclear Models // Med. Phys. 26(12) 1999. – P. 2597–2601.
2. Paganetti H., Gottchalk B. Test of GEANT3 and GEANT4 nuclear models for 160 MeV protons stopping in CH<sub>2</sub> // Med. Phys. 30 (7) 2003. – P. 1926–1931.
3. Paganetti H. Range uncertainties in proton therapy and the role of Monte Carlo simulations // Phys. Med. Biol. 57(2012) R99–R117.

5-23

## ПРЯМОЙ УЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА С 160 МЭВ-НЫМ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ В МНОГОСЛОЙНОМ ЦИЛИНДРЕ ФАРАДЕЯ

А. С. Доросев<sup>1</sup>, С. И. Самарин<sup>1</sup>, В. И. Костюченко<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ФГБУ ГНЦ РФ Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, Москва, Россия

E-mail: A.s.dorosev@vniitf.ru, Adorosev@yandex.ru; S.i.samarin@vniitf.ru, Samarine@mail.ru; kv-i@ya.ru

Метод Монте-Карло естественным образом подходит для расчета дозовых полей с учетом неизбежных неопределенностей, сопровождающих постановку задачи, при планировании лечения пациентов в пучковой терапии. Прежде всего, это неопределенности, связанные с переводом томографических данных о тканях и биологических структурах в виртуальную модель пациента, а также, неопределенности связанные с неточностью представления данных о взаимодействии протона с веществом.

Настоящая работа посвящена изучению влияния неопределенной применительно к интерпретации данных двух экспериментов Готчелка и др., которые были проведены в 1999 и 2003 годах [1, 2] на Гарвардском циклотроне с использованием многослойных цилиндров Фарадея (МСЦФ). Одной из неопределенностей в постановке экспериментов была толщины листов, из которых собирался МСЦФ. Результаты эксперимента в расчетах по программе IThMC рассматривались как одна из возможных реализаций «установки», а при проведении расчетов рассматривалась серия различных «уста-

## DIRECT ACCOUNTING FOR UNCERTAINTIES IN INITIAL DATA FROM AN EXPERIMENT WITH 160-MEV PROTONS IN A FARADAY MULTILAYER CUP

A. S. Dorosev<sup>1</sup>, S. I. Samarin<sup>1</sup>, V. I. Kostyuchenko<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

E-mail: A.s.dorosev@vniitf.ru, Adorosev@yandex.ru; S.i.samarin@vniitf.ru, Samarine@mail.ru; kv-i@ya.ru

The Monte Carlo method is inherently fit to dose calculations with their inevitable uncertainties in problem statements for beam therapy planning. The uncertainties come, first of all, from tomography data on tissues and biological structures, which are used in the virtual models of patients, and then from inaccuracies in data which describe proton interaction with matter.

The paper studies the effect of uncertainties in initial data from two experiments by Gottchalk et al [1, 2], which were done in 1999 and 2003 on the Harvard cyclotron with use of Faraday multilayer cylinders. One of the uncertainties was the thickness of sheets in the Faraday cup. In IThMC calculations the experimental results were treated as a possible implementation of the “facility”, and the calculations simulated a set of “facilities” for which the actual sheet thicknesses were defined through sampling from a normal distribution with a mean equal to the average sheet thickness. The root-mean-square deviation from the mean corresponds to 2%.

Accounting for the uncertainties leads to a natural spread in calculated values due to possible differences in the total thickness of plates the protons penetrate. We show that since the function which describes proton charge versus transmitted thickness has a sharp peak, the spread in calculated values is considerable where the gradient is maximal and may reach 50%.

Uncertainties in initial data may strongly manifest themselves in dose calculations for proton therapy planning, especially near the Bragg peak. As stated in [3], not only uncertainties which are present in geometry and may reach 2.5% (computerized tomography data) need to be accounted for, but also uncertainties in the data which describe interaction, biological effects and materials. Not even mentioned here are uncertainties that result from the motion of patient’s organs. And it is the Monte Carlo methods that are expected to help coping with a broad range of uncertainties they can allow for directly.

## References

1. Gottchalk B., Platais R., Paganetti H. Nuclear Interactions of 160 MeV Protons Stopping in Copper: A test of Monte Carlo Nuclear Models // *Med. Phys.* 26(12) 1999, P. 2597–2601.
2. Paganetti H., Gottchalk B. Test of GEANT3 and GEANT4 nuclear models for 160 MeV protons stopping in CH<sub>2</sub> // *Med. Phys.* 30 (7) 2003, P. 1926–1931.
3. Paganetti H. Range uncertainties in proton therapy and the role of Monte Carlo simulations // *Phys. Med. Biol.* 57(2012) R99–R117.

---

5-24

## РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕРХДЛИТЕЛЬНОГО СРОКА ДЕЙСТВИЯ

Б. Е. Бураков<sup>1</sup>, М. В. Заморянская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП НПО «Радиевый институт им В. Г. Хлопина»,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: burakov@peterlink.ru; zam@mail.ioffe.ru

Разработка актиноидсодержащих материалов с химически и радиационно устойчивыми матрицами может существенно изменить подходы к обращению с актиноидами. Устойчивые кристаллические «фазы-носители» актиноидов могут рассматриваться как инновационные материалы для безопасного использования

актиноидов до момента их окончательного захоронения. Одно из перспективных направлений применения данных материалов – это изготовление радиолюминесцентных источников на основе самосветящихся кристаллов. Монокристаллы циркона ZrSiO<sub>4</sub>, ксенотима YPO<sub>4</sub> и монацита EuPO<sub>4</sub> с примесью различных количеств элементов-люминофоров (Tb и Eu) и актиноидов (<sup>239</sup>Pu, <sup>238</sup>Pu, <sup>241</sup>Am) были синтезированы методом раствора в расплаве. На первом этапе изучали нерадиоактивные кристаллы с помощью метода катодолуминесценции, чтобы определить оптимальные содержания Tb<sup>3+</sup> и Eu<sup>3+</sup>, обеспечивающие максимальную интенсивность люминесценции. Далее выращивали самосветящиеся радиоактивные кристаллы с аналогичным содержанием данных люминофоров и небольшой примесью актиноидов. Было предложено не превышать содержание <sup>238</sup>Pu и <sup>241</sup>Am в самосветящихся кристаллах более 0,1 масс. %. Кристаллы циркона, ксенотима и монацита с интенсивным свечением были успешно получены и исследованы. Обсуждаются их физико-химические свойства и люминесцентные характеристики.

## DEVELOPMENT OF NEW GENERATION OF SAFE RADIO-LUMINESCENCE EMITTERS FOR VERY LONG TERM USE

B. E. Burakov<sup>1</sup>, M. V. Zamoranskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V. G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>A. F. Ioffe Physico-technical Institute, St. Petersburg, Russia

E-mail: burakov@peterlink.ru; zam@mail.ioffe.ru

Development of actinide-doped materials with matrices that are chemically inert and resistant to radiation damage may significantly change the approaches to actinide immobilization. Durable crystalline actinide host phases would be considered as advanced materials which are prospective for safe use of actinides before their final disposal. One of prospective applications of such materials is fabrication of radio-luminescence emitters with extremely durable matrices based on self-glowing crystals. Single crystals of zircon, ZrSiO<sub>4</sub>; xenotime, YPO<sub>4</sub>; and monazite, EuPO<sub>4</sub> doped with different amount of luminescence ions such as Tb, Eu and actinides such as <sup>239</sup>Pu, <sup>238</sup>Pu, <sup>241</sup>Am have been grown using flux method. Non-radioactive crystals were studied first using cathodoluminescence method in order to identify optimal contents of Tb<sup>3+</sup> and Eu<sup>3+</sup>, which provide the highest intensity of luminescence emission. Then radioactive self-glowing crystals doped with the same content of luminescence ion and small admixture of actinide were grown. It was suggested that content of <sup>238</sup>Pu and <sup>241</sup>Am in self-glowing crystals should not exceed 0.1 wt. %. Intensely glowing crystals of zircon, xenotime and monazite were successfully obtained and studied. Principal features of these crystals and their luminescence properties are discussed.

5-25

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ  
ОДИНОЧНОЙ ЦЕНТРИФУГИ  
И РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА ОСНОВЕ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
«ЦЕНТРОБЕЖНОГО» ЗАВОДА**

В. Д. Борисевич<sup>1</sup>, М. А. Борщевский<sup>1</sup>,  
И. Н. Андронов<sup>2</sup>, С. А. Сенченков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: VDBorisevich@mephi.ru; Michael\_mephi@mail.ru

Часто в официальной документации «центробежных» заводов по обогащению изотопов, в том числе <sup>235</sup>U, отсутствуют характеристики, необходимые при инспекции таких заводов.

В настоящей работе разработан расчетный метод для оценки этих характеристик (поток питания в одиночную центрифугу, общее число центрифуг в каскаде и его конфигурацию) на основе известных данных об интегральных характеристиках завода.

Предполагается, что каскад реализован по классической схеме с включением потока питания на первую ступень отборной части. Входной поток в любую ступень каскада образуется при смешении потока отбора с предыдущей ступени и потока отвала с последующей.

Для демонстрации возможностей наших расчетов мы использовали информацию о реальном заводе NEF, расположенном в штате Нью-Мехико, США, который принадлежит международной компании URENCO и французской компании Areva. Вычисление параметров промышленной газовой центрифуги TC-12 и разделительных каскадов завода NEF, представленные двумя независимыми методами расчета, показали их хорошее взаимное согласие.

Представленный метод предназначен для оценки производств по слабому обогащению изотопов, в том числе производств по получению низкообогащенного урана для тепловых реакторов. Он мог бы в известной степени помочь международным инспекторам в контроле реальных обогатительных мощностей, а также в открытии каких-либо необъявленных целей. Также предлагаемый метод может быть применим для оптимизации центрифуги при заданных требованиях к производительности вновь создаваемых модульных производств.

**ASSESSMENT OF PARAMETERS  
OF GAS CENTRIFUGE AND SEPARATION  
CASCADE BASING ON INTEGRAL  
CHARACTERISTICS OF SEPARATION PLANT**

V. Borisevich<sup>1</sup>, M. Borshchevskiy<sup>1</sup>,  
I. Andronov<sup>2</sup>, S. Senchenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>NRNU MEPhI, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center «Kurchatov Institute»,  
Moscow, Russia

E-mail: VDBorisevich@mephi.ru; Michael\_mephi@mail.ru

In official documents the characteristics necessary for the inspection of separation plants, including that of <sup>235</sup>U isotope, are usually absent.

In the present work a calculation technique to assess a feed flow rate into a single gas centrifuge, a total number of centrifuges in a separation cascade and to determine a possible cascade configuration (a distribution of flow and concentrations of a separating mixture over cascade stages) basing on the known integral characteristics of a centrifugal plant is developed.

To demonstrate the possibilities of our calculation technique we used the information on the National Enrichment Facility (NEF) plant, owned by the international consortium company URENCO and the French company Areva. Evaluation of characteristics of the industrial gas centrifuge TC-12 and separation cascades of the NEF plant performed by two independent calculation techniques demonstrates their satisfactory agreement. This methodology would help to some extent the nuclear inspectors in evaluating and assessing the capability of an enrichment facility, and discovering any use for undeclared purposes. Also proposed method may be used for centrifuge optimization at given requirements to productivity of module plants.

5-26

**МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИЗА  
НИТРИДНОГО ОЯТ**

О. В. Шульц

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

В настоящее время стоит задача оптимизации технологических режимов отдельных стадий пирохимического метода переработки ОЯТ и технологического процесса в целом. Разработанная модель процесса электролиза нитридного ОЯТ предназначена для описания влияния параметров проведения процесса на качественный и количественный состав получаемых продуктов.

В основе модели лежит принцип независимости протекания совмещенных реакций. Согласно этому принципу каждая из совмещенных электродных реакций протекает независимо от других, т. е. как будто она является единственным процессом, идущим на данном электроде. Все совмещенные реакции, протекающие в системе, объединяются по принципу суперпозиции поляризационных кривых. Согласно этому принципу поляризационная кривая, снятая на электроде, на котором одновременно протекают несколько реакций, может быть получена алгебраическим сложением по току поляризационных кривых всех частных реакций.

В соответствии с ПНПСР для каждой комбинации катодной и анодной реакций можно определить:

- потенциалы электродов по уравнению Нернста;
- проводимости электролита в каждой области по данным о концентрациях и подвижностях ионов;
- сопротивления за счет кинетики химических реакций по принятой в рамках модели формуле (обратно



пропорционально скорости, определяемой по закону действующих масс).

Из полученных величин проводимостей, сопротивлений химических реакций, а также омического сопротивления внешней цепи, рассчитывается полное сопротивление цепи для каждой комбинации катодного и анодного процессов.

По данным о приложенном внешнем напряжении и рассчитанным потенциалам электродов определяется суммарное напряжение между электродами.

Таким образом, зная суммарное напряжение и суммарное сопротивление для каждой комбинации реакций на катоде и аноде, по закону Ома определяется ток по каждой такой пары и, соответственно ток по каждой полуреакции (согласно ПСПК).

Расход компонентов по реакциям рассчитывается согласно законам Фарадея и с учетом диффузии (при условии линейной зависимости концентрации от координаты).

Для проверки адекватности разрабатываемой модели был выполнен ряд расчетов процесса электролиза некоторых составов, содержащих основные компоненты ОЯТ в различных комбинациях. Результаты расчетов были проанализированы с точки зрения качественного выполнения основных закономерностей, наблюдаемых при электролизе подобных систем. Анализ показал качественное совпадение результатов расчета с ожидаемыми закономерностями, как для простых, так и для сложных (многокомпонентных) систем. Также был выполнен расчет постановки, аналогичной эксперименту, описанному в работе [1]. Анализ результатов расчета показал удовлетворительное качественное и количественное соответствие экспериментальным данным.

#### Литература

1. Jinsuo Zhang. Kinetic model for electrorefining, part I: Model development and validation. Progress in Nuclear Energy. – 2014. – 70. – С. 279–286.

### MODEL FOR ELECTROREFINING OF NITRIDE SNF

O. V. Shults

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

Nowadays there is a problem of optimization of technological modes of separate stages of pyro chemical method of processing SNF and technological process as a whole. The developed model of process of nitride SNF electrolysis is designed for the description of process parameters influence on qualitative and quantitative composition of obtained products.

The independent course of concerted reactions (ICRP) is the basic principle of the model. According to this principle each of the concerted electrode reactions proceeds irrespective of others. All concerted reactions in system unite by principle of superposition of polarizing curves. According to this principle, the polarizing curve obtained on electrode where some other reactions proceeds simultaneously can be obtained as algebraic sum of partial reactions polarizing curves.

According to ICRP for each combination of cathode and anode reactions it is possible to define:

- potentials of electrodes on Nernst equation;
- electrolyte conductivity in each area by using concentration and ion mobility data;
- chemical reactions kinetics resistance by means of the accepted model formula (in inverse proportion to speed).

For each combination of cathode and anode processes the overall resistance is calculated using obtained values of conductivities, chemical reactions resistance, and also ohmic resistance of external chain.

Total electrode voltage is defined by the applied external voltage and calculated electrode potential.

Thus, knowing total voltage and total resistance for each combination of reactions on the cathode and the anode makes it possible to calculate by means of the Ohm law current on each such pair and correspondingly current for both semireactions (according to ICRP).

Components consumption for these reactions is calculated according to Faraday's laws and taking diffusion into consideration (under condition of linear dependence of concentration on co-ordinate).

For testing the developed model the number of calculations has been carried out for electrolysis process of some compositions containing basic SNF components in various combinations. The analysis of the calculation results from the point of view of basic laws performance has shown the qualitative coincidence of the results with the expected electrolysis mechanism both for simple and for multicomponent systems. Also there has been carried out the calculation of the experiment described in [1]. The analysis of the calculation results has shown the qualitative and quantitative coincidence with the experimental data.

#### References

1. Jinsuo Zhang. Kinetic model for electrorefining, part I: Model development and validation. Progress in Nuclear Energy. – 2014. – 70. – P. 279–286.

5-27

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ КОМПОНОВОК АКТИВНЫХ ЗОН БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА РЕАКТОРА

И. А. Волков

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

Для эффективного развития ядерной энергетики на основе быстрых реакторов необходим достаточно быстрый возврат отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в активную зону (АЗ) реактора. Перспективным вариантом стартовой топливной загрузки для быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем является смесь нитридов урана и энергетического плутония, выделенного из ОЯТ тепловых реакторов. Процессы переработки горячего ОЯТ и изготовления из него свежих тепловыделяющих сборок (ТВС) являются

дорогостоящими. В работе исследуются возможности упрощения технологий замыкания топливного цикла. Рассматриваются такие конфигурации АЗ, при которых часть нарабатываемого материала может быть направлена на переработку с малой выдержкой, а для горячей части ОЯТ допускается увеличенная выдержка.

В работе рассмотрены следующие варианты компоновок АЗ реакторов со свинцовым теплоносителем:

1. АЗ, собранная из бесчехловых четырёхгранных ТВС с топливом, окружённая свинцовым отражателем (базовый вариант);

2. АЗ, собранная из бесчехловых четырёхгранных ТВС с топливом, окружённая боковой и нижней торцевой зонами воспроизводства;

3. АЗ, содержащая как ТВС с топливом, так и сборки с отвальным ураном;

4. АЗ, в которой все штатные ТВС содержат твэлы с топливом и твэлы с отвальным ураном.

Для каждого варианта АЗ, с помощью программного комплекса ПРИЗМА+РИСК [1, 2], произведён расчёт выгорания топлива в течение кампании реактора (1500 суток) без перегрузок. Оценено количество нарабатываемого плутония, а также его изотопный состав. Оценены радиационные характеристики выгружаемых ТВС. Показано, что при замене 25% всего топлива (варианты 3, 4), находящегося в АЗ отвальным ураном, при тепловой мощности реактора 3000 МВт, в твэлах с отвальным ураном нарабатывается 800–850 кг плутония, радиационные характеристики которого позволяют применять существующие технологии для изготовления свежего топлива. Однако при этом нарушается температурный режим в центральных элементах АЗ. В частности, нарушаются допустимые пределы по температуре оболочек ТВЭЛ, что требует принятия специальных мер по снижению удельной энергонапряжённости в АЗ.

В рассмотренных вариантах быстрого реактора со свинцовым теплоносителем и нитридным топливом установка сырьевых твэлов открывает хорошие возможности для организации замыкания ядерного топливного цикла. Более простыми реализациями является размещение их в бланкетах. Но при необходимости быстрой организации замыкания (ЯТЦ) может быть использована возможность размещения дополнительных сырьевых твэлов в АЗ. Такую операцию можно совместить со сглаживанием распределения радиального энерговыделения по АЗ.

### Литература

1. Кандиев Я. З. Оценка эффектов малых возмущений в многовариантных расчетах по программе ПРИЗМА-Д / Кандиев Я. З., Малахов А. А. и др. // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99, В. 3. – С. 203–210.
2. Модестов Д. Г. Решение уравнений радиоактивного распада // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2006.

## THE ANALYSIS OF POSSIBLE CORE ASSEMBLINGS OF FAST REACTORS WITH LEAD HEAT CARRIER IN THE VIEW OF NUCLEAR FUEL CYCLE OPTIMIZATION

I. A. Volkov

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

For the effective development of fast reactors-based nuclear power engineering spent fuel (SF) has to be returned to reactor core (RC) quite quickly. The promising choice for start core charge of fast reactors with lead heat carrier is a mixture of Uranium nitrides and Plutonium obtained from SF of thermal reactors. The technologies of reprocessing hot SF and producing new fuel assemblies are highly expensive. In this connection, the work deals with the possibility of decreasing the application of hot fuel technologies. In particular, various designs of core, in which reproduced plutonium can be suitable for exist facilities of reprocessing and fabrication are study.

The work considers the following kinds of active core assemblies:

- Active core containing coat-free four panel fuel assemblies enclosed within lead deflector;
- Active core containing coat-free four panel fuel assemblies enclosed within lateral and lower blankets;
- Active core containing both fuel and depleted Uranium assemblies;
- Active core containing assemblies with both fuel and depleted uranium elements.

For each kind of AC the computation of fuel burnup during reactor operating period (1500 days) without reloading has been executed by means of codes PRIZMA+RISK [1, 2]. The amount of produced Plutonium and its isotopic composition have been estimated. The radiation characteristics of unloaded assemblies have also been estimated. The computation shows that after replacement of 25% of fuel by depleted Uranium the 3000 megawatt reactor produces 800-850 kg of Plutonium. However, thermal behavior in central AC elements is violated. In particular, acceptance limits of fuel elements casing are violated, which leads to undertaking special steps in order to decrease specific rating in AC.

### References

1. Kandiev Ya. Z. The estimation of small perturbation effects in multiversion computations by means of PRIZMA-D code/ Kandiev Ya. Z., Malakhov A. A. and others // Nuclear Energy. – 2005. – V. 99, Is. 3. – P. 203–210.
2. Modestov D. G. The solution of radioactive decay equations. Issues of nuclear science and engineering // Mathematical simulation of physical processes. 2006.

5-28

### МЕТОДИКА ОДНОВАРИАНТНЫХ И МНОГОВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ СЛАБОСВЯЗАННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Я. З. Кандиев, В. Г. Орлов, Е. В. Серова

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

Методика решения многовариантных задач на собственное значение, позволяющая получать в одном расчете коррелированные результаты для заданных вариантов задачи, была реализована для программы ПРИЗМА около двадцати лет назад. Все варианты делятся на невозмущенный вариант и возмущенные варианты, в которых изменяются определенные параметры геометрии и состава системы. Расчет задачи проходит в двойном режиме: начиная с очередного нулевого поколения точек деления для невозмущенного варианта, производится пассивный расчет заданного числа поколений  $L$  (выход на собственную функцию по каждому варианту), затем производится активный расчет заданного числа  $L$  поколений с получением результатов.

В последнее десятилетие методика развивается в направлении полномасштабного моделирования ядерных энергетических реакторов, которые в общем случае являются слабосвязанными системами с большим объемом, содержащим большое число ТВС. В этом случае корреляция между вкладами в оценку функционала на соседних поколениях значительна. Если не учитывать это обстоятельство, то можно получить существенно заниженную оценку погрешности результата.

В целях решения этой проблемы разработана обобщенная методика, предназначенная как для одновариантных, так и для многовариантных расчетов. В этой методике так же применяется двойной режим расчета, что позволяет оценивать погрешность корректно. При этом число точек деления  $M$  в поколении должно быть достаточно большим. Расчет производится в многопроцессорном режиме с выделением групп с одинаковым числом  $n$  процессоров в группе. Каждая группа имитирует работу одиночного процессора с  $M=nm$ , где  $m$  – число точек деления на один процессор. Это позволяет уменьшать астрономическое время расчета примерно в  $n$  раз.

В целях подтверждения корректности методики приведены решения ряда тестовых и прикладных задач.

### A MONTE CARLO TECHNIQUE FOR SINGLE- AND MULTI-VARIANT SIMULATION OF WEAKLY COUPLED SYSTEMS

Y. Z. Kandiev, V. G. Orlov, E. V. Serova

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

The technique that solves eigenvalue problems through correlated calculations was implemented in PRIZMA about twenty years ago. It allows correlated results for a number of variants to be obtained in one run. The variants include

an unperturbed variant and several perturbed ones where we vary parameters in geometry and composition. The calculation is done in two steps: passive calculation for a specified number  $L$  of generations, beginning from a current zero generation of fission points in the unperturbed variant (to get the eigenfunction distribution of fission points in each variant), and active calculation for  $L$  generations to collect scores.

In the recent decade the technique has been extended to allow the full-scale simulation of power reactors which are, in general, weakly coupled systems with a large space filled with a great number of fuel assemblies. In this case scores between neighbor generations are strongly correlated. If this fact is omitted, the error of a result may be underestimated significantly.

To fix the problem we have developed a generalized technique which is used both for single-variant and for multi-variant calculations. They are also done in two steps to estimate errors accurately. The number of fission point,  $M$ , in one generation needs to be rather large. The calculation is run in parallel on several processors united into groups with the same number of processors,  $n$ , in each. Each group simulates the operation of a single processor with  $M=nm$ , where  $m$  is the number of fission points per one processor. This helps reduce the astronomical time of calculation by about  $n$  times.

A number of test and applied calculations are provided.

5-29

### ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В. И. Графутин, В. А. Илюхин,  
О. В. Илюхина, Е. П. Прокопьев

ФГБУ «ГНЦ РФ – ИТЭФ» – НИЦ «Курчатовский институт»,  
Москва, Россия

E-mail: epprokopiev@mail.ru

Нами были проанализированы ряд данных по электронным свойствами чистых металлов [1–6]. Для переходных металлов наблюдается четкая корреляция температуры плавления с числом неспаренных d-электронов. Чем больше этих (неспаренных) электронов тем выше температура плавления. Корреляции с общим числом d-электронов нет. Так у меди (3d-электроны), палладия (4d-электроны), золота (5d-электроны) оболочки с d-электронами заполнены полностью, а температуры самые низкие в своих рядах. Обращают на себя внимание технеций, вольфрам и рений. У технеция в разных справочниках приводится разная конфигурация внешней электронной оболочки  $4d^6 5s^1$  ( $4d^5 5s^2$ ). На наш взгляд в этом случае более правильной будет конфигурация с шестью d-электронами. Если такого рода рассуждения правильны, то у вольфрама оболочка должна быть  $4f^{14} 5d^5 6s^1$ , а у рения  $4f^{14} 5d^6 6s^1$ . Мы поэтому предположили, что неспаренные d-электроны характеризуют склонность металлов к образованию ковалентных связей, которые более сильные чем металлические

связи. Этот процесс образования таких связей имеет вероятнее всего активационный характер. Эти свойства и определяют увеличение температуры плавления с ростом числа неспаренных d-электронов. В литературе ссылок на подобное объяснение мы не нашли. Эти эффекты также могут объяснять наличие возможных модифицированных вязко-хрупких переходов типа Иоффе в конструкционных материалах (металлах и сплавах) в условиях облучения их нейтронами при повышенных температурах [3]. Температура хрупко-вязкого перехода Иоффе чувствительна к содержанию примесей (особенно примесей внедрения в о. ц. к. металлах) и структуре материала. (!) Особо важным является хрупкое разрушение в тех случаях, когда оно происходит при достаточно высоких температурах (комнатной и выше). Действительно, облучение металлов и сплавов нейтронами при температурах ниже  $0,3T_m$ , где  $T_m$  – температура плавления, повышает их прочность в результате образования радиационных нарушений и дефектов, являющихся препятствием для движения дислокаций, но при этом радиация существенно, а при больших дозах катастрофически ухудшает их деформационные и пластические свойства. Это обстоятельство (радиационная хрупкость) ограничивает эксплуатационный ресурс многих сплавов, используемых в ядерной энергетике: с ростом дозы облучения чувствительность сплавов к ударным нагрузкам возрастает.

В наших экспериментах с реакторными сталями было обнаружено, что концентрация электронов в зоне проводимости уменьшается с увеличением флюенса нейтронов. При больших флюенсах каждый атом испытывает несколько смещений и, вероятно, новая конфигурация сопровождается образованием новых ковалентных связей, что возможно и приводит к увеличению температуры вязко-хрупкого перехода. В классическом хрупко-вязком переходе Иоффе такого типа явление наблюдается при понижении температуры.

Мы ввели величину  $\alpha_k = [n(\text{необл}) - n(\text{обл})] / n(\text{необл})$ , характеризующую собой степень ковалентности химической связи. Здесь  $n(\text{обл})$  – концентрация электронов в зоне проводимости проводимости в облученном металле, а  $n(\text{необл})$  – концентрация электронов в зоне проводимости необлученного металла. На основании экспериментальных данных работ [4–6] значение  $[n(\text{необл})] = 11,9 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , а  $[n(\text{обл})] = 9 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . Отсюда степень ковалентности химической связи для образцов стали LP составляет величину  $\alpha_k \sim 0,3$ .

## Выводы

Проведены исследования корпусных сталей, используемых в действующих реакторах ВВЭР-440. В исследованных образцах сталей выявлены вакансионные дефекты, в том числе вызванные нейтронным облучением, и определены их размеры. Показано, что метод позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) является одним из эффективных методов определения размеров нанобъектов (вакансий, вакансионных кластеров), свободных объемов пор, полостей, пустот, их концентраций и химического состава в месте аннигиляции позитронов в дефектных материалах.

Установлено, что позитронная спектроскопия может с успехом применяться для исследования внутренних

связей в металлах и, в частности, для исследования границ раздела кристаллитов.

Полученные результаты могут быть использованы для понимания эксплуатационных свойств материалов, используемых для создания космических аппаратов и приборов для работы в условиях космического пространства.

## Литература

1. Графутин В. И., Прокопьев Е. П., Кршак В. и др. Изучение конструкционных материалов активной зоны реакторов методами позитронной аннигиляционной спектроскопии. Ядерная физика. – 2011. – Т. 74, № 2. – С. 195–206.
2. Графутин В. И., Прокопьев Е. П., Фунтиков Ю. В. Позитронная аннигиляционная спектроскопия в ИТЭФ. Инженерная физика. Специальный выпуск. – 2007. – № 1. – С. 33–39.
3. Абдурасулов З. Р., Арифов П. У., Арутюнов Н. Ю. и др. Методы позитронной диагностики и расшифровки спектров аннигиляции позитронов. Ташкент: Изд-во «ФАН», 1985. – 312 с.
4. Графутин В. И., Прокопьев Е. П., Тимошенко С. П., Фунтиков Ю. В. Позитроника и нанотехнологии: Определение размеров нанобъектов в пористых системах, наноматериалах и некоторых дефектных материалах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии (обзор). Заводская лаборатория. – 2009. – Т. 75, № 6. С. 27–36. <http://zldm.ru/upload/iblock/53b/20097506027.pdf>
5. В. И. Графутин В. И., Прокопьев Е. П., Тимошенко С. П., Фунтиков Ю. В. Размеры и концентрации нанобъектов в облученных металлах и сплавах по данным метода позитронной аннигиляционной спектроскопии. Заводская лаборатория. – 2012. – Т. 78, № 5. – С.27–34.
6. Графутин В. И., Илюхина О. В., Козлов Ю. Ф. и др. Определение природы, концентраций и размеров нанобъектов в технических важных материалах и наноматериалах методами позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Современные научные исследования и инновации. – Октябрь, 2012. [http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka\\_prokop\\_paper.pdf](http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka_prokop_paper.pdf) [http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka\\_prokop\\_paper.pdf](http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka_prokop_paper.pdf)

## ELECTRONIC PROPERTIES OF TRANSITION METALS AND ALLOYS BASED METHOD POSITRON ANNIHILATION SPECTROSCOPY

V. I. Grafutin, E. P. Prokopen, S. P. Timoshenkov

SRC “Kurchatov Institute”, Federal State Institution  
“State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of  
Theoretical and Experimental Physics.”  
FGBI “SSC RF – ITEP.” Moscow, Russia

E-mail: epprokopiev@mail.ru

In our papers [1–5] using positron annihilation spectroscopy studied electronic and defect structures of a number of pure metals and their alloys. To elucidate the effect of the electronic structure on the macroscopic properties of pure metals compared the reference data on the electronic structure with a melting point of these metals.

For transition metals observed to correlate with the melting point of d- number of unpaired electrons. The more unpaired electrons of the higher melting point. Correlation with the total number of d- electrons not. So copper (3d-electrons), palladium (4d-electrons), gold (5d-electrons) with the d- shell electrons are full and the lowest temperature in their ranks. Emphasis is placed on technetium, tungsten and rhenium. Do technetium in different references give different misconfiguration on the outer elec-

tron shell  $4d^65s^1$  ( $4d^55s^2$ ). In our opinion in this case would be more correct configuration with six d- electrons. If this kind of reasoning is correct, then the tungsten shell should be  $4f^{14}5d^56s^1$ , while the rhenium  $4f^{14}5d^66s^1$ . We assumed that the unpaired d- electrons characterize the tendency of metals to the formation of covalent bonds, which are stronger than metallic bonds. The process of formation of such bonds is likely activation character. These properties and determine the increase of the melting point with increasing the number of unpaired electrons d-electrons. The literature references to this explanation we have not found. These effects may also explain the presence of possible modified ductile-brittle transition of type Ioffe in structural materials (metals and alloys) under irradiation with neutrons at elevated temperatures [3]. The temperature of the brittle-ductile transition Ioffe sensitive to impurity content (especially interstitial impurities in bcc metals) and the structure of the material (7). Particularly important is the brittle fracture in those cases where it occurs at relatively high temperatures (ambient and above). Indeed, irradiation by neutrons of metals and alloys at temperatures of less than 0.3, wherein – the melting point, increases its strength due to the formation of radiation damage and defects, which are an obstacle to the movement of dislocations, but in this case the radiation substantially, and in large doses drastically worsens their deformation and plastic properties. This circumstance (radiation embrittlement) limits the service life of many alloys used in nuclear power: with increasing radiation dose sensitivity to impact alloys increases.

In our experiments with hull steel operating VVER-440 has been found that the concentration of electrons in the conduction band decreases with increasing neutron fluence. At high fluences, each atom experiences several displacements and probably, the new configuration is accompanied by the formation of new covalent bonds, it is possible and leads to an increase in temperature of the ductile-brittle transition. In a classic brittle-ductile transition Ioffe this type phenomenon is observed with decreasing temperature.

We have entered value  $\alpha_k = [n(\text{rad}) - n(\text{irrad})] / n(\text{irrad})$  characterizing the degree of covalent chemical bonds. Here

$n(\text{irrad})$  – the concentration of electrons in the conduction band conduction in the irradiated metal, and  $n(\text{rad})$  – concentration of electrons in the conduction band of non-irradiated metal. On based on the experimental data of [1, 2] to  $n(\text{rad}) = 12,6 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n(\text{irrad}) = 8,8 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ . Hence the degree of covalence of the chemical bond is  $\alpha_k \sim 0,3$ .

The research vessel steels used in operating reactors VVER-440. In the samples studied steels identified vacancy defects, including those caused by neutron irradiation, and are defined by their size. It is shown that the method of positron annihilation spectroscopy (PAS) is one of the most effective methods for determining the size of nano-objects (vacancies, vacancy clusters), free pore volume of the cavities, voids, their concentrations and chemical composition in the annihilation of positrons in defective materials. Found that positron spectroscopy can be successfully applied to the study of internal connections in metals and, in particular, to explore the boundaries of crystallites.

### References

1. Grafutin V. I., Prokopiev E. P., Krschak V. et. al. The study of structural materials of the reactor core by positron annihilation spectroscopy. Nuclear physics. – 2011. – Vol. 74, N 2. – P. 195–206.
2. Grafutin V. I., Prokopev E. P., Funtikov Yu. V. Positron annihilation spectroscopy in ITEP. Engineering Physics. Special Issue. – 2007. – N 1. – P. 33–39.
3. Grafutin V. I., Prokopev E. P., Timoshenkov S. P., Funtikov Yu. V. Positronics and nanotechnologies: Sizing nanostructures in porous systems, nanomaterials and some defective materials by positron annihilation spectroscopy (review). Plant Laboratory. – 2009. – Vol. 75, N 6. – P. 27–36. <http://zldm.ru/upload/iblock/53b/20097506027.pdf>
4. Grafutin V. I., Prokopev E. P., Timoshenkov S. P., Funtikov Yu. V. Size and concentration of nano-objects in irradiated metals and alloys according to the method of positron annihilation spectroscopy. Plant Laboratory. – 2012. – T. 78, N 5. – P. 27–34.
5. Grafutin V. I., Kozlov Yu. F. et al. Determination of the nature, concentration and size of nano-objects in the technologically important materials and nanomaterials by positron annihilation spectroscopy. // Modern scientific research and innovation. October, 2012. [http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka\\_prokop\\_paper.pdf](http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka_prokop_paper.pdf)



**Секция 6**

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ,  
ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ**

---

**Section 6**

**NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS,  
CODES AND ACCURATE SOLUTIONS**





## ЭКОНОМИЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Максим Г. Анучин, Михаил Г. Анучин, А. Н. Кузнецов

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

E-mail: mganuchin@vniitf.ru

Для моделирования нестационарных режимов газотранспортных систем разработан программный комплекс «Волна» [1, 2]. В ряде практических задач возникает необходимость в проведении расчетов стационарных режимов. К таким задачам относятся: определение эмпирических параметров нестационарной модели, реконструкция течения по показаниям датчиков на отдельных участках газопровода, оптимизация режимов транспортировки газа с целью снижения энергетических затрат и др. Для решения этих задач требуется проведение серий стационарных расчетов с варьированием тех или иных параметров.

В данной работе предлагается экономичный метод для быстрого проведения расчетов стационарных течений в сложных газотранспортных системах произвольной топологии. Метод удовлетворяет тем же требованиям, что и нестационарная методика, ранее реализованная в комплексе «Волна». Среди них:

- универсальный набор граничных условий, которые могут быть заданы в любом узле соединения труб (давление, температура, внешний источник газа);
- независимость от топологии технологической схемы;
- отсутствие необходимости в анализе направления потоков газа;
- возможность моделирования в режиме параллельного счета на многопроцессорных ЭВМ.

Газотранспортная сеть произвольной топологии представляется как список труб и список узлов соединения. Течение газа в трубах определяется быстро работающей алгебраической моделью с периодическим выполнением процедуры идентификации, которая настраивает модель под рассчитываемый режим и обеспечивает необходимую точность. В процедуре идентификации используется решение стационарных уравнений газовой динамики. В качестве начального приближения в узлах задаются произвольные значения давления и температуры, определяющие граничные условия стационарного течения в трубах. В процессе глобальных итераций заданные в узлах давления и температуры корректируются так, чтобы дисбаланс потоков в узлах устремился к нулю. Метод может применяться в сочетании с любой другой моделью транспортировки сжимаемого газа по трубе.

Метод реализован в виде отдельного модуля в программном комплексе «Волна». Его эффективность демонстрируется на примере расчета стационарного режима газотранспортной системы.

Рассмотрен ряд сопутствующих вопросов, касающихся точности моделирования, особенностей реше-

ния стационарных уравнений, корректности в постановке расчетов и др.

### Литература

1. Анучин Макс.Г., Анучин Мих.Г., Воробьев А. А., Калинин А. А., Каспиев Г. В., Кузнецов А. Н., Юшманов А. Я., Яковлев А. Я. Методика расчета течения природного газа по трубе в программном комплексе моделирования газотранспортных систем «Волна» // Математическое моделирование. 2014. Статья принята к публикации.
2. Анучин М. Г., Анучин М. Г., Гагарин С. В., Калинин А. А., Кузнецов А. Н. Модель магистрального газопровода, методики и алгоритмы расчета // Забабахинские научные чтения: сборник материалов X Международной конференции 15–19 марта 2010. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010. Стр. 291.

## AN ECONOMIC METHOD FOR SIMULATING STEADY-STATE CONDITIONS IN GAS TRANSPORT SYSTEMS

Maxim G. Anuchin, Mikhail G. Anuchin, A. N. Kuznetsov

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

E-mail: mganuchin@vniitf.ru

A software package VOLNA is developed for simulating transient flows in gas transport systems [1, 2]. In a number of practical problems it becomes necessary to simulate steady-state conditions. The problems include the determination of empirical parameters for the transient flow model, flow reconstruction from sensor readings at some pipeline sections, optimization of gas transport conditions to reduce energy consumption etc. Their solution requires a number of steady-state simulations with varied parameters.

We propose an economic method for the fast simulation of steady-state conditions in gas transport systems with arbitrary topology. It meets the same requirements as posed for the non-stationary technique earlier implemented in VOLNA. These are:

- A universal set of boundary conditions which can be defined in any node (pressure, temperature, external gas source).
- Independence of technological topology.
- Freedom from flow direction analysis.
- Capability of parallel computing on multiprocessor computers.

A gas transport network of arbitrary topology is represented as a list of pipes and a list of nodes (pipe joints). The flow of gas in pipes is simulated with a fast algebraic model and periodic identification which adjusts the model to conditions under consideration and ensures required accuracy. The identification procedure is based on the solution of stationary hydrodynamic equations. As an initial approximation, arbitrary pressures and temperatures are defined in nodes; they define boundary conditions for the steady-state flow. In the global iterations of the method, the pressures and temperatures are updated so as to make flow disbalance tend to zero. The method can be used in combination with any other model of piped compressible gas.

The method is implemented as a separate module in the VOLNA software package. Its efficiency is demonstrated through a sample calculation for steady-state conditions in the gas transport system.

A number of related issues are considered, including simulation accuracy, peculiarities in the solution of stationary equations, correctness of calculation setup etc.

## References

1. Anuchin Maxim G., Anuchin Mikhail G., Vorob'yev A. A., Kalinin A. A., Kaspiyev G. V., Kuznetsov A. N., Yushmanov A. Ya., Yakovlev A. Ya. Metodika raschyeta techeniya prirodnogo gaza po trubye v programmnom komplekse modelirovaniya gazotransportnykh sistem «Volna» // Matematicheskoye Modelirovaniye. 2014. The paper is accepted to the publication.
2. Anuchin Maxim G., Anuchin Mikhail G., Gagarin S. V., Kalinin A. A., Kuznetsov A. N. A Model of Main Gas Pipeline, Computational Methods and Algorithms // Zababakhin Scientific Talks. X International Conference, March 15–19, 2010. Abstracts. – Znezhinsk: RFNC – VNIITF, 2010. p. 291.

6-2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СВОЙСТВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. А. Вирченко, А. П. Егоров, А. И. Ахметзянов

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: lpfv@bk.ru

Актуальной задачей исследования взрывчатых веществ (ВВ) остается априорная оценка свойств вновь синтезируемых ВВ. Для получения исходных данных для систем автоматизированного проектирования, позволяющих прогнозировать эффективность и безопасность снаряжения конкретных изделий тем или иным ВВ, целесообразно применять комплексный экспериментально-теоретический подход к оценке свойств ВВ.

Первой стадией исследования является проведение предварительной оценки детонационных характеристик ВВ по минимуму информации – его брутто-формуле и энтальпии образования. Основой этой оценки являются теоретические уравнения состояния (УС) продуктов детонации, построенные «из первых принципов» (УС ВКВ, Контрикова-Сумина, Росса и Канга и основанные на них программы TERMO, CAT, TURTLE и TERRAPIN), а так же термодинамические соотношения для реальных газов, записанные для условия равновесия на ударной адиабате и изоэнтропы расширения.

Следующей стадией исследования является получение экспериментальных УС и кинетики разложения ВВ. Эта часть состоит из проведения экспериментальных исследований и обработки результатов по специальным программам. Нами сформирован подходящий комплекс экспериментальных исследований ВВ, а также разработан пакет прикладных программ для анализа полученных результатов.

Экспериментальное УС в форме JWL строится на основе методики T-20, измерения предельной скорости детонации и массовой скорости продуктов детонации в точке Жуге. Результаты экспериментов обрабатываются при помощи программ CYLTEST, GDX, HYES. Коэффициенты УС подбираются автоматически при помощи программы JWLAUTO.

Извлечение формальной кинетики проводится при помощи решения прямой задачи при постоянной корректировке расчета и эксперимента. Подбор констант уравнения разложения осуществляется численным моделированием опытов по ударно-волновому инициированию ВВ в одномерной постановке. Экспериментальная часть заключается в измерении давления на границе с инертным веществом ударной волной столбчатого профиля. Результаты экспериментов обрабатываются при помощи программы SIN осуществляющей подбора коэффициентов в кинетическом уравнении Канеля.

Полученная информация является достаточной для численного моделирования практически всех возможных ситуаций поведения ВВ – от условий возбуждения ударными волнами и перехода горения в детонацию (характеристики безопасности), до метательного, бризантного и фугасного действия в различных изделиях.

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL APPROACH TO ESTIMATION OF EXPLOSIVES PROPERTIES

V. A. Virchenko, A. I. Akhmetzyanov, A. P. Egorov

SCDB «Tehhnolog», Saint-Petersburg, Russia

E-mail: lpfv@bk.ru

Actual problem of explosives research is an a priori estimate of properties of the newly synthesized explosives. To obtain the basic data for computer-aided design, predicting the efficacy and safety of equipment of particular products by one or another explosive, it is advisable to employ a comprehensive experimental and theoretical approach to the evaluation of the explosives properties.

The first stage of this study is a preliminary evaluation of detonation characteristics of explosives having a minimum of information – its empirical formula and the enthalpy of formation. The basis of this evaluation are the theoretical equations of state (EOS) of the detonation products, built in «first principles» (EOS ВКВ, Kontrikov-Sumin, Ross and Kang, and codes based on them TERMO, CAT, TURTLE and TERRAPIN), and the thermodynamic relations for real gases, recorded for the equilibrium conditions on the shock adiabatic and isentrope expansion.

The next stage of this study is to obtain experimental EOS and kinetics of decomposition of explosives. This part consists of experimental research and the treatment results by special cods. We formed a convenient complex of experimental investigations of explosives, and an application package designed for the analysis of the results.

Experimental JWL EOS is based on T-20 test, to measure the limit detonation velocity and the particle velocity of detonation products in the Jouguet point. The experimental results are processed by CYLTEST, GDX, HYES codes. The coefficients EOS selected automatically by JWLAUTO code.

Retrieval of formal kinetics is carried out by solution of direct problem with constant adjustment of calculation and experiment. The selection of decomposition equation constants is carried out by a numerical simulation of shock-wave initiation of explosives in the one-dimensional problem. The experimental part is to measure the pressure on the border with an inert substance by shock-wave of a square

profile. The experimental results are processed by SIN witch match coefficients in the kinetic equation of Kanel.

Obtained information is sufficient for numerical simulation of almost all possible situations of explosive behavior – from conditions of excitation by shock waves and deflagration to detonation transition (safety characteristic), to throwing, brisance and blast effect in various products.

---

6-3

### ОДНО ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА

С. П. Баутин, В. Е. Замыслов,

О. Д. Зорина, П. А. Козлов, П. П. Скачков

Уральский государственный университет путей сообщения,  
Россия, Екатеринбург,

E-mail: SBautin@math.usurt.ru

Для описания одномерных и двумерных течений сжимаемого вязкого теплопроводного идеального газа в случае постоянных значений коэффициентов вязкости и теплопроводности в работе рассматривается полная система уравнений Навье–Стокса [1]. При этом в качестве независимых термодинамических переменных берутся удельный объем и давление [2]. В этом случае полная система уравнений Навье–Стокса 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 полной системы уравнений Навье–Стокса с использованием идей метода Галеркина [3] как бесконечные суммы гармоник по пространственной переменной с коэффициентами, зависящими от времени [4, 5]. Для этих коэффициентов выписаны бесконечные системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Показано, что при условиях теплоизоляции и прилипания на границах расчетной области по пространственным переменным решения этих систем обыкновенных дифференциальных уравнений представляют собой сумму стоячих волн с кратными частотами. Получена алгебраическая зависимость минимальной частоты в решении от частот гармоник, входящих в начальные условия. Дано объяснение механизма взаимного влияния друг на друга гармоник с разными частотами. Данный факт подтвержден разностными расчетами решений соответствующих начально-краевых задач для полной системы уравнений Навье–Стокса в традиционных термодинамических переменных: плотность и температура.

При учете конечного числа гармоник численно построены конкретные решения соответствующих конечных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. В частности описано движение бегущего ударного перехода, не имеющего существенных осцилляций в районе его фронта.

Исследование поддержано РФФИ, проект 11-01-00198.

#### Литература

1. Баутин С. П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике. – Новосибирск: Наука, 2009. – 368 с.

2. Титов С. С. Пространственно-периодические решения полной системы Навье–Стокса // Доклады РАН. – 1999. – Т. 356, № 3. – С. 761–763.

3. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. М.: Мир, 1988. – 352 с.

4. Баутин С. П., Замыслов В. Е. Представление приближенных решений полной системы уравнений Навье–Стокса в одномерном случае // Вычислительные технологии. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 3–12.

5. Замыслов В. Е. Стоячие волны полной системы уравнений Навье–Стокса в одномерном случае // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 33–45.

### AN ONE APPROXIMATE DESCRIPTION OF FLOWS OF COMPRESSIBLE VISCOUS HEAT-CONDUCTIVE GAS

S. P. Bautin, V. E. Zamyslov,

O. D. Zorina, P. A. Kozlov, P. P. Skachkov

<sup>1</sup>Ural State University of Railway Transport,  
Ekaterinburg, Russia

E-mail: SBautin@math.usurt.ru

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 the complete system of Navier–Stokes equations [1]. At the same time as the independent thermodynamic variables are taken specific volume and pressure [2]. In this case the complete system of Navier–Stokes equations 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 of the complete system of Navier–Stokes equations using ideas of the Galerkin method [3] as the infinity sums of the harmonics, which dependent from a space variable, and the coefficients of this sum dependent from time [4, 5]. There are the systems of ordinary differential equations for the coefficients of that sums.

If there are the conditionals of a heat insulation and an adhesion on the ends of a calculated region then the solutions of differential equations are the standing waves with the multiple frequencies. There are the algebraic relation of the minimal frequency from the frequencies of the initial data. There are the explanation at a mechanism of a mutual influence one another the harmonics with the different frequencies. This fact is verified due to the difference calculations the solutions of the corresponding initial-boundary problems for the complete system of Navier–Stokes equations with the traditional the independent thermodynamic variables: a density and a temperature.

With the finite number of the harmonics there are the concrete solutions of the finite systems of ordinary differential equations. In particular, describe the motion of a traveling shock transition, which has no oscillations in the vicinity of its front.

The study was supported by RFBR, project 11-01-00198.

#### References

1. Bautin S. P. The characteristic Cauchy problem and its applications in gas dynamics. – Novosibirsk: Nauka, 2009. – 368 p.

2. Titov S. S. Spatially periodic solutions of the complete Navier–Stokes equations // *Doklady Physics*. – 1999. – V. 365, N. 6. – P. 761–763.
3. Fletcher C. Computational methods based on the Galerkin method. Springer-Verlag, 1988. – 352 p.
4. Bautin S. P., Zamyslov V. E. The description of approximate solution at the complete system of Navier–Stokes equations // *Vychislitelnye tehnologii*. – 2012. – V. 17, N. 3. – P. 3–12.
5. Zamyslov V. E. The standing waves of the complete system of Navier–Stokes equations // *Vychislitelnye tehnologii*. – 2013. – V. 18, N. 2. – P. 33–45.

6-4

## ДОСТАТОЧНЫЕ УСЛОВИЯ СОХРАНЕНИЯ ТИПА УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

В. В. Башуров

Технологический институт НИЯУ МИФИ, Лесной, Россия  
E-mail: vvbashurov@mail.ru

В связи с развитием конечно разностных методов большое внимание уделяется построению так называемых адаптирующихся сеток. Одним из таких способов построения сеток является метод, использующий для нахождения узлов сетки дифференциальное уравнение для вектора переносной скорости, т. е. для скорости перемещения самого узла в неподвижной координатной системе. Как правило, такое уравнение (или уравнения), добавленное (добавленные) к основной системе уравнений, образует систему уравнений в частных производных, которую мы будем называть «расширенной», для которых ставится задача Коши, и в процессе решения которой, заодно с «нужными» функциями, находятся узлы сетки, или, находится отображение неподвижной системы координат на параметрическое пространство переменных, в которых записывается исходная система уравнений. Ясно, что это отображение зависит от времени и никаким способом, кроме как решением «расширенной» системы, его получить невозможно [1–4].

Особый интерес представляет вопрос: а не меняется ли тип исходного уравнения, или уравнений, если к нему (или к ним) добавляются уравнения, задающие параметризацию. Впервые, насколько нам известно, этот вопрос был поставлен в работе [8]: если исходная система дифференциальных уравнений в частных производных, записанная в декартовых координатах, относится к гиперболическому типу и поэтому классическая задача Коши имеет решение хотя бы в некоторой окрестности многообразия, на котором заданы начальные условия. то та же система, записанная в системе координат, задаваемой решением «расширенной» системы, продолжает оставаться системой гиперболического типа?

Как следует из [5], в общем случае это не так: при преобразованиях системы координат, задаваемых дифференциальным уравнением (уравнениями) для вектора переносной скорости, тип системы не инвариантен.

В докладе сформулированы и доказаны несколько теорем, дающие достаточные условия, накладываемые

на преобразования координат (что тоже – на коэффициенты уравнений, связывающих координаты, в которых изначально были написаны уравнения, и на координаты, в которых мы собираемся решать эти уравнения), чтобы исходный тип уравнений не менялся. В качестве исходной системы были выбраны уравнение переноса и уравнения газовой динамики. Рассмотрен случай, когда искомые функции зависят только от двух переменных – времени и пространственной переменной.

Подробно результаты и доказательства трех теорем о требованиях, накладываемых на уравнение, связывающее «счетную» систему координат и неподвижную исходную, изложены в [6].

### Литература

1. Медведев А. Е., Фомин В. М. Метод подвижных координат в задачах механики сплошной среды. Журн «Прикладная математика и механика», 1981 г., Т. 45, вып. 4.
2. Неуважаев В. Е., Фролов В. Д., Яненко Н. Н. Уравнение движения теплопроводного газа в смешанных эйлеро-лагранжевых координатах. Сб. «Численные методы механики сплошной среды», 1972, т. 3, № 1, с. 90–96
3. Дарьин Н. А., Мажукин В. И. Об одном подходе к построению адаптивных разностных сеток. Докл. АН, 1988, т. 298, № 1, с. 64–68.
4. Гриднева В. А., Меркулова Н. Н. О построении подвижных сеток. Сб. «Численные методы механики сплошной среды», 1983, т. 1, № 4, с. 34–44.
5. Башуров В. В. Инвариантные свойства модельного уравнения переноса при преобразованиях системы координат. Сб. «Вопросы атомной науки и техники», серия «Математическое моделирование физических процессов», 1989, вып. 3, с. 24–28
6. Башуров В. В. К вопросу сохранения типа системы квазилинейных уравнений в частных производных. Журн. «Вычислительные технологии», 2012 г. Т. 17, № 3, с. 13–23

## SUFFICIENT CONDITIONS FOR THE PRESERVATION OF THE TYPE OF PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS

V. V. Bashurov

Technological Institute of the MEPhI, Lesnoy, Russia  
E-mail: vvbashurov@mail.ru

In connection with the development of finite-difference methods for the construction of a large emphasis on the so-called adaptive grid. One of those ways is the meshing method is used to find the grid nodes differential equation for the vector drive speed, i. e. for moving speed of the node in the fixed coordinate system. As a rule, such an equation (or equations), added (added) to the basic system of equations forms a system of partial differential equations, which we call the “expanded” for which Cauchy problem is posed, and in the process of decision which, together with the “right” functions are grid nodes, or is displaying fixed coordinate system on the parameter space of variables, in which is recorded the original system of equations. It is clear that this mapping depends on time and in any way except by a decision of the “extended” system it is impossible to obtain [1–4].

Of particular interest is the question: Do not change the type of the original equation, or equations if to them are added to the equations defining the parameterization. First,

as far as we know, the question was put to work [8]: if the original system of differential equations written in Cartesian coordinates refers to the hyperbolic type and therefore the classical Cauchy problem has a solution at least in some neighborhood of the manifold on which the initial conditions, the same system recorded in the coordinate system defined by the decision of the “extended” system, the system continues to be hyperbolic? As follows from [5], in the general case it is not so: the transformation of the coordinate system defined by the differential equation ( equations ) for the vector drive speed, the type of system is not invariant.

The report stated and proved some theorems giving sufficient conditions imposed on the coordinate transformation (that too – on the coefficients of the equations connecting the coordinates, which were originally written equations and coordinates in which we are going to solve these equations) to the original type equations is not changed. As the original system were selected transport equation and equations of gas dynamics. The case where the unknown functions depend only on two variables of time and space variable.

Details and evidence reultate three theorems about the requirements imposed on the equation relating the “countable” coordinate system and a stationary source, presented in [6].

#### References

1. A. E. Medvedev, V. M. Fomin. The method of moving coordinates in continuum mechanics problems. Journal “Applied Mathematics and Mechanics”, 1981, v. 45, no. 4.
2. V. E. Neuvazhaev, V. D. Frolov, N. N. Yanenko Equation of motion of heat-conducting gas in mixed Eulerian-Lagrangian coordinates. “Numerical Methods for Continuum Mechanics”, 1972, v. 3, № 1, p. 90–96.
3. N. A. Daryin, V. I. Mazhukin An approach to the construction of adaptive grids. Academy of Sciences reports, 1988, vol 298, № 1, p. 64–68.
4. V. A. Gridneva, N. N. Merkulov On the construction of mobile networks. “Numerical Methods for Continuum Mechanics”, 1983, Vol 1, № 4, p. 34–44.
5. V. V. Bashurov Invariant properties of the model transport equation in coordinate system transformations. “Problems of Atomic Science and Technology”, a series of “Mathematical modeling of physical processes”, 1989, vol. 3, p. 24–28.
6. V. V. Bashurov On the question of preserving the type system of quasilinear partial differential equations. Journal “Computational Technologies”, 2012, Vol. 17, № 3, p. 13–23.

6-5

### ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО И УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Ю. В. Баяндин, О. Б. Наймарк, Н. В. Савельева

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия  
E-mail: buv@icmm.ru

Исследования посвящены верификации трехмерных широкодиапазонных определяющих соотношений упруговязкопластических материалов с мезоскопическими дефектами. Рассматривается поведение металлов и сплавов при динамическом и ударно-волно-

вом нагружениях. В настоящей работе представлены результаты трехмерного численного моделирования динамического деформирования металлов в условиях прямого удара, динамического сжатия, сдвига и кручения. На основе ранее разработанной статистической теории твердого тела с мезоскопическими дефектами [1–4] 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). Разработанная трехмерная математическая модель была реализована в виде отдельного программного модуля в пакете прикладных программ Abaqus/Explicit. Задача идентификации модели проводилась по данным динамических испытаний с использованием методики разрезного стержня Гопкинсона-Кольского (сжатие, сдвиг, кручение). Рассмотрены задачи динамического нагружения и плоского соударения двух пластин с образованием откола. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14–01–000842, № 12-01-33072, № 14-01-96012).

#### 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., Уваров С. В. Численное моделирование откола, индуцированного мезодефектами при ударно-волновом нагружении металлов // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 1. С. 13–23.
3. Савельева Н. В., Баяндин Ю. В., Наймарк О. Б. Численное моделирование деформирования и разрушения металлов в условиях плоского удара // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 300–307.
4. Сокоиков М. А., Баяндин Ю. В., Ляпунова Е. А., Плехов О. А., Чудинов В. В., Наймарк О. Б. Локализация пластического сдвига и механизмы разрушения при динамическом нагружении металлов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 4. – С. 467–474.

### TREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC AND SHOCK WAVE LOADING OF METALS

Yu. V. Bayandin, O. B. Naimark, N. V. Savelieva

Institute of continuous media mechanics, UB RAS, Perm, Russia  
E-mail: buv@icmm.ru

Present investigations are concerned to the verification of three-dimensional wide-range constitutive equations of elastoviscoplastic materials with mesoscopic defects. Mainly the behavior of metals under dynamic loading is considered. Results of numerical simulation of dynamic (compression, shear and torsion) and shock wave loading of metals are presented. 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 [1–4]. The developed

three-dimensional mathematical model has been realized in the form of the program module in the application-specific program package Abaqus/Explicit. Identification problem was based on the experimental data using split Hopkinson-Kolsky bar technique at different condition (compression, shear and torsion). Direct impact, dynamic compression and shear loading are considered. The obtained results are corresponded with experimental data.

The research was supported by the projects of the Russian Foundation of Basic Research (projects № 14-01-000842, № 12-01-33072, № 14-01-96012).

## 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., 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.
3. Saveleva N. V., Bayandin Yu. V., Naimark O. B. Numerical simulation of deformation and failure of metals under plane shock wave loading // *Computational continuum mechanics*. 2012. V. 5. № 3. P. 300–307.
4. Sokovikov M. A., Bayandin Yu. V., Lyapunova E. A., Plekhov O. A., Chudinov V. V., Naimark O. B. Shear localization of plastic strain and mechanisms of failure in metals under dynamic loading // *Computational continuum mechanics*. 2013. V. 6. № 4. P. 467–474.

6-6

## ТРЕХМЕРНАЯ МЕТОДИКА МАЛОРАКУРСНОГО ТОМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НАД ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК, ПОДВЕРГНУТЫХ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОМУ ВЗРЫВНОМУ ОБЖАТИЮ

Л. П. Брезгина

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

### Введение

Целью данной работы является исследование возможностей малоракурсной томографической методики Imtom при восстановлении структуры оболочек из различных сталей после их квазисферического взрывного обжатию.

### Эксперимент и методики обработки

Сферические взрывные эксперименты проводились в постановках, позволивших сохранить стальные оболочки, претерпевшие квазисферическое взрывное обжатие [1].

Рентгенографирование проводилось с использованием острофокусного бетатрона «Альфа» и системы регистрации в виде кассеты с рентгеновской пленкой [2].

Для исследования внутренней структуры деформированной после взрывного обжатию стальной оболочки разработана малоракурсная томографическая методика Imtom [3], позволяющая восстановить пространствен-

ный вид сохраненного образца. Для постобработки томограмм с целью выделения информативных областей разрушений применяются специальные методы пространственной цветовой интерпретации данных.

### Результаты и их анализ

Ниже представлены результаты обработки по методу интегральной малоракурсной томографии (программа Imtom) 14-ти теневых изображений оболочки из 30ХГСА с начальной плотностью 7,76 г/см<sup>3</sup>, из стали 12Х18Н10Т с начальной плотностью 7,87 г/см<sup>3</sup>.

Результаты расчетов по методу интегральной малоракурсной томографии (программа Imtom) позволяют отметить влияние прочностных характеристик различных марок стали, использованных в нагружаемых взрывом оболочках, на характер их деформирования и разрушения [4].

### Литература

1. Козлов Е. А., Литвинов Б. В., Жугин Ю. Н. и др. Примеры и перспективы применения сферически сходящихся ударных волн для исследования физико-химических превращений минералов и горных пород // *Химическая физика*, 1995, т. 14, № 1.
2. Брезгина Л. П., Коновалов А. Б., Могиленских Д. В. Контроль внутренней структуры обжатой взрывом железной сферической оболочки методом ультрамалоракурсной гамма-томографии // Тезисы доклада 7-й Международной конференции Неразрушающий Контроль и Технология Диагностики в промышленности, 2008, с. 47–48.
3. Брезгина Л. П., Козлов Е. А., Пovyшев Е. Н. Сравнение возможностей ультрамалоракурсной томографии и интегральной малоракурсной томографии для регистрации откольных и сдвиговых разрушений в оболочках из железа и стали при взрывном квазисферическом нагружении // *Дефектоскопия*, № 12, 2010.
4. Е. А. Козлов, Л. П. Брезгина, С. А. Бричиков, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. В. Ольховский, Н. С. Жилиева, В. Н. Пovyшев. Локальные сдвиговые и откольные повреждения стальных оболочек при квазисферическом взрывном нагружении // Международная конференция «Ударные волны в конденсированном веществе» (SWCM-2012), 16–21 сентября 2012, Киев, Украина, Сборник докладов, с. 158–167.

## 3D SMALL-DIRECTION TOMOGRAPHY OF INTERNAL STRUCTURE OF STEEL SHELLS AFTER THEIR QUASI-SPHERICAL IMPLoding COMPRESSION

L. P. Brezgina

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

### Introduction

The aim of this work is to study the possibilities of small-direction tomographic Imtom technique used to reconstruct the structures of shells made of different steels after their quasi-spherical imploding compression.

### Experiment and processing techniques

Spherical explosive experiments were carried out using the setups that made it possible to recover steel shells after their quasi-spherical imploding compression [1].

X-raying was performed with the help of fine-focus Alpha betatron and the registration system, namely the cassette with X-ray film [2].

Small-direction tomographic Imtom technique [3] was developed to study the internal structure of steel shell after its deformation by imploding compression. This technique allows us to reconstruct the spatial view of recovered sample. Special methods of spatial color-coded interpretation are applied to postprocess the tomograms and to separate the information-bearing regions of fractures.

### Results and data analysis

Paper gives the data processing results obtained using integral small-direction tomographic technique, namely Imtom technique, for 14 shadow images of steel shells made of both the 30KhGSA steel (initial density of 7.76 g/cm<sup>3</sup>), and the 12Kh18N10T steel (initial density of 7.87 g/cm<sup>3</sup>).

Computational results obtained by integral small-direction tomographic technique, namely Imtom technique, demonstrate how the strength properties of different-grade steels influence the pattern of deformation and fracturing of explosively loaded shells made of these steels.

### References

1. E. A. Kozlov, B. V. Litvinov, Yu. N. Zhugin, et al. Examples and prospects of application of spherically converging shock waves to study physicochemical transformations of minerals and rocks. *J. of Chem. Physics*, 1995, v. 14, #1
2. L. P. Brezgina, A. B. Konovalov, D. V. Mogilenskikh. Examination of internal structure of spherical iron shell after its imploding compression with the help of ultrasmall-direction gamma-tomography. *Proceedings of 7th Int. Conf. on NDT and Technology of Diagnosis in Industry*, 2008, pp. 47–48.
3. L. P. Brezgina, E. A. Kozlov, E. N. Povyshev. Comparing the possibilities of ultrasmall-direction tomography and integral small-direction tomography to register spall and shear fractures in iron and steel shells under their quasi-spherical explosive loading. *J. of Defectoscopy*, #12, 2010.
- E. A. Kozlov, L. P. Brezgina, S. A. Brichikov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, A. V. Olkhovsky, N. S. Zhilyaeva, V. N. Povyshev. Local shear and spall damages of steel shells under quasi-spherical explosive loading. *Collected papers of Int. Conf. on SWCM*, September 16–21, 2012, Ukraine, Kiev, pp. 158–167.

---

6-7

## NVIDIA-GPU ИНСТРУМЕНТ УСКОРЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

С. К. Бурученко

Южно-Уральский Государственный университет, Снежинск,  
Россия

E-mail: askskb@gmail.com

Бессеточный лагранжевый метод SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) широко применяется для моделирования задач вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics). Для увеличения скорости проведения расчетов SPH метод реализован с использованием программно-аппаратной архитектуры CUDA (Compute Unified Architecture Device), позволяющей производить параллельные вычисления с использованием графических процессоров NVIDIA. Для оценки точности и эффективности метода и его компьютерной реализации проведена серия расчетов тестовых расчетов.

Проведенные расчеты показали эффективность использования CUDA для решения задач вычислительной гидродинамики. Получено ускорение расчетов с использованием GPU процессоров более 10–100 раз относительно последовательной реализации с использованием CPU. На Tesla C2070 максимальный расчет проведен с 36 млн частиц.

Проведено моделирование движения жидкости при разрушении сосуда в цилиндрической геометрии. Количественные макропараметры перемещения жидкости полученные при компьютерном моделировании (время формирования и высота центрального и пристенного пиков) хорошо согласуются с результатами экспериментов проведенных в KIT (Karlsruhe) в рамках работ по изучению вероятности возникновения повторной критичности в быстрых реакторах.

Численные методы, алгоритмы, программы и точные решения.

## NVIDIA-GPUS, A TOOL OF ACCELERATION IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD): EFFICIENCY AND RELIABILITY.

S. K. Buruchenko

South Ural State University, Snezhinsk, Russia

E-mail: askskb@gmail.com

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) is a numerical method commonly used in Computational Fluid Dynamics (CFD) to simulate complex free-surface flows. Simulations with this mesh-free particle method far exceed the capacity of a single processor. The GPU parallelisation technique uses the Compute Unified Device Architecture (CUDA) of nVidia devices. Simulations with more than several dozens of million particles on a single GPU card exhibit speed-ups of up to two order of magnitude over using a single-core CPU. The numerical behaviour of the SPH code is validated with a standard benchmark test cases where good agreement with the experimental results is observed. Both the achieved speed-ups and the quantitative agreement with experiments suggest that CUDA-based GPU programming can be used in SPH methods with efficiency and reliability.

Using the developed software, one current problem of fast nuclear reactor safety analyses – that of possible recriticality due to the sloshing motions of the molten reactor core – has been studied. Also numerical simulation of several engineering problems with complex moving boundaries were performed.

In terms of efficiency, it is have demonstrated that simulations with a large number of particles can be simulated on a personal computer equipped with a CUDA-enabled GPU card taking advantage of the performance and memory space provided by the new GPU technology. This means that research can be conducted with available cheap technology for problems that previously required high-performance computing (HPC). The speedups obtained in this work reveal the possibility to study real-life engineering problems at a reasonable computational cost.

Numerical methods, algorithms, codes and accurate solutions.

---

6-8

**ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ  
ЖЕСТКИХ ПОЛИВЫПУКЛЫХ  
ВАРИАЦИОННЫХ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОЙ  
ТЕОРИИ УПРУГОСТИ**

В. А. Гаранжа, Л. Н. Кудрявцева

Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, МФТИ,  
Москва, Россия

Численное решение задач нелинейной теории упругости с большими деформациями сталкивается с рядом трудностей, которые имеют фундаментальный характер. Условие невырожденности упругих деформаций приводит к сильной геометрической нелинейности моделей упругих сред, а также к невыпуклости внутренней энергии. Условие невырожденности деформаций также накладывает ограничения на построение численных схем аппроксимации и на итерационные методы. В частности, на сеточных элементах общего вида необходимо использовать специальные геометрические квадратуры, которые гарантируют, что непрерывный функционал мажорируется дискретным. Методы минимизации для невыпуклых задач, как правило, не удается до конца обосновать. Итерационная минимизация требует использования предобусловливателей. Матрицу Гессе дискретного функционала в качестве предобусловливателя использовать затруднительно, поскольку в общем случае она является незнакоопределенной. Таким образом, возникает задача построения эффективных положительно-определенных предобусловливателей. В работах (Гаранжа, 2000, 2010) была предложена итерационная схема для решения поливыпуклых задач нелинейной теории упругости, которая успешно применялась для решения трехмерных задач численной геометрии. Однако недавно был сформулирован ряд задач, на которых поведение этой итерационной схемы оказалось неудовлетворительным. В частности, это расчет задач упругой разгрузки с предварительным 100–1000-кратным анизотропным сжатием. Для решения данной задачи был предложен новый предобусловливатель. Его применение позволило решить жесткие задачи, которые ранее не поддавались решению. Метод упругой разгрузки успешно применен для построения толстых призматических сеточных слоев вокруг тел сложной формы.

**ITERATIVE METHOD FOR SOLVING STIFF  
POLYCONVEX VARIATIONAL PROBLEMS  
OF NON-LINEAR ELASTICITY THEORY**

V. A. Garanzha, L. N. Kudravtseva

Dorodnicyn Computing Centre of RAS, MFTI, Moscow, Russia

Numerical solution of problems of non-linear elasticity theory with large deformations runs into difficulties of fundamental nature. The elastic deformation nondegeneracy leads to strong geometrical nonlinearity of elastic media models, as well as to intrinsic energy nonconvexity. The deformation nondegeneracy condition also applies restrictions on numerical approximation layouts and on the itera-

tive methods. In particular, on general grid cells one should use special geometrical quadratures, which ensure continuous functional dominance by the discrete one. The minimization techniques for nonconvex problems, as a rule, could not be completely justified. Iterative minimization requires preconditioners. Hessian matrix of the discrete functional is difficult to use as a preconditioner, because generally it is sign-nondefinite. Thus, effective positively-defined preconditioners should be constructed. The papers (Garanzha, 2000, 2010) suggest the iterative scheme to solve polyconvex problems of nonlinear elasticity theory, which was successfully used for solving three-dimensional numerical geometry problems. But recently a number of problems have been defined, for which the behavior of this iterative scheme was found to be unsatisfactory. Among them there is a problem of elastic unloading with 100–1000-fold anisotropic precompression. To solve this problem the new preconditioner was suggested. This made it possible to solve stiff problems being intractable before. The elastic unloading method is applied successfully to construct thick prismatic grid layers around shaped bodies.

6-9

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
МЕТОДА РАСЧЕТА СМЕШАННЫХ ЯЧЕЕК  
В 2D ПРОГРАММЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
КОДА ЭГАК**

А. Р. Гужова, Е. А. Гончаров,  
В. Ю. Колобянин, Ю. В. Янилкин

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

E-mail: yan@md08.vniief.ru

Рассматривается метод решения двумерного уравнения теплопроводности при наличии смешанных ячеек, разработанный в рамках кода ЭГАК. Метод основан на учете теплообмена между компонентами внутри смешанной ячейки вместо обычно применяемого предположения о равенстве температур компонентов.

Основная идея метода заключается в разделении процесса теплопроводности на два этапа.

Первый этап – теплообмен между ячейками – учитывается в обычной неявной разностной схеме. В результате получают новые средние значения энергии для ячеек.

Второй этап – теплообмен между компонентами внутри смешанных ячеек. В качестве входной информации используются вычисленные на первом этапе потоки тепла через стороны ячеек. Эти потоки распределяются между компонентами. По полю объемных концентраций восстанавливается контактная граница между веществами. Далее в каждой смешанной ячейке независимо решается задача распределения приращения энергии за счет теплопроводности между имеющимися компонентами.

Проведено численное исследование метода на примере нескольких тестовых задач. Произведена оценка нормы погрешности и порядка сходимости результатов при измельчении счетной сетки.



## NUMERICAL STUDIES OF A CALCULATION METHOD FOR MIXED CELLS IN 2D HEAT CONDUCTIVITY PROGRAM IN EGAK CODE

A. R. Guzhova, E. A. Goncharov,  
V. Yu. Kolobianin, Yu. V. Yanilkin

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

E-mail: yan@md08.vniief.ru

The paper describes a method to solve a 2D heat conductivity equation for mixed cells that was developed with in EGAK code. The method is based on taking account of heat exchange between the components inside a mixed cell instead of commonly used presumption of the equality of temperatures of the components.

The main idea of this method consists in dividing the heat conduction process into two stages.

The first stage – the heat exchange between cells – is resolved using a common implicit difference scheme. The result is new average energy values for cells.

The second stage is the heat exchange between the components in mixed cells. The heat fluxes across sides of cells calculated in the first stage are used as input data for the second stage. These fluxes are distributed over the components. The field of volume concentrations is used to restore the interface between materials (components). Then, the problem of energy increment distribution owing to the heat conduction between the components is solved in each mixed cell.

Numerical investigation of the method was carried out using several test problems. The error norm and order of convergence for the results obtained with mesh refinement were estimated.

ответственно. Несмотря на большое число работ, посвященных ударному воздействию пузырьков, еще очень мало изучена такая важная для уяснения механизмов кавитационного разрушения проблема, как зависимость возникающих в теле напряжений и деформаций от особенностей динамики пузырька. Трудности как экспериментального, так и теоретического исследования синхронизированных по времени процессов в жидкости и теле обусловлены, по-видимому, большим изменением пространственно-временных масштабов задачи.

Предлагается трехэтапная методика численного исследования зависимости напряжений и деформаций в приповерхностном слое тела от динамики близко расположенного к нему кавитационного пузырька. На первом низкоскоростном этапе динамики пузырька (продолжающемся до контакта кумулятивной струи со стенкой тела в случае примыкания пузырька или с противоположной поверхностью пузырька, если пузырек несколько удален от тела) используется модель несжимаемой жидкости, давление в пузырьке полагается однородным. Несферическая динамика пузырька, поля давления и скорости жидкости, характеристики струи рассчитываются здесь с применением метода граничных элементов. На втором этапе, начинающемся с удара струи, на основе уравнений газовой динамики определяются волновые поля в жидкости и пузырьке, закон изменения давления жидкости на поверхности тела. Решение находится методом конечных разностей на эйлеровых сетках без явного выделения границы между жидкостью и газом. На первом и втором этапах стенка тела считается абсолютно жесткой. На третьем этапе рассчитываются поля напряжений и деформаций, зоны текучести в приповерхностном слое тела при приложении к его поверхности динамической нагрузки, рассчитанной на втором этапе. Используются уравнения динамики идеального упруго-пластического тела и метод С. К. Годунова.

6-10

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ НА ТЕЛО

М. А. Ильгамов<sup>1</sup>, А. А. Аганин<sup>2</sup>, Т. С. Гусева<sup>2</sup>,  
Л. А. Косолапова<sup>2</sup>, В. Г. Малахов<sup>2</sup>, Н. А. Хисматуллина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского  
научного центра РАН, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Институт механики и машиностроения Казанского научного  
центра РАН, Казань, Россия

E-mail: ts.guseva@mail.ru

Кавитационное разрушение (эрозия) контактирующих с жидкостью тел является следствием воздействия схлопывающихся пузырьков. Вероятно, наибольшие повреждения возникают при ударном воздействии, когда в финальной стадии сжатия пузырьков в жидкости и приповерхностном слое тела возникают ударные волны. Если пузырек примыкает к телу или находится на небольшом удалении от него, такие волны могут возникнуть в результате удара образующейся на поверхности пузырька кумулятивной струи непосредственно по телу или по слою жидкости между пузырьком и телом, соот-

## NUMERICAL SIMULATION OF CUMULATIVE IMPACT OF CAVITATION BUBBLES ON A BODY

М. А. Ilgamov<sup>1</sup>, А. А. Aganin<sup>2</sup>, Т. С. Guseva<sup>2</sup>,  
L. A. Kosolapova<sup>2</sup>, V. G. Malakhov<sup>2</sup>, N. A. Khismatullina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Mechanics of Ufa Branch, RAS, Ufa, Russia

<sup>2</sup>Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center,  
RAS, Kazan, Russia

E-mail: ts.guseva@mail.ru

Cavitation damage (erosion) of bodies in contact with liquids results from impact of collapsing bubbles. Most severe damage seems to be produced in the case of shock impact in which shock waves arise in the final stage of the bubble implosion both in the liquid and a near-surface part of the body. Such waves may be due to impact of cumulative liquid jet, which appears on the bubble surface, upon the body directly if the bubble is attached to the body or upon the liquid layer between the bubble and the body if the bubble is not far away from the body. Despite large number of works devoted to shock impact of bubbles, such an important (for understanding mechanisms of cavitation damage) problem as dependence of stresses and strains in the

body on bubble dynamics characteristics has not been studied by now thoroughly enough. Difficulties of experimental as well as theoretical studies of the synchronized-in-time processes in the liquid and the body seem to be caused by large variation of the space and time scales of the problem.

A three-stage numerical technique to study stresses and strains in the near-surface part of a body as a function of dynamics of a cavitation bubble not far away from the body is proposed. In the first low-speed stage of the bubble dynamics (it lasts till the moment of contact of the cumulative jet with the body wall if the bubble is attached to the body or with the opposite part of the bubble surface if the bubble is at some distance from the body), the model of incompressible liquid with uniform pressure in the bubble is used. Non-spherical bubble dynamics, the pressure and velocity fields, jet characteristics are computed here by the boundary element method. In the second stage that begins with jet impact, the wave fields in the liquid and inside the bubble, the law of the liquid pressure variation on the body wall are determined on the basis of the fluid dynamics equations. The solution is evaluated by the finite difference method on Cartesian grids without explicit separation of the liquid-gas interface. In the first and second stages, the body wall is considered as a perfectly rigid one. In the third stage, the stress and strain fields, the yielding zones in the near-surface part of the body are computed applying the dynamic load, previously obtained in the second stage, to the body surface. Equations of ideal elastic-plastic hemi-space dynamics and Godunov method are used.

но моделировать процесс детонации, внешние течения с сильными скачками с учетом отражения и интерференции ударных волн (УВ), деформации и разрушение конструкции. В работе представлены результаты моделирования УВ воздействия на простые конструкции с использованием программного комплекса ANSYS Explicit (AUTODYN, Ls-dyna). Целью является разработка расчетной технологии и ее тестирование на экспериментальных данных о внешнем нестационарном обтекании объектов.

Расчеты выполнены для трех тестовых конфигураций: одна, две и комплекс призм. Мощность и расположение заряда взрывчатого вещества (ВВ) варьировались. Численное моделирование распространения УВ выполнено на основе уравнений Эйлера. Для аппроксимации уравнений рассмотрены две схемы: модификация схемы Годунова второго порядка точности [1] и метод коррекции потоков [2].

Расчеты выполнены в двух постановках. В первом случае решена полная задача о сферической детонации ВВ, распространении УВ в воздушной среде и ее взаимодействии с конструкцией. Во втором случае в качестве граничного условия на входе в расчетную область были заданы значения газодинамических переменных, полученные по полуэмпирической функции CONWEP [3], что позволило решить задачу без расчета детонации ВВ.

Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными данными [4,5] по распределению статического давления в характерных точках на поверхности призм в зависимости от времени, а так же с данными расчетов по полуэмпирической функции CONWEP и расчетов других авторов. Получено удовлетворительное согласование численных и экспериментальных данных по пиковым значениям давления и времени прихода ударной волны на стенки призм.

На следующем этапе выполнено моделирование нелинейного поведения композитных материалов под действием УВ нагрузки. Представлены примеры расчетов УВ воздействия на строительные конструкции.

Выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 211, ЗАДАНИЕ № 2014/140 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

#### Литература

1. Van Leer B. J. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's Method // J. Comput. Phys. 1979. V. 32. № 1. P. 101–136.
2. Zalesak S. T. Fully Multidimensional Flux-Corrected Transport Algorithms for Fluids // J. Comput. Phys. 1979. V. 31. P. 335–362.
3. U.S. Department of the Army, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Technical Manual 5-855-1, 1986.
4. Timothy A. Rose, A Computational Tool for Airblast Calculations, Air3dversion 9 users' guide, Engineering Systems Department Cranfield University, 2006
5. Matthew A. Brittle. Blast propagation in a geometrically complex environment. MSc dissertation, Cranfield University, Defence College of Management and Technology, Defence Academy of the UK, Shrivenham, Swindon, SN6 8LA, UK, jul 2004.

---

6-11

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В ПК ANSYS EXPLICIT

С. А. Вальгер<sup>1</sup>, М. Н. Данилов<sup>1</sup>,  
Н. Н. Федорова<sup>1</sup>, А. В. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Ново-  
сибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: Danilov@sibstrin.ru

В связи с риском техногенных аварий и террористических атак сегодня предъявляются высокие требования к обеспечению безопасности и надежности строительных объектов. Расчет устойчивости зданий под воздействием ударно-волновых нагрузок и разработка эффективных мероприятий по защите сооружений от последствий взрывов становится необходимостью. Подобные расчеты подразумевают решение сопряженной задачи о сложной ударно-волновой инициированной взрывом структуре течения совместно с получением отклика конструкции на внешнее динамическое воздействие.

Увеличение расчетных мощностей современных ЭВМ и совершенствование алгоритмов расчета в современных программных комплексах позволяет числен-

## **SIMULATION OF BLAST ACTION ON CIVIL STRUCTURES USING ANSYS EXPLICIT**

S. A. Valger<sup>1</sup>, M. N. Danilov<sup>1</sup>,  
N. N. Fedorova<sup>1</sup>, A. V. Fedorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University of Architecture  
and Civil Engineering (Sibstrin), Russia, Novosibirsk

<sup>2</sup>Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,  
Russia, Novosibirsk

E-mail: Danilov@sibstrin.ru

Nowadays, high requirements for safety and reliability of building objects are imposed because of a high risk technological accidents and terrorist attacks. Stability analysis of the building under the action of the shock-wave loads and development of effective protection measures for structures against the effects of explosions is becoming a necessity. Such calculations imply the solution of the fluid-structure interaction problems.

An increase of a computational capacity of modern computers and improvement of calculation algorithms used in modern software allow us to numerically simulate the detonation, external flow with strong shocks considering the reflection and interference of shock waves, deformation and damage of structures. The paper presents the simulation results of shock-wave action on test objects obtained using ANSYS Explicit software. The goal is to develop computational technologies and test them on the problem of a shock wave interaction with prismatic bodies by comparison with experimental data.

The calculations have been performed for the three test configurations: one, two and array of prismatic bodies. Capacity and location of the explosive charge were varied. Numerical simulation of wave propagation is based on solving the Euler equations. For numerical approximation, two schemes were used, namely, the modification of Godunov's scheme of second order of accuracy [1] and the Flux-Corrected Transport method [2].

The calculations are performed with two approaches. The first is based on solving the problem of the explosive detonation and the subsequent propagation of the shock wave in the air domain and its interaction with the structures. In the second approach, the CONWEP [3] function is used to set the boundary conditions at the inlet boundary for gas dynamic calculations. Such an approach allows one to simulate the formation and propagation of the blast wave without detonation calculation.

The computation results have been compared to the experimental data [4, 5]. The comparison of numerical and experimental data for the peak values of the pressure and shock wave arrival time on the walls of the prisms has shown a good agreement.

As a next step, modeling of nonlinear behavior of composite materials under blast loading is performed. The examples of calculations of blast action on structures are given.

The work was supported by the Ministry of Education and Science of Russia, project № 211, task № 2014/140.

## **References**

1. Van Leer B. J. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's Method // J. Comput. Phys. 1979. V. 32. № 1. P. 101–136.
2. Zalesak S. T. Fully Multidimensional Flux-Corrected Transport Algorithms for Fluids // J. Comput. Phys. 1979. V. 31. P. 335–362.
3. U.S. Department of the Army, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Technical Manual 5-855-1, 1986.
4. Timothy A. Rose, A Computational Tool for Airblast Calculations, Air3dversion 9 users' guide, Engineering Systems Department Cranfield University, 2006
5. Matthew A. Brittle. Blast propagation in a geometrically complex environment. MSc dissertation, Craneld University, Defence College of Management and Technology, Defence Academy of the UK, Shrivenham, Swindon, SN6 8LA, UK, jul 2004.

---

6-12

## **ВОЗНИКНОВЕНИЕ КОНВЕКЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ С ПРИМЕСЬЮ**

О. Н. Дементьев

Челябинский государственный университет, Челябинск,  
Россия

E-mail: dement@csu.ru

Рассматривается вязкая несжимаемая жидкость, содержащая примесь тяжелых твердых сферических частиц. Жидкость и примесь предполагаются взаимопроницаемыми и взаимодействующими друг с другом сплошными средами, взаимодействием между частицами пренебрегается. Взаимодействие между фазами при их относительном движении подчиняется закону Стокса. Объемная доля частиц настолько мала, что можно пренебречь эйнштейновской поправкой к вязкости жидкости. Частицы предполагаются сферическими, недеформируемыми, одинаковой массы и радиуса; плотность материала частиц много больше плотности жидкости. Жидкость расположена в плоском горизонтальном слое, границы которого свободны. Через верхнюю границу в слой поступают однородно распределенные по слою твердые частицы, нижняя граница подогревается. Тяжелые частицы оседают, поэтому в невозмущенном состоянии в слое имеется поперечное движение примеси с постоянной скоростью. У нижней границы формируется пограничный слой, внутри которого сосредоточено основное изменение температуры несущей среды.

Для решения задачи были использованы уравнения свободной конвекции несжимаемой жидкости с тяжелой примесью в приближении Буссинеска. В рамках линейной теории устойчивости изучены спектры малых «нормальных» возмущений подогреваемого снизу тонкого горизонтального плоского слоя жидкости со свободными границами. Методом пошагового интегрирования Рунге – Кутта – Мерсона с ортогонализацией по Грамму – Шмидту на каждом шаге интегрирования определены границы устойчивости неравномерно нагретого слоя жидкости с примесью в зависимости от параметров несущей среды и облака частиц. Оседающие частицы порождают в жидкости бегущие вдоль слоя

возмущения. Устойчивость равновесия подогреваемого снизу слоя жидкости значительно повышается с увеличением массовой концентрации примеси, длина волны критических возмущений также увеличивается.

### Литература

Дементьев О. Н. Влияние конвекции на устойчивость движения жидкости с неравномерно распределенной тяжелой примесью. – ПМТФ. – 2000. – т. 41. – № 5.

### BEGINNINGS OF CONVECTION IN THE HORIZONTAL LAYER OF THE LIQUID WITH THE IMPURITY

O. N. Dementyev

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: dement@csu.ru

The viscous incompressible liquid containing an impurity of heavy firm spherical particles is considered. The liquid and an impurity are assumed by continuous environments interpenetrating and cooperating with each other, interaction between particles is neglected. Interaction between phases at their relative movement submits to Stokes law. The Volume fraction of particles is so small, that it is possible to neglect Einstein amendment to viscosity of a liquid. Particles are assumed spherical, nondeformable, identical weight and radius; the density of a material of particles is much more than density of a liquid. The liquid is located in a flat horizontal layer which boundaries are free. Through the top boundary in a layer firm particles homogeneously distributed on a layer act, the bottom boundary is warmed up. Heavy particles settle, therefore in not indignant condition in a layer there is a cross-section movement of an impurity with constant speed. At the bottom border the boundary layer inside of which the basic change of temperature of the bearing environment is concentrated is formed.

For the decision of a problem the equations convection an incompressible liquid with a heavy impurity in Boussinesq approximation have been used. Within the limits of the linear theory of stability spectra of small «normal» indignations of a thin horizontal flat layer of a liquid warmed up from below with free borders are studied. The method Runge – Kutta – Merson of step-by-step integration with Gramm – Schmidt orthogonalization on each step of integration certain boundaries of stability non-uniformly warmed up a layer of a liquid with an impurity depending on parameters of the bearing environment and a cloud of particles. Settling particles generate indignations running along a layer in a liquid. Stability of balance of a layer of a liquid warmed up from below considerably raises with increase in mass concentration of an impurity, the length of a wave of critical indignations also increases.

### References

Dementyev O. N. Influence convection on stability of movement of a liquid with non-uniformly distributed heavy impurity. – PMTF. – 2000. – V. 41. No. 5.

6-13

### ЧИСЛЕННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ДВУХКАСКАДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МИКРОМИШЕНИ НА ОСНОВЕ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ С ИЗВЕСТНЫМ И НЕИЗВЕСТНЫМ ЭНЕРГОВЛОЖЕНИИ ВО ВНЕШНЕМ КАСКАДЕ

Г. В. Долголева

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

E- mail: dolgg@kiam.ru

В докладе представлена работа по численному конструированию двухкаскадной мишени. Использование двухкаскадной мишени способствует повышению «отбора» энергии DT-слоем и уменьшению величины вкладываемой энергии, необходимой для зажигания мишени по сравнению с однокаскадной.

Выводится закон энерговложения во внутренний слой каждого из каскадов с тем, чтобы обеспечить безударное сжатие DT-слоя – центральной энерговывделяющей области, где происходят термоядерные реакции. Вывод профиля энерговложения во внутренний каскад проведен в двух случаях: при известном и неизвестном энерговложении во внешнем каскаде.

В первом случае нужно найти закон энерговложения во внешний и внутренний каскады, а во втором случае только во внутренний каскад с учетом известного энерговложения во внешний. В первом случае возникает трудность, связанная с неоднозначностью решения системы: число неизвестных больше числа уравнений, рассмотрены способы преодоления этой ситуации.

Правильность полученных выкладок, а также различные подходы при энерговложении проверены численными расчетами.

### NUMERICAL CONSTRUCTION OF A CYLINDRICAL MICROTARGET ON THE BASIS OF SHOCK-FREE COMPRESSION WITH THE KNOWN AND THE UNKNOWN THE LAW THE ENERGY DEPOSITION IN THE EXTERNAL CASCADE

G. V. Dolgoleva

Keldysh Institute of Applied Mathematic, Russian Academy  
of Sciences, Moscow, Russia

E- mail: dolgg@kiam.ru

The report presents the work on numerical design of the target. The use of two- stage targets to improve the selection of energy DT-layer and reduce the magnitude of the applied energy required for ignition of the target compared with one- cascade.

Displays the law energy deposition into the inner layer of each of the cascades to ensure shock-free compression DT-layer – central energy generating field where thermonuclear reactions. Conclusion profile the law energy deposition the inner cascade conducted in two cases: when the known and unknown the law energy deposition in the external cascade.

In the first case, you need to find the law energy deposition in external and internal cascades, and in the second case only the inner cascade taking into account the known the law energy deposition in the outer. In the first case there is a difficulty with the ambiguity of the solutions of the system: the number of unknowns is greater than the number of equations, regard methods of overcoming this situation.

The correctness of the obtained constructing, as well as different approaches input of energy verified by numerical calculations.

---

6-14

**СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ  
НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КМОП ЯЧЕЙКИ  
ПАМЯТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО  
ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

М. В. Горбатенко, С. С. Дьяков, В. М. Повышев

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

Стойкость электронной компонентной базы (ЭКБ) к радиационному воздействию является важным фактором, который необходимо учитывать при создании современной электронной аппаратуры. Моделирование возникающих в изделиях радиационных эффектов позволяет сократить временные и денежные затраты на создание ЭКБ.

В РФЯЦ – ВНИИЭФ была разработана программа ELSPICE-ELIT, предназначенная для расчетов переходных процессов в электронных схемах, находящихся под воздействием ионизирующего излучения. Программа позволяет исследовать эффекты радиационного воздействия в терминах эквивалентных схем, собранных из сосредоточенных электронных элементов типа диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов, ключей, источников тока, источников напряжения и т. п. Программу ELSPICE-ELIT предполагается использовать при создании методики оценки радиационной стойкости ЭКБ.

В работе представлены некоторые результаты расчетно-теоретического моделирования радиационных воздействий на МОП-транзисторы, в частности, ионизационных фототоков, наведенной проводимости, зарядовых и тиристорных эффектов.

**CIRCUIT SIMULATION OF THE RADIATION  
AS IT AFFECTS THE OPERATION  
OF CMOS MEMORY CELL UNDER  
THE PULSED GAMMA IRRADIATION**

M. V. Gorbatenko, S. S. Dyakov, V. M. Povyshev

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

Resistance of the electronic component base (ECB) to the radiation effect is a basic factor to consider when creating modern electronic equipment. Simulation of the radiation effects that occur in the devices makes it possible to reduce time and money spent on construction of ECB.

RFNC – VNIIEF developed an ELSPICE-ELIT code meant for calculating the transition processes in the electronic circuits under the affect of ionizing radiation. The code allows investigating the radiation effects in terms of equivalent schemes assembled of the concentrated elements such as diodes, transistors, resistors, capacitors, keys, sources of current and voltage etc. ELSPICE-ELIT code is meant to be implemented when creating a method to evaluate radiation stability of the ECB.

The paper presents some results of theoretical and calculation simulation of the radiation effects in MOS-transistors, in particular, they are ionizing photocurrents, induced conductivity, charge and thyristor effects.

---

6-15

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛОЖНЫХ  
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ  
ТЕХНОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИ IOSO**

И. Н. Егоров

Научно-производственное объединение «Сатурн», Москва,  
Россия

Современный уровень развития высокотехнологичных объектов и систем требует использования современных средств и инструментариев при разработке новых, либо модификации современных образцов с целью обеспечения максимально достижимых конкурентоспособных показателей эффективности, т. е. оптимальных по одному, либо совокупности определенных критериев. Стремление обеспечить высокую эффективность объекта, сопряжено с необходимостью оптимального согласования большого числа проектных параметров.

Наличие математических моделей (какими бы полными и точными они не были) является необходимым, но недостаточным условием успешного создания и модификации современных технических систем и объектов. Для этого необходима интеграция их математических моделей с поисковыми методами анализа исследования в рамках единой «оптимизационной среды». Как показывает мировой опыт, современные технологии оптимизации являются мощным инструментарием, позволяющим определять качественно новые технические решения и обеспечивать их высокую эффективность.

В докладе представлена новая технология оптимизации IOSO, которая реализует эволюционную стратегию поиска экстремума, основанную на построении поверхности отклика. Эти алгоритмы обладают высокой эффективностью, обеспечивают существенно более широкие возможности и являются практически инвариантными по отношению к задачам с различными типами целевых функций, часто встречающимися при решении практических проблем (гладкие, недифференцируемые, многоэкстремальные стохастические, с наличием областей невычислимости, со смешанным составом переменных и др.). Эти алгоритмы относятся к классу эволюционных методов оптимизации, когда осуществляется адаптивное изменение его структуры и стратегии в процессе поиска экстремума. Это

обеспечивает высокую эффективность процедуры путем оптимальной настройки алгоритмов на конкретно рассматриваемый объект.

В докладе приводятся многочисленные примеры решения практических задач оптимизации большой размерности (до 150 и более переменных) с целью повышения эффективности сложных технических объектов при использовании Fine/Design 3D, ANSYS, ABAQUS, Fluent и др. Для решения этих задач быои использован программный продукт IOSO PM, реализующий алгоритм параллельной оптимизации семейства алгоритмов IOSO.

### ENHANCEMENT OF COMPLEX ENGINEERING OBJECTS USING IOSO OPTIMIZATION TECHNOLOGY

I. N. Egorov

Scientific and Production Association "Saturn", Moscow, Russia

State-of-the-art high-tech objects and systems require modern means and instrumentation to either develop totally new designs or to modify the existing ones in order to achieve highest possible competitive indices of effectiveness, i. e. indices that are one-criterion or several-criteria optimal. Great number of design parameters must be in an optimal agreement to ensure high level of object effectiveness.

No matter how comprehensive and accurate the existing mathematical models are, their availability is a necessary but not sufficient condition to successfully develop or modify up-to-date engineering systems and objects. To achieve this goal, we need to integrate these mathematical models with search methods of research-oriented analysis within the frames of one uniform "optimization environment". World-wide experience confirms that modern optimization technologies represent high-potential instrumentation that can be used to develop radically new engineering solutions and ensure their high effectiveness.

Paper describes new IOSO optimization technology that utilizes evolutionary extremum-seeking strategy based on response-surface determination. These highly effective algorithms offer much greater possibilities and are almost invariant with respect to the problems with different-type objective functions, namely smooth function, non-differentiable function, multiextremal stochastic function, function with regions of non-computability, and function with mixed variables, that are widely met when solving the problems encountered in practice. These algorithms belong to evolutionary optimization methods when we observe adaptive changes in structure and strategy during extremum seeking. At that, high efficiency of this procedure is ensured by the fact that these algorithms can be optimally tailored to the needs of particular object under consideration.

Paper gives numerous examples how to solve practical optimization problems with many (up to 150 and more) variables to enhance effectiveness of complex engineering objects when using Fine/Design 3D, ANSYS, ABAQUS, Fluent, etc. In order to solve these problems, we used software product IOSO PM that utilizes parallel-optimization algorithm belonging to the family of IOSO algorithms.

6-16

### РЕАЛИЗАЦИЯ, ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ МГД УРАВНЕНИЙ В ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ СЖИМАЕМЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД

М. Ю. Егузова, В. А. Жмайло, В. Н. Софронов,  
О. Н. Чернышова, Ю. В. Янилкин

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

E-mail: M. Yu.Eguzhova@vniief.ru, vaz@vniief.ru,  
V. N. Sofronov@vniief.ru, yan@md08.vniief.ru

Проведено исследование точности эйлеровых методов решения уравнений идеальной и неидеальной (с учетом диффузии и эффектов Холла) магнитной гидродинамики в рамках кода ТРЭК. При решении этих двух типов задач важным является сохранение свойства соленидальности магнитного поля в разностном решении. Нарушение этого свойства может приводить к нефизическому переносу вещества в направлении, ортогональном полю  $\vec{H}$ , а также к потере устойчивости численного решения в задачах неидеальной МГД с большими градиентами проводимости.

Разностные схемы получены с использованием согласованных разностных аппроксимаций дифференциальных операторов первого порядка [1], что позволило сохранить нулевую дивергенцию магнитного поля в разностном решении.

Для решения системы разностных диффузионных уравнений используется библиотека решателей PMLP [2]. Выполнена работа по выбору оптимальных для данных систем алгебраических уравнений комбинаций решателя и предобусловливателя. Проведено тестирование программы на задаче (с аналитическим решением) о диффузии магнитного поля внутрь сферического облака плазмы. Выяснилось, что условие нулевой дивергенции должно быть выполнено как для начальных данных, так и для каждого этапа расщепления.

При построении разностных схем для идеальной МГД важным является возможность их приведения к консервативной форме. Система уравнений идеальной магнитной гидродинамики допускает разрывы в решениях, поэтому для таких уравнений предпочтительнее консервативные разностные схемы.

В качестве тестов идеальной МГД выбраны одномерные задачи о распространении ударных волн различной структуры, а также различные варианты двумерных задач при наличии однородного магнитного поля.

Представлены результаты трехмерных «сквозных» расчетов физических эффектов высотного ЯВ в операции «Teak» [3]. Получены данные о параметрах ионизированной области взрыва, а также возмущениях магнитного поля, как в этой области, так и на поверхности Земли. Проведено сравнение этих параметров с соответствующими данными опыта, а также предыдущих 2D и 3D расчетов.

**Литература**

1. Самарский А. А., Тишкин В. Ф., Фаворский А. П., Шашков М. Ю. Операторные разностные схемы // Дифференциальные уравнения. 1981. Т. XVII, № 7.
2. Бартенев Ю. Г., Бондаренко Ю. А., Ерзунов В. А. и др. Комплекс LPARSOL для решения СЛАУ. XIII Международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование», Саров, 34–36, 2011.
3. EMP radiation from nuclear space bursts in 1962 [Electronic resource]. Mode of access: <http://glasstone.blogspot.com/2006/03/>.

**REALIZATION, RESEARCH AND TESTING  
OF 3D CALCULATION METHODS TO SOLVE  
MHD EQUATIONS IN EULERIAN VARIABLES  
FOR COMPRESSIBLE MULTI-MATERIAL MEDIA**

M. Yu. Yeguzhova, V. A. Zhmailo, V. N. Sofronov,  
O. N. Chernysheva, Yu. V. Yanilkin

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

E-mail: M.Yu.Eguzhova@vniief.ru, vaz@vniief.ru,  
V.N.Sofronov@vniief.ru, yan@md08.vniief.ru

Accuracy of Eulerian methods to solve equations of ideal and non-ideal magnetic hydrodynamics (with the account for the diffusion and Hall Effect) was studied within TREK code. When solving these two types of problems, it is important to preserve the property of solenoidal type of the magnetic field in the difference solution. Violation of this property may result into non-physical transfer of substance in the direction orthogonal to the  $\vec{H}$  field and into the loss of stability of numerical solution in the problems of non-ideal MHD with a large conductivity gradient.

Difference schemes were obtained using consistent difference approximations of differential operators of the first order [1] that made it possible to preserve zero divergence of the magnetic field in difference solution.

To solve a system of differential diffusion equations, PMLP library of solvers was used [2]. There was carried out the work to choose optimum combinations of a solver and a preconditioner for this system of algebraic equations. Testing of the programs was held using the problem (with an analytical solution) of the magnetic field diffusion into the spherical plasma cloud. It was found out that the condition of zero divergence should be met both for the initial data and for each stage of splitting.

When constructing difference schemes for ideal MHD it is important that they could be brought to their conservative form. The systems of equations of ideal magnetic hydrodynamics allows for discontinuities in the solutions, so conservative difference schemes are preferable for such equations.

1D problems of propagation of shock waves of various structure and different versions of 2D problems in the presence of uniform magnetic field were chosen as tests of ideal MHD.

There are the results of 3D “end-to-end” calculations of physical effects of high-altitude NB in «Teak» operation [3]. There were obtained some data on the parameters of the ionized area of the explosion and on perturbations both in this area and on the surface of the Earth. These parameters were compared with respective experimental data and with the data from previous 2D and 3D simulations.

**References**

1. Samarsky A. A., Tishkin V. F., Favorsky A. P., Shashkov M. Yu. Operator Difference Schemes // Differential equations. 1981. Vol. XVII, № 7.
2. Bartenev Yu. G., Bondarenko Yu. A., Erzunov V. A. et al. LPARSOL Complex to Solve SLAE. XIII International Workshop «Supercalculations and Mathematical Simulation», Sarov, pp. 34–36, 2011.
3. EMP radiation from nuclear space bursts in 1962 [Electronic resource]. Mode of access: <http://glasstone.blogspot.com/2006/03/>.

6-17

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В МАГНИТНЫХ  
ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗДАХ**

А. Г. Жилкин, Д. В. Бисикало

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

E-mail: zhilkin@inasan.ru

В докладе обсуждаются основные проблемы, с которыми приходится сталкиваться в задачах численного моделирования структуры течения в тесных двойных системах с магнитным полем. Предложены способы преодоления этих проблем в рамках подхода, который развивают авторы в течении ряда лет. Результатом этих усилий является разработка оригинального параллельного трехмерного численного кода для моделирования таких систем. В основе численного кода лежит конечно-разностная схема годовского типа для уравнений магнитной газодинамики в произвольной нестационарной криволинейной системе координат. Схема имеет повышенный порядок точности в областях гладкости решения и относится к классу TVD схем. Код использует адаптивную сетку, позволяющую существенно увеличить разрешение в области магнитосферы звезды-аккретора и в формирующемся в результате процесса массообмена аккреционном диске. В численной модели учитывается собственное магнитное поле звезды-аккретора. При этом в схеме вычисляется только магнитное поле, индуцированное в аккреционном потоке и во внешней оболочке. Модель позволяет рассчитывать течения с экстремально сильными магнитными полями. Представлены некоторые примеры численного моделирования процессов массопереноса в полуразделенных двойных системах с учетом магнитного поля аккретора. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты 12-02-00047 и 13-02-00939).

**NUMERICAL SIMULATION OF FLOW  
STRUCTURE IN MAGNETIC CLOSE BINARY  
STARS**

A. G. Zhilkin, D. V. Bisikalo

Institute of astronomy RAS, Moscow, Russia

E-mail: zhilkin@inasan.ru

In the report we discussed main problems faced in numerical modeling of the flow structure in close binary systems with magnetic field. We propose ways to overcome

these problems in an approach that the authors are developing over a number of years. The result of these efforts is the development of the original parallel three-dimensional numerical code for the simulation of such systems. The basis of the numerical code is a finite-difference scheme of Godunov type for MHD equations in arbitrary unsteady curvilinear coordinate system. The scheme has a higher order of accuracy in the smooth regions of the solution and belongs to the class of the TVD schemes. The code uses an adaptive mesh, which allows us to increase spatial resolution in the magnetosphere of the accretor star and in the accretion disk that forms as a result of mass transfer process. The numerical model takes into account the proper magnetic field of the accretor star. In the scheme the magnetic field induced in the accretion stream and in the outer envelope is evaluated only. The model allows us to simulate the flow structure with extremely strong magnetic fields. Some examples of numerical modeling of mass transfer in semidetached binary systems taking into account the magnetic field of the accretor are presented. This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 12-02-00047 and 13-02-00939).

6-18

**ПОКРЫТИЕ ВЫПУКЛЫХ  
ВОСЬМИ ВЕРШИННЫХ МНОГОГРАННИКОВ  
В  $R^3$  МЕНЬШИМИ ГОМОТЕТИЧНЫМИ  
КОПИЯМИ**

А. О. Завадский, Е. А. Куршева

Средняя общеобразовательная школа № 125, Снежинск,  
Россия

E-mail: mvpchelintsev@mail.ru, nfismagilova@mail.ru

Пусть  $K$  – выпуклое тело в  $R^n$  (то есть ограниченное выпуклое множество в  $R^n$ , имеющее непустую внутренность),  $b(K)$  – минимальное число тел, гомотетичных  $K$  с коэффициентом гомотетии  $k$ ,  $0 < k < 1$ , покрывающих все  $K$ . Гипотеза Хадвигера [1] заключается в следующем: для всякого ограниченного  $K$  выполняется неравенство

$$n + 1 \leq b(K) \leq 2^n,$$

причем равенство  $b(K) = 2^n$  характеризует параллелепипед.

Доказательство первой части неравенства  $n + 1 \leq b(K)$  не представляет трудностей [2]. В остальном гипотеза подтверждена только для случая  $n \leq 2$  [3]. Для  $n \geq 3$  имеются лишь частные результаты, с достаточно полным обзором которых можно познакомиться в [4]. В [5] было анонсировано решение проблемы для  $n = 3$ . Однако, как отмечается в [4], это решение не является полным, и, соответственно, вопрос для  $n = 3$  остается открытым.

В работе доказывается нетривиальная теорема, которая сводит задачу покрытия выпуклого тела в  $R^n$  меньшими гомотетичными копиями к задаче освещения его границы. Это дает эффективное инструментальное средство для решения исходной задачи. Работоспособность теоремы иллюстрируется коротким доказатель-

ством неравенства  $b(\Gamma) \leq 2^2 = 4$  для выпуклых многоугольников  $\Gamma$  в  $R^2$ .

Целью является доказательство того, что в классе выпуклых восьми вершинных многогранников в  $R^3$  равенство  $b(\Gamma) = 2^3 = 8$  выполняется только в том случае, если многогранник  $\Gamma$  – параллелепипед. В настоящей работе продолжают исследования, изложенные в [6].

**Литература**

1. H. Hadwiger, *Ungeloste Probleme* // *Elemente der Mathematik*. 1957. V. 12. № 20. P. 121.
2. В. Г. Болтянский, И. Ц. Гохберг. Теоремы и задачи комбинаторной геометрии. – М.: «Наука». 1965.
3. И. Ц. Гохберг, А. С. Маркус. Одна задача о покрытии выпуклых фигур подобными // *ИМФ АН СССР*. 1960. Т. 10. № 76. С. 87–90.
4. K. Bezdek. The Illumination Conjecture and Its Extensions // *Period. Math. Hungar.* 2006. V. 53. P. 59–69.
5. В. Г. Болтянский. Решение проблемы освещения для трехмерных выпуклых тел // *ДАН РФ*. 2000. Т. 375. № 3. С. 298–301.
6. А. О. Завадский, Е. А. Куршева. О покрытии выпуклых многогранников в  $R^3$  меньшими гомотетичными копиями // *V Ассамблея студентов и школьников «Молодежь – будущее атомной промышленности России»*. Снежинск, 30 ноября 2013.

**COVERING OF CONVEX EIGHT-VERTEX  
POLYHEDRONS IN  $R^3$  BY SMALLER  
HOMOTHETIC COPIES**

А. О. Zavadskii, E. A. Kursheva

School No 125, Snezhinck, Russia

E-mail: mvpchelintsev@mail.ru, nfismagilova@mail.ru

Let  $K$  be a convex body in  $R^n$  (i.e. bounded convex set with nonempty interior in  $R^n$ ),  $b(K)$  – minimum number of bodies, homothetic to  $K$  with homothety coefficient  $k$ ,  $0 < k < 1$ , that cover the whole  $K$ . The Hadwiger's hypothesis [1] is as follows: for every bounded  $K$  an inequality:

$$n + 1 \leq b(K) \leq 2^n,$$

should be fulfilled. By the way, the equality  $b(K) = 2^n$  specifies a parallelepiped.

Proving of the first part of an inequality  $n + 1 \leq b(K)$  is not a difficult task [2]. In the second part the hypothesis is proved only in the case of  $n \leq 2$  [3]. For  $n \geq 3$  only partial results exist, a fairly thorough overview of them can be found in [4]. In [5] a solution for  $n = 3$  was announced. However, as noted in [4], this solution is not complete and, accordingly, the question in the case of  $n = 3$  remains open.

In the present work a nontrivial theorem is proved, that reduces the problem of covering of a convex body in  $R^n$  by smaller homothetic copies to the problem of illumination of its boundary. It gives an effective instrumental tool for solution of the original problem. Efficiency of the theorem is illustrated by short proof of an inequality  $b(\Gamma) \leq 2^2 = 4$  for convex polygons  $\Gamma$  in  $R^2$ .

The purpose is to prove that in the class of convex eight-vertex polyhedrons in  $R^3$  the equality  $b(\Gamma) = 2^3 = 8$  is fulfilled only if a polyhedron  $\Gamma$  is a parallelepiped. The present work continues research, stated in [6].



## References

1. H. Hadwiger, *Ungeloste Probleme* // *Elemente der Mathematik*. 1957. V. 12. № 20. P. 121.
2. V. G. Boltjanskii, I. Ts. Gohberg. *Theorems and problems of combinatorial geometry*. – M.: «Nauka». 1965.
3. I. Ts. Gohberg, A. S. Markus. *One problem of covering of convex bodies by copies* // *IMPh AS USSR*. 1960. T. 10. № 76. P. 87–90.
4. K. Bezdek. *The Illumination Conjecture and Its Extensions* // *Period. Math. Hungar.* 2006. V. 53. P. 59–69.
5. V. G. Boltjanskii. *The solution of illumination problem for three-dimensional convex bodies* // *DAN RF*. 2000. T. 375. № 3. P. 298–301.
6. A. O. Zavadskii, E. A. Kursheva. *About covering of convex polyhedrons in R3 by smaller homothetic replicas* // *V Assembly of students and schoolkids «The youth is the future of nuclear energy industry in Russia»*. Snezhinsk, November 30th, 2013.

6-19

**ОБ АППРОКСИМАЦИИ  
ЧИСЛЕННОГО ПОТОКА В МЕТОДЕ  
КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА С УЧЕТОМ  
ПОДСЕТОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ РАСЧЕТЕ  
ТЕЧЕНИЙ МНОГОМАТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЫ**

П. П. Захаров, И. С. Меньшов

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

E-mail: vniia@vniia.ru

В докладе предлагается математическая и численная модели по расчету течений многоматериальных сред на неподвижных эйлеровых расчетных сетках. В качестве математической модели многоматериальной среды используется односкоростная модель неоднородной среды в гидродинамическом приближении на базе единого уравнения состояния, полученного в предположении равенства давлений и температур в компонентах. Положение компонент многоматериальной среды в пространстве отслеживается по полю массовых (объемных) концентраций. Для численного расчета течений используется метод конечного объема.

Новизной предлагаемого численного метода является аппроксимация численного потока через грани контрольных объемов с учетом подсеточной структуры в смешанных ячейках. Учет подсеточной структуры приводит к рассмотрению «составной задачи Римана», состоящей из стандартной задачи Римана и последующим волновым взаимодействием с контактным разрывом внутри смешанной ячейки. Аппроксимация с учетом подсеточной структуры отличается от стандартной аппроксимации в методе С. К. Годунова и позволяет уменьшить численное размазывание границ раздела между материалами и правильно учитывать балансы массы, импульса и энергии. В качестве иллюстрации возможностей предлагаемого метода в докладе представлены расчеты ряда задач.

**ON NUMERICAL FLUX APPROXIMATION  
IN FINITE VOLUME METHOD WITH REGARD  
OF SUB-CELL STRUCTURE  
FOR MULTIMATERIAL MEDIUM FLOWS  
COMPUTATION**

I. S. Menshov, P. P. Zakharov

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: vniia@vniia.ru

The report proposes a mathematical and numerical models for the calculation of multimaterial medium flows on fixed Eulerian computational grids. As a mathematical model of multimaterial medium we use single velocity heterogeneous medium model in the hydrodynamic approximation based on a unified equation of state, obtained under the assumption of pressures and temperatures equality in the components. Position of the components in the space is monitored by field mass (volume) concentrations distributions. For the numerical calculations of flows finite volume method is used.

The novelty of the proposed numerical method is a numerical flux approximation through the faces of control volumes, taking into account the sub-cell structure in mixed cells. Accounting for sub-cell structure leads to the consideration of «composite Riemann problem» consisting of standard Riemann problem and the subsequent wave interaction with a contact discontinuity inside the mixed cell. Sub-cell structure based approximation differs from the standard approximation in Godunov method and reduces the numerical smearing of the interfaces between materials and properly account balances of mass, momentum and energy. As an illustration of the possibilities of the proposed method, the report provides estimates of a number of problems.

6-20

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ  
МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ**

А. С. Зелепугин<sup>1,2</sup>, О. А. Шкода<sup>2</sup>,  
О. К. Лепанова<sup>2</sup>, С. А. Зелепугин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский научный центр СО РАН, Томск, Россия

E-mail: szel@yandex.ru, szel@dsm.tsc.ru

Создание материалов с заданным набором структурных и функциональных свойств в настоящее время является областью повышенного внимания в материаловедении и технике. Новый класс конструкционных материалов, металло – интерметаллидных слоистых композитов (МИСК) [1, 2], может иметь микро-, мезо- и макроструктуру. Уникальные специфические свойства этого класса соединений делают их привлекательными для применения в авиакосмической технике, а метод создания позволяет использовать новые технологии, расширяя функциональные возможности композитов и область их применения.

В данной работе проведены экспериментальные и численные исследования. В экспериментах проведено тестирование на баллистическом стенде и исследованы особенности разрушения образцов  $Al_3Ti - Ti$ . Процессы высокоскоростного взаимодействия ударника с многослойным композитом исследованы численно методом конечных элементов в осесимметричной постановке в рамках упруго-пластической модели среды. Результаты расчетов показывают, что разрушение слоев композиционной преграды идет по различным механизмам – хрупкому (слой интерметаллида) и вязкому (слой металла). Показано, что однородная преграда, как целиком из интерметаллида  $Al_3Ti$ , так и из титанового сплава ВТ6, менее стойкая по сравнению с композиционной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 14–08–31208) и Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1943).

#### Литература

1. Price R. D., Jiang F., Kulin R. M., Vecchio K. S. Effects of ductile phase volume fraction on the mechanical properties of Ti- $Al_3Ti$  metal-intermetallic laminate (MIL) // *Materials Science and Engineering A*, 2011 Vol. 528. P. 3134–3146.
2. Zelepugin S. A., Mali V. I., Zelepugin A. S., Ilina E. V. Failure of metallic-intermetallic laminate composites under dynamic loading // *Shock Compression of Condensed Matter. USA: American Institute of Physics*. 2012. Vol. 1426. P. 1101–1104.

#### EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF MULTILAYER COMPOSITES FAILURE

A. S. Zelepugin<sup>1,2</sup>, O. A. Shkoda<sup>2</sup>,  
O. K. Lepakova<sup>2</sup>, S. A. Zelepugin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk Scientific Center SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: szel@yandex.ru, szel@dsm.tsc.ru

The field of material microstructure design targeted for a specific set of structural and functional properties is now a recognized field of focus in materials science and engineering. A new class of structural materials called metal-intermetallic laminate (MIL) [1, 2] composites can have micro-, meso- and macrostructure. The superior specific properties of this class of composites makes them attractive for high-performance aerospace applications, and the fabrication method for creating MIL composites allows new embedded technologies to be incorporated into the materials, enhancing their functionality and utility.

In this work experimental and numerical investigations have been done. In the experiments the  $Al_3Ti - Ti$  samples were tested on a ballistic stand and the features of the sample failure were investigated. The processes of high-velocity interaction of a projectile with a multilayer composite target were numerically investigated in axisymmetric geometry using the finite element method. Results of computations demonstrate that destruction of the intermetallic layer is brittle as against to plastic failure of the metal layer. It was shown that the optimal composite target has higher ballistic resistance in comparison with a uniform target either  $Al_3Ti$  or Ti-6-4.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 14-08-31208) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under contract № 2014/223 (project no. 1943).

#### References

1. Price R. D., Jiang F., Kulin R. M., Vecchio K. S. Effects of ductile phase volume fraction on the mechanical properties of Ti- $Al_3Ti$  metal-intermetallic laminate (MIL) // *Materials Science and Engineering A*, 2011 Vol. 528. P. 3134–3146.
2. Zelepugin S. A., Mali V. I., Zelepugin A. S., Ilina E. V. Failure of metallic-intermetallic laminate composites under dynamic loading // *Shock Compression of Condensed Matter. USA: American Institute of Physics*. 2012. Vol. 1426. P. 1101–1104.

6-21

#### ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ

С. А. Зелепугин<sup>1,2</sup>, А. С. Зелепугин<sup>1,2</sup>,  
А. С. Бодров<sup>1</sup>, Н. В. Позднышева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский научный центр СО РАН, Томск, Россия

E-mail: szel@yandex.ru, szel@dsm.tsc.ru

Численно в трехмерной постановке исследован процесс деформирования титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании (ДКУП) [1, 2] для динамической схемы нагружения. Результаты численного моделирования показывают, что на процесс деформирования образца при прохождении пересечения каналов существенное влияние оказывает наклонная площадка. Выявлено, что динамика движения образца приводит к образованию двух плоскостей пластического деформирования. Эти плоскости направлены от концов наклонной площадки к внутреннему углу пересечения стенок каналов. Определены эффективные значения начальной скорости образца и действующего на образец давления. Сделано предположение о предпочтительности образцов квадратного сечения по сравнению с образцами цилиндрической формы с точки зрения равномерности пластического деформирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1943).

#### Литература

1. 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.
2. Шипачев А. Н., Зелепугин А. С., Ильина Е. В., Зелепугин С. А. Моделирование динамического канально-углового прессования титановых образцов по двухпоршневой схеме нагружения // *Деформация и разрушение материалов*. 2012. № 10. С. 7–11.

### 3D SIMULATION OF PLASTIC DEFORMATION OF TITANIUM SAMPLES UNDER DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING

S. A. Zelepugin<sup>1,2</sup>, A. S. Zelepugin<sup>1,2</sup>,  
A. S. Bodrov<sup>1</sup>, N. V. Pozdnysheva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk Scientific Center SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: szel@yandex.ru, szel@dsm.tsc.ru

Deformation of titanium samples during dynamic channel-angular pressing (DCAP) [1, 2] is numerically investigated in 3D statement for dynamic scheme of loading. Numerical simulation shows that the oblique plane significantly influences on the sample deformation during its passage through the crossing channels. It was determined that dynamics of sample motion leads to the formation of two planes with plastic deformation. These planes are directed from the ends of the oblique plane to the inner corner of the crossing channels. The effective values of initial speeds and pressures are determined for the titanium sample. In terms of uniform plastic deformation the samples of a square section are more suitable compared with the samples of a cylindrical shape.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under contract № 2014/223 (project no. 1943).

#### References

1. Shipachev A. N., Suglobova I. K., Ilina E. V., Zelepugin S. A. Selection of Loading Parameters for Titanium Samples under Dynamic Channel-Angular Pressing // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics, 2011. No. 2 (14). P. 111–116.
2. Shipachev A. N., Zelepugin A. S., Ilina E. V., Zelepugin S. A. Simulation of Dynamic Channel-Angular Pressing of Titanium Samples Using a Two-Piston Loading Scheme // Deformation and Fracture of Materials, 2012. No. 10. P. 7–11.

---

6-22

### ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ SPH РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

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 приводится описание метода и некоторые результаты численных расчетов одномерных и осесимметричных задач лучистой теплопроводности в диффузионном приближении методом сглаженных частиц SPH (см., напр., [1–2]).

SPH-метод является уникальным бессеточным, безавостным численным методом для решения всевозможных задач, возникающих в математической физике, механике сплошной среды и других задачах, описы-

ваемых системами уравнений в частных производных. Известны значительные трудности, возникающие при численном решении конечно-разностными методами сложных многомерных задач нелинейной теплопроводности и задач течения теплопроводного газа.

При всей видимой простоте записи вычислительных формул в SPH-виде в этом методе имеются свои трудности и проблемные вопросы. В частности, сложности появляются при разрывных коэффициентах теплопроводности, при лучистой теплопроводности, когда коэффициент теплопроводности сильно зависит от температуры.

Приводятся результаты численных расчетов модельных одномерных и двумерных задач теплопроводности.

#### Литература

1. J. J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics / Rep. Prog. Phys., 2005, v. 68. – p. 1703–1759.
2. А. Д. Зубов, А. М. Лебедев. Метод сглаженных частиц SPH для расчетов газодинамических задач со сферической и цилиндрической симметриями / ВАИТ, сер. «Матем. модел. физич. процессов», 2009, вып. 1, с. 19–28.

### A NUMERICAL SPH METHOD FOR TWO-DIMENSIONAL AXIALLY SYMMETRIC PROBLEMS OF NONLINEAR HEAT CONDUCTION

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 describes a method which solves radiative heat conductivity in diffusion approximation with smoothed particle hydrodynamics (SPH) (see, for example, [1] and [2]), and provides some results for one-dimensional and axially symmetric problems.

SPH is a unique meshless and uninterrupted method which can be used for a variety of problems in mathematical physics, continuum mechanics and other areas where partial differential equations are involved. It is known that the use of finite difference methods for solving complicated multidimensional problems in nonlinear heat conductivity and heat conducting gas flows often causes severe difficulties.

With the apparent simplicity of numerical formulas in SPH, the method has however its difficulties and problematic issues. So, difficulties arise when heat conductivity coefficients are discontinuous or strongly dependent on temperature in radiative heat conductivity calculations.

One- and two-dimensional calculations of model heat conduction problems are provided.

#### References

1. J. J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics / Rep. Prog. Phys., 2005, v. 68. – p. 1703–1759.
  2. A. D. Zubov, A. M. Lebedev. A method of smoothed particles SPH for calculations of a gas-dynamic problems with spherical and cylindrical symmetries / VANT, ser. Mathem. model, of phys. proc., 2009, N. 1, p. 19–28 (In Russian).
-

6-23

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССА МАССООБМЕНА В МАГНИТНЫХ  
КАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ  
С БЫСТРО ВРАЩАЮЩИМИСЯ БЕЛЫМИ  
КАРЛИКАМИ**

П. Б. Исакова<sup>1</sup>, А. Г. Жилкин<sup>1,2</sup>,  
Д. В. Бисикало<sup>1</sup>, Н. Р. Ихсанов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск,  
Россия

<sup>3</sup>Главная астрономическая обсерватория РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: isakovapb@inasan.ru

Исследуется структура течения плазмы в магнитных катаклизмических переменных с учетом сильного магнитного поля и быстрого вращения белого карлика. В качестве примера рассматривается система AE Волода, в которой период собственного вращения белого карлика примерно в 1000 раз короче орбитального периода. Анализ наблюдательных данных показывает, что в этой системе часть вещества, вытекающая из внутренней точки Лагранжа, остается внутри полости Роша белого карлика. Для построения самосогласованной модели проведен анализ возможных физических механизмов, которые могут способствовать уменьшению эффективности передачи веществу дополнительного углового момента от вращающейся магнитосферы в тесных двойных системах с быстро вращающимися магнитными белыми карликами. В качестве таких механизмов рассмотрены: частичная ионизация плазмы в струе, давление магнитодипольного излучения или релятивистского звездного ветра от вращающегося белого карлика, релятивистское запаздывание магнитных силовых линий и неполное проникновение магнитного поля в плазму. Анализ показал, что последний механизм является наиболее эффективным, так как с учетом быстрого вращения внешнее магнитное поле не успевает полностью проникнуть в сгусток плазмы за характерное динамическое время. В результате непосредственное взаимодействие магнитного поля со сгустком будет происходить только в некотором диффузионном слое, который может быть достаточно тонким. Учет этого эффекта позволяет получить структуру течения, согласующуюся с наблюдениями.

**NUMERICAL SIMULATIONS  
OF MASS TRANSFER PROCESS IN MAGNETIC  
CVS WITH FAST-ROTATING WHITE DWARFS**

P. B. Isakova<sup>1</sup>, A. G. Zhilkin<sup>1,2</sup>,  
D. V. Bisikalo<sup>1</sup>, N. R. Ikhsanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup>The Central Astronomical Observatory RAS, Saint Petersburg,  
Russia

E-mail: isakovapb@inasan.ru

The flow structure in magnetic cataclysmic variables was investigated taking into account the effects of strong magnetic field and fast rotation of the white dwarf. We model the AE Aqr system as a representative observational object whose spin period of the accretor is about 1000 times shorter than the orbital period of the system. Observations show that in spite of the fast rotation some part of the stream from the inner Lagrangian point comes into the Roche lobe region. To construct the self-consistent model we analyzed possible physical mechanisms that can reduce the effectiveness of additional angular momentum transfer from rotating magnetosphere to material in close binary systems with fast-rotating white dwarfs. Among these mechanisms are the partial ionization of plasma in the flow, pressure of magnetodipole radiation or stellar wind from the rotating white dwarf, relativistic retard of magnetic field lines and the incomplete penetration of the magnetic field to plasma. Our analysis shows that the last mechanism is the most effective, since the outer magnetic field does not have time to penetrate into a plasma blob within the specific dynamic time if the fast rotation is taking into account. As a result, the direct interaction between the magnetic field and blob takes place just in some diffusion layer that can be sufficiently thin. Taking this effect into account we can find the flow structure that is in an agreement with observations.

6-24

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ РАВНОВЕСИЯ  
ТРУБОПРОВОДА, С ДВИЖУЩЕЙСЯ ПО НЕМУ  
ЖИДКОСТЬЮ, В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ  
С УЧЕТОМ ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ  
О ЕГО СТЕНКИ**

В. В. Башуров<sup>1</sup>, Н. Ф. Исмагилова<sup>2</sup>, А. И. Кропотов<sup>3</sup>,  
М. В. Пчелинцев<sup>2</sup>, М. Ю. Филимонов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Центр экологического и техногенного мониторинга»,  
Трёхгорный, Россия

<sup>2</sup>Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ,  
Снежинск, Россия

<sup>3</sup>Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского  
УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: VVBashurov@mail.ru, nfismagilova@mail.ru,  
mvpchelintsev@mail.ru, fmy@imm.uran.ru

Настоящая работа посвящена продолжению исследований, изложенных в публикациях [1–4].

Равновесие трубопровода, с движущейся по нему вязкой жидкостью в поле силы тяжести с учетом тре-

ния жидкости о его стенку, описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с краевыми условиями. Учет трения жидкости о стенку трубопровода осуществляется на основе эмпирических инженерных моделей [5], [6]. Для исследования положений равновесия исходные уравнения заменяются приближенными уравнениями, которые допускают первые интегралы. Из этих интегралов выводится дифференциальное уравнение первого порядка, допускающее аналитическое решение, и приближенно описывающее профиль трубопровода. Из граничных условий вытекает система нелинейных трансцендентных уравнений с избыточным числом неизвестных (константами интегрирования), которая поддается аналитическому исследованию. В результате обнаруживается, что при одних и тех же исходных данных трубопровод может иметь четыре положения равновесия – два с выгибом вверх и два с выгибом вниз. Профили трубопровода в положениях равновесия строятся численно.

### Литература

1. В. В. Башуров и др. Равновесие трубы, заполненной жидкостью, в поле сил тяжести // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011. Москва, 2–5 февраля 2011.
2. В. В. Башуров и др. Динамика и статика трубопровода в поле сил тяжести // Вестник Нижегородского ун-та. 2011. № 4 (2). С. 61–62.
3. В. В. Башуров и др. Нелинейная модель трубопровода в поле силы тяжести с движущейся по нему идеальной жидкостью // ПМТФ. 2012. Т. 53. № 1. С. 51–57.
4. В. В. Башуров и др. Равновесие трубы, заполненной движущейся идеальной жидкостью, в поле силы тяжести // ЗНЧ-2012. Снежинск, 16–20 апреля 2012.
5. Н. Я. Фабрикант. Аэродинамика. Общий курс.– М.: «Наука», 1964.
6. Г. Броуд, С. Шустер. Гидравлические удары и безопасность ядерных реакторов // Механика (новое в зарубежной науке). Сборник статей.– М.: «Мир», 1981.

### STUDY OF PIPELINE EQUILIBRIUM POSITIONS, FLUID MOVING INSIDE PIPELINE, IN GRAVITY FIELD, TAKING INTO ACCOUNT THE FRICTION OF LIQUID ON ITS SIDES

V. V. Bashurov<sup>1</sup>, N. F. Ismagilova<sup>2</sup>, A. I. Kropotov<sup>3</sup>,  
M. V. Pchelintsev<sup>2</sup>, M. Yu. Filimonov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tryokhgorny, Russia

<sup>2</sup>SFTI NRNU MEPhI, Snezhinsk, Russia

<sup>3</sup>IMM UB RAS, Yekaterinburg, Russia

E-mail: VVBashurov@mail.ru, nfismagilova@mail.ru,  
mvpchelintsev@mail.ru, fmy@imm.uran.ru

The present work continues research, stated in publications [1–4].

Equilibrium of a pipeline, with viscous liquid moving inside, in gravity field, taking into account the friction of fluid on its sides, is described by a system of nonlinear differential second order equations with boundary conditions. Accounting friction of liquid on pipeline's sides is based on empirical engineering models [5], [6]. To research equilibrium positions original equations are replaced by approximate equations, that allow first integrals. These integrals are used to derive a differential first order equation, that

allows analytical solution and approximately describes the profile of a pipeline. Boundary conditions imply a system of nonlinear transcendental equations in an excessive number of unknowns (constants of integration). That system is amenable to analytical study. As a result, it is detected that at the same benchmark data a pipeline can possess four equilibrium positions – two with upward bends and two with downward bends. Profiles of a pipeline in equilibrium positions are constructed numerically.

### References

1. V. V. Bashurov et al. Equilibrium of a pipe, filled with fluid, in gravity field // Scientific session of NRNU MEPhI-2011. Moscow, 2011, February 2–5.
2. V. V. Bashurov et al. Dynamics and statics of a pipeline in gravity field // Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. 2011. №4 (2). С. 61–62.
3. V. V. Bashurov et al. The nonlinear model of a pipeline in gravity field with ideal fluid moving inside // PMTF. 2012. Т. 53. № 1. С. 51–57.
4. V. V. Bashurov et al. Equilibrium of a pipe, filled with moving ideal fluid, in gravity field // ZSR-2012. Snezhinsk, 2012, April 16–20.
5. N. Ya. Fabrikant. Aerodynamics. Guideline. – М.: «Наука», 1964.
6. H. Brode, S. Schuster. Hydraulic impacts and safety of nuclear reactors // Mechanics (new in foreign science). Collection of articles. – М.: «Mir», 1981.

6-25

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ НА БАЗЕ РАЗРЫВНОГО МЕТОДА ГАЛЕРКИНА

Н. Б. Иткина, С. И. Марков

Новосибирский Государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия

В работе предлагается вычислительная схема решения задачи просачивания жидкости в пористой среде, анализируется устойчивость и сходимость схемы. Разработанные алгоритмы решения трехмерных задач тепло- массопереноса верифицируются на классе модельных задач и задач приближенных к реальным. Проводится сравнение с данными физического эксперимента. Для пористой среды с порами различной формы и диаметра определен эффективный коэффициент диффузии. Исследуется возможность использования лифтинг-операторов для повышения устойчивости вычислительной схемы.

### MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF ADSORPTION ON THE BASIS OF THE DISCONTINUOUS GALERKIN METHOD

N. B. Itkina, S. I. Markov

Novosibirsk State technical University, Novosibirsk, Russia

The computational scheme for fluid motion in a porous medium and analyze stability and convergence of the scheme are offered in the report. The algorithms for solving

3D problems of heat and mass transfer verified on the class of model problems and real engineering problems. Numerical results are compared with data of physical experiments. The effective diffusion coefficient of a porous medium with pores of different shape and diameter are determined. In report analyzed special lifting operator using to increase numerical consistency of scheme.

6-26

### ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА УДАРНЫХ ВОЛН

К. И. Казин, Д. А. Варфоломеев, В. Ф. Куропатенко

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

Ключевые слова: ударные волны, сильные разрывы, неоднородный разностный метод.

Для математического моделирования ударных волн в сплошных средах широко применяются однородные разностные методы, в которых ударные волны «размазываются» на несколько интервалов сетки. Неоднородные разностные методы позволяют выделять разрывы, которые разграничивают области с гладким решением. Неоднородные методы являются алгоритмически более сложными, но позволяют на одинаковой сетке получать результаты точнее, чем результаты, полученные с помощью однородных методов. Важной особенностью методов с выделением разрыва является отсутствие энтропийных следов в решении. Одним из методов, который позволяет выделять в решении сильные и слабые разрывы является метод характеристик [1]. В 60-х годах был создан неоднородный разностный метод в Лагранжевых координатах «ВОЛНА» [2]. В работе предлагается модификация данного метода с целью повышения точности расчета выделенных ударных волн. Для этого наряду с разностными методами применяются элементы метода характеристик. На примере расчета методических задач показаны преимущества по сравнению с методом из [2].

#### Литература

1. Жуков А. И. Применение метода характеристик к численному решению одномерных задач газовой динамики // Тр. Мат. Ин-та АН СССР, 1960.
2. Куропатенко В. Ф., Коваленко Г. В., Кузнецова В. И. и др. Комплекс программ «ВОЛНА» и неоднородный разностный метод для расчета неустановившихся движений сжимаемых сплошных сред. Часть 1. Неоднородный разностный метод // ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов, 1989. Вып. 2, с. 9–17.

### ABOUT ONE METHOD OF INCREASING THE ACCURACY OF SHOCK WAVE CALCULATION

K. I. Kazin, D. A. Varfolomeev, V. F. Kurapatenko

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

Key words: shock waves, strong discontinuities, nonhomogenous difference method

For mathematical modeling of shock waves in continua, nonhomogenous difference methods are widely used. In these methods, the shock waves are “smeared” over several mesh intervals. Nonhomogenous difference methods permit to determine discontinuities, which separate the domains with smooth solution. Nonhomogenous difference methods are algorithmically more complicated, but permit to get the results that are more accurate than the results obtained with the help of uniform methods. The important feature of these methods with discontinuity determination is the absence of entropic traces in a solution. One of the methods, which permit to determine strong and weak discontinuities, is the method of characteristics [1]. In 60-s, nonhomogenous difference method “VOLNA” was built in Lagrangian coordinates [2]. The work suggests modification of this method aimed at improving the accuracy of calculation of determined shock waves. For this purpose, along with difference methods, one uses the elements of characteristics methods. Using an example of methodical problems calculation, the advantages are shown in comparison with methods from [2].

#### References

1. A. I. Zhukov. Application of characteristics method to numerical solution of 1D problems for gaseous dynamics // Transactions of Math. Inst. USSR AS, 1960.
2. V. F. Kurapatenko, G. V. Kovalenko, V. I. Kuznetsova et al. Complex «VOLNA» and nonhomogenous difference method for calculation of unstabilized motions of compressed continua. Part 1. Nonhomogenous difference method // VANT. Series: Mathematical modeling of physical processes, 1989. #. 2, p. 9–17.

6-27

### ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ В ЗАДАЧЕ ВЫВЕДЕНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

И. Н. Кандоба<sup>1</sup>, И. В. Козьмин<sup>1</sup>,  
А. Б. Ложников<sup>1</sup>, В. И. Починский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского  
УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>НПО автоматики им. академика Н. А. Семихатова,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: kandoba@imm.uran.ru

Рассматриваются вопросы построения оптимального управления в задаче выведения ракеты-носителя (носителя) на заданную околоземную эллиптическую орбиту. Задача оптимизации заключается в построении программного управления носителем, которое обес-

печивает выведение им на заданную орбиту полезной нагрузки максимальной массы. Движение носителя описывается нелинейной динамической системой, а к искомому управлению предъявляются дополнительные требования, которые приводят к возникновению в задаче ограничений на фазовое состояние системы.

В рамках рассматриваемой математической модели управляемого движения носителя задача максимизации массы выводимой полезной нагрузки эквивалентна задаче оптимального быстрогодействия с терминальными ограничениями [1]. Реализация общих подходов к решению этой задачи связана с существенными вычислительными трудностями. Для ее приближенного решения разработан алгоритм [2], основанный на декомпозиции исходной задачи на несколько задач оптимального управления. Здесь близкое к оптимальному управление строится в результате выполнения специальной итерационной процедуры.

Предлагаются подходы к решению ряда задач оптимального быстрогодействия с фазовыми ограничениями, основанные на модификациях предложенного квазиоптимального управления. Основное внимание уделяется способам обеспечения падения отделяемых частей носителя в заданные районы. Приводятся результаты вычислительного эксперимента с использованием реальных данных.

Работа выполнена в рамках программ фундаментальных исследований Президиума РАН «Динамические системы и теория управления» при поддержке УрО РАН (проект 12-П-1-1022), (проект 13-1-012-НПО), «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы» (проект 12-П-1-1023).

### Литература

1. Думшева Т. Д., Костоусов В. Б., Костоусова Е. К., Починский В. И. Исследование задачи оптимального вывода полезной нагрузки на заданную эллиптическую орбиту // Труды Института математики и механики. УрО РАН. 2010. Т. 16. № 5. С. 57–65.
2. Мазгалин Д. В., Починский В. И. Метод определения азимута пуска и программы угла тангажа на атмосферном участке полета РН // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника». 2010. Вып. 12. N 22 (198). С. 47–50.

### TIME OPTIMAL CONTROL IN A PROBLEM OF LAUNCHER INJECTION

I. N. Kandoba<sup>1</sup>, I. V. Kozmin<sup>1</sup>,  
A. B. Lozhnikov<sup>1</sup>, V. I. Pochinskii<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Scientific and Production Association of Automatics named after Academician N.A.Semikhatov, Ekaterinburg, Russia  
E-mail: kandoba@imm.uran.ru

Questions of optimal control construction in a problem of injecting a rocket carrier (a launcher) into a given circumglobal elliptic orbit are considered. An optimization problem consists in designing a program control for launcher that provides the maximal value of the payload mass led to the given orbit. The motion of the launcher is described by a nonlinear dynamic system. There are some additional

requirements on a desired control and they generate constraints on the phase state of the dynamic system.

In the framework of the mathematical model of the problem of maximizing the payload mass led to the orbit is equivalent to the optimal time problem with terminal constraints [1]. The realization of common approaches to this problem solution is connected with essential computational difficulties. An algorithm for approximate solving of this problem is developed in [2]. This algorithm is based on the original problem decomposition to several optimal control problems. Here, the quasi-optimal control is a result of specialized iterative procedure.

The approaches to solving some optimal time problems with phase constraints are discussed. The modifications of the mentioned above quasi-optimal control are assumed to be a basis of these approaches. The main attention is given to ways of supporting the landing of launcher's detachable parts in given regions. Results of some numerical experiment with the use of real data are presented.

The work was performed in the framework of Programs for basic research of the Presidium of RAS "Dynamic systems and control theory" under support by the Ural Branch of RAS (project 12-P-1-1022), (project 13-1-012-NPO), "Information control and intellectual technologies and systems" (project 12-P-1-1023).

### References

1. T. D. Dumsheva, V. B. Kostousov, E. K. Kostousova, V. I. Pochinskii. On a problem of optimal putting a payload into a given elliptic orbit // Proceedings of Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS, 2010. V. 16. № 5. p. 57–65.
2. D. V. Mazgalin, V. I. Pochinsky. The method of determining the azimuth of the start and the tangage angle program on the active site of atmospheric flight of rocket launcher // Vestnik SUSU. Series "Computer technologies, control and radio electronics". 2010. issue 12. No 22 (198). p. 47–50.

---

6-28

### ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ТЕЧЕНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ В КОЛЬЦЕВЫХ СОПЛАХ

А. Л. Карташев, М. А. Карташева

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

E-mail: al\_kartashev@mail.ru

Важной особенностью течений многокомпонентных сред в кольцевых соплах является осаждение частиц конденсированной фазы на центральное тело и внешнюю обечайку сопла, что приводит к снижению тяги вследствие потери импульса частицами, осаждающимися на стенки сопла («импульс осаждения частиц» – частицы «прилипают» к стенкам сопла и передают им свой импульс полностью).

Для оценки величины потерь тяги в кольцевом сопле смешанного расширения проведено математическое моделирование процесса осаждения частиц конденсированной фазы на центральное тело и внешнюю обечайку сопла. Исследованы траектории движения частиц полидисперсной конденсированной фазы

в условиях сложной геометрической конфигурации и значительных градиентов газодинамических параметров.

Форма траекторий частиц конденсированной фазы в многокомпонентном потоке существенно зависит от размера частиц. Предельные траектории частиц, определяющие место выпадения частиц на стенки сопла, таковы, что каждая фракция имеет свою область осаждения.

Исследованы величины потерь тяги вследствие наличия в потоке конденсированной фазы в зависимости от массовой доли конденсированной фазы. Получены значения импульса осаждения частиц конденсированной фазы  $J_{pr}$  на центральное тело и внешнюю обечайку сопла.

Результаты численного моделирования показали, что для исследованной конфигурации кольцевого сопла характерно большее осаждение частиц на центральное тело, при этом величина потери тяги в сечении  $x = 0,4$  составила  $\sim 20,1\%$  от общей величины импульса осаждения на центральное тело кольцевого сопла. Осаждение частиц на обечайку было гораздо меньшим, происходило несколько дальше по тракту сопла, величина потери тяги в сечении  $x = 0,8$  составила  $\sim 7,2\%$  от общей величины импульса осаждения на внешнюю обечайку кольцевого сопла.

При этом импульс осаждения на внешнюю обечайку составляет  $\sim 5,3\%$ , на центральное тело  $\sim 8,4\%$  от суммарного импульса потока. Общие потери импульса составляют  $\sim 13,7\%$ , причем основные потери ( $\sim 90\%$ ) приходятся на сверхзвуковую часть сопла, где частицы уже имеют значительную скорость.

#### RESEARCH OF DEPOSITION OF PARTICLES IN CASE OF FLOW OF MULTICOMPONENT MEDIA IN AN ANNULAR NOZZLES

A. L. Kartashev, M. A. Kartasheva

South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: al\_kartashev@mail.ru

An important feature of flows of multicomponent mediums in an annular nozzle is condensed phase particle deposition on the central body and an external shell of the nozzle, which reduces the thrust due to the loss of impulse particles deposited on the wall of the nozzle («impulse of particle deposition» – the particle «stick» to the walls nozzle and transmit them to their impulse completely).

To estimate the loss of thrust in an annular nozzle of the mixed extension mathematical modeling of the deposition of particles of condensed phase at the central body and an outer shell of the nozzle is carried out. The paths of motion of particles of polydisperse condensed phase in a complex geometric configuration and significant gradients of gas-dynamic parameters are researched.

The shape of particle paths of condensed phase in multicomponent flow essentially depends on particle size. The limit paths of particles defining a place of drop-out of particles on the wall of a nozzle are such that each fraction has its own area of deposition.

The loss values due to the presence of condensed phase in flow depending on the mass fraction of condensed phase

are researched. The values of the impulse of particle deposition of condensed phase  $J_{pr}$  on central body and an external shall of the nozzle are received.

Numerical modeling results showed that for the researched configuration of an annular nozzle greater deposition of particles on the central body is characteristic, thus value of loss of thrust in the section  $x = 0.4$  make up  $\sim 20.1\%$  of the total value of impulse deposition on the central body of an annular nozzle. Deposition of particles on a shell was much smaller, there was a little further on a nozzle path, value loss of thrust in the section  $x = 0.8$  make up  $\sim 7.2\%$  of the total value of impulse deposition on external shell of an annular nozzle.

At the same time impulses of deposition on external shell make up  $\sim 5.3\%$ , on the central body make up  $\sim 8.4\%$  of the total impulse of flow. Total loss of impulse make up  $\sim 13.7\%$ , at that main losses ( $\sim 90\%$ ) fall on the supersonic part of the nozzle, where the particles already have the considerable velocity.

6-29

#### ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ (РАСШИРЕНИИ) СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ ИЗ НЕСЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ. ЗАДАЧА ЗАБАБАХИНА

А. Б. Киселев

Механико-математический факультет МГУ  
имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

ВНИИ автоматики имени Н. Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: akis2006@yandex.ru

В работе получено точное решение одномерной динамической задачи о сжатии (расширении) сферического слоя из несжимаемой вязкой жидкости, движение которого в начальный момент времени отсутствует, а на внешней и внутренней его поверхностях действуют произвольным образом зависящие от времени давления. Решение получено в лагранжевых переменных.

В случае, когда внешняя граница удаляется в бесконечность и давление там постоянно, а давление внутри полости (пузырька) отсутствует (задача Забабахина: Забабахин Е. И. Заполнение пузырьков в вязкой жидкости // ПММ. 1961. Т. 24, вып. 6. С. 1129–1131), показано, что при любом начальном радиусе пузырька его заполнение жидкостью всегда происходит за конечное время, причем, при стремлении радиуса пузырька к нулю время его схлопывания стремится к конечной величине, зависящей только от отношения динамической вязкости жидкости и давления на бесконечности. Скорость заполнения малых пузырьков стремится к нулю.



**EXACT SOLUTION TO THE PROBLEM  
ON DYNAMIC COMPRESSION (EXPANSION)  
OF SPHERICAL LAYER  
OF INCOMPRESSIBLE VISCOUS FLUID.  
ZABABAKHIN'S PROBLEM**

A. B. Kiselev

Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow  
State University, Moscow, Russia

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: akis2006@yandex.ru

In the work, exact solution to the 1-D dynamic problem on compression (expansion) of a spherical layer of incompressible viscous fluid is obtained for the case when this spherical layer is motionless at the initial moment of time and its outer and inner surfaces are under pressures that arbitrarily depend on time. The solution is obtained in the Lagrangian variables.

In the case when the outer boundary is moving to the infinity and pressure therein is constant while pressure inside the void (bubble) is absent (Zababakhin's problem: E. I. Zababakhin Filling of bubbles in a viscous fluid // PMM 1961. V. 24 (6) pp. 1129–1131), it was shown that with any initial radius of the bubble, time for its filling with fluid is always finite. And as the bubble radius tends to zero, the bubble collapse time tends to a finite value that depends only on "dynamic fluid viscosity – pressure" ratio at infinity. Filling speed of small bubbles tends to zero.

---

6-30

**ЭФФЕКТИВНАЯ ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ  
РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШАТЕЛЕЙ МЕХАНИКИ  
СПЛОШНЫХ СРЕД ДЛЯ СИСТЕМ ГИБРИДНОЙ  
АРХИТЕКТУРЫ**

М. И. Климов, И. С. Меньшов

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

В работе предлагается подход к построению параллельных программных решателей для задач механики сплошных сред в рамках различных математических и физических моделей. Сочетание двух уровней параллелизма: на уровне декомпозиции области и поэлементный параллелизм, позволяет добиться высокой эффективности на современных вычислительных комплексах, в том числе и с использованием графических карт. Для обеспечения корректности расчета в многопоточной среде применяется алгоритм раскраски сетки, позволяющий избежать ненужных блокировок и коллизий данных. В качестве основных инструментов параллельного программирования в работе используются CUDA и MPI.

Предлагаемый подход охватывает множество различных численных моделей механики сплошных сред, опираясь лишь на некоторые общие их характеристики. Поэтому данный подход был реализован в качестве прикладной программной библиотеки, на базе которой

были имплементированы несколько конкретных решателей, таких как решатель для многокомпонентной среды и газодинамический решатель. В заключительной части доклада будут представлены результаты расчетов нескольких задач с использованием различных решателей. Также будут показаны результаты эффективности и производительности параллельной реализации и проведен их краткий анализ.

**EFFECTIVE PARALLEL IMPLEMENTATION  
OF THE CONTINUUM MECHANICS SOLVERS  
FOR HYBRID ARCHITECTURE SYSTEMS**

M. I. Klimov, I. S. Menshov

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

In this paper, the approach is offered to design parallel code solvers for continuum mechanics problems in terms of various mathematical and physical models. Combination of two levels of parallelism, i.e. area decomposition level and element-by-element parallelism, makes it possible to have high effectiveness on modern computer systems including the case with graphics cards. To ensure calculation correctness in the multithreading environment, the grid coloring algorithm is used to avoid data interlocks and collisions. CUDA and MPI are used as the main instruments for parallel programming.

The proposed approach comprises many various numerical models for continuum mechanics basing on certain common features of these models only. Thus, this approach was implemented as an application library that served the basis for implementation of several solvers such as the solver for multithreading environment and the gas-dynamic solver. The concluding part of the report presents computational results of several problems using various solvers. Effectiveness of this parallel implementation is demonstrated and its results are briefly analyzed.

---

6-31

**ОБ ОДНОЙ МОДИФИКАЦИИ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
«ЗАМОРОЖЕННОЙ» ГАЗОВЗВЕСИ**

Н. Л. Клиначева, Ю. М. Ковалев, В. Ф. Куропатенко

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

E-mail: klinachevsv@is74.ru

Успешное использование взрывных процессов в ряде отраслей современной техники тесно связано с решением вопросов обеспечения мер безопасности, защиты инженерных сооружений и технологического оборудования от действия ударных волн (УВ). Перспективными выглядят экранирующие слои или завесы из пены и аэровзвесей [1]. В связи с этим важное прикладное значение представляет изучение проблемы локализации механических эффектов взрыва и ослабления УВ с помощью математического моделирования данных физических процессов.

Поэтому с особой остротой встает проблема разработка математических моделей многокомпонентных гетерогенных сред [2], адекватных тем физическим процессам, которые они пытаются описывать.

В работе [3] проведен анализ математической модели «замороженной» газозвеси [4], которая активно используется при анализе затухания ударных волн в гетерогенных средах. Оказалось, что не инвариантность относительно преобразования Галилея уравнений из [4] приводит к появлению дополнительного источника энергии, связанного с движением системы координат. Этот источник энергии не имеет физической природы и приводит к нарушению второго закона термодинамики.

В настоящей работе предложена модификация изложенной в [4] математической модели «замороженной» газозвеси, проведены расчеты затухания ударной волны в системе защитных решеток и приведено сравнение с результатами из [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 13-01-00072.

### Литература

1. Ковалев Ю. М. Ослабление воздушных ударных волн системой решеток / Ю. М. Ковалев, А. Ю. Черемохов // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Математическое моделирование физических процессов». – 1997. – вып. 3. – С. 39–43.
2. Куропатенко В. Ф. Новые модели механики сплошных сред / В. Ф. Куропатенко // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, № 1. – С. 74–92.
3. Ковалев Ю. М. Анализ инвариантности относительно преобразования Галилея некоторых моделей математических многокомпонентных сред / Ю. М. Ковалев, В. Ф. Куропатенко // Вестник ЮУрГУ, серия Математическое моделирование и программирование. – 2012. – № 27. – С. 69–73.
4. Кругликов Б. С. Ослабление воздушных ударных волн экранирующими решетками / Б. С. Кругликов, А. Г. Кутушев // Физика горения и взрыва. – 1988. – № 1. – С. 115–117.

### ABOUT ONE MODIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE «FROZEN» GAS SUSPENSION

N. L. Klinacheva, Yu. M. Kovalev, V. F. Kuropatenko

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia  
E-mail: klinachevsv@is74.ru

Successful use of explosive processes in many branches of modern technology is closely linked with questions of security measures, protection of engineering and technological equipment from the action of shock waves. Look promising shielding layers or curtain of foam and air-suspensions [1]. In this regard, an important practical significance to study the problem of localization of mechanical effects of the explosion and shock waves attenuation by means of mathematical modeling of physical processes data.

Therefore, there is a problem particularly acute development of mathematical models of multi component heterogeneous mediums [2], adequate physical processes so that they are trying to describe.

In [3] the analysis of the mathematical model of «frozen» gas suspension [4], which is widely used in the analysis of shock wave attenuation in heterogeneous environments. It

turned out that not invariant under a Galilean transformation equations of [4] leads to an additional source of energy associated with the motion of the coordinate system. This source of energy is not the physical nature and leads to a violation of the second law of thermodynamics.

In this paper we propose a modification described in [4], a mathematical model of «frozen» gas suspension, the calculations of the damping of the shock wave in the grilles and provides a comparison with the results of [4].

This work was supported by RFBR grant № 13-01-00072.

### References

1. Kovalev Yu. M. Weakening of air shock waves system lattices / Yu. M. Kovalev, A. Yu. Cheremohov // Problems of Atomic Science and Technology. Series «Mathematical modeling of physical processes». – 1997. – Issue. 3. – S. 39–43.
2. Kuropatenko V. F. New models of continuum mechanics / V. F. Kuropatenko // Engineering – Journal of Physics. – 2011. – T. 84, № 1. – S. 74–92.
3. Kovalev Yu. M. Analysis of invariance under Galilean transformations of some mathematical models of multicomponent media / Yu. M. Kovalev, V. F. Kuropatenko // Bulletin of South Ural State University series Mathematical modeling and programming. – 2012. – № 27. – P. 69–73.
4. Kruglikov B. S. The Weakening of shock waves by screening grates / B. S. Kruglikov, A. G. Kutushev // Physics of combustion and explosion. – 1988. – № 1. – S. 115–117.

6-32

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ, ОСНОВАННОЙ НА АЛГЕБРАИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

С. В. Кольчугин, Н. А. Березина,  
В. В. Власов, А. Б. Коновалов

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

В малоракурсной томографии, ввиду сильной недостаточности данных, на томограммах объектов с высокочастотными структурами появляются полосовые артефакты. Одним из подходов к компенсации таких артефактов является применение методов дискретной томографии [1], использующей априорную информацию о значениях реконструируемой функции объекта.

В докладе исследован оригинальный итерационный алгоритм дискретной томографии, предназначенный для использования в условиях очень ограниченного числа проекций. Алгоритм базируется на известном мультипликативном алгебраическом алгоритме MART [2]. Суть нового алгоритма, названного нами MART-AP [3], в организации цикла «внешних» итераций, на каждой из которых поправки в изображение вводятся с использованием MART и синтезируемых масок изображения, позволяющих вносить в алгоритм априорную информацию. Алгоритм MART-AP реализован на C++ для реконструкции 2D изображений в последовательном режиме и для реконструкции 3D изображений в параллельном режиме с использованием библиотеки MPI.

Представлены результаты численного эксперимента по реконструкции 2D и 3D тестовых фантомов. Показано, что предложенный алгоритм позволяет практически полностью избавиться от полосовых артефактов, характерных для томограмм, восстанавливаемых в условиях сильной недостаточности данных.

### Литература

1. Discrete tomography: foundations, algorithms, and applications / ed. G. T. Herman, A. Kuba. Boston, Birkhauses, 1999.
2. R. Gordon, R. Bender, and G. T. Herman. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography // *J. Theor. Biol.*, V. 29, P. 471–481 (1970).
3. V. V. Vlasov, A. B. Konovalov and A. S. Uglov. An a priori information based algorithm for artifact preventive reconstruction in few-view computed tomography // *Proc. 5th Int. Symp. Communication, Control and Signal Processing, ISCCSP 2012, Roma, Italy, 2–4 May 2012.*

### THE USE OF A PRIORI INFORMATION IN FEW-VIEWS COMPUTED TOMOGRAPHY BASED ON THE ALGEBRAIC RECONSTRUCTION TECHNIQUE

S. V. Kolchugin, N. A. Berezina,  
V. V. Vlasov, and A. B. Konovalov

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

The strong incompleteness of data in few-views computed tomography causes streak-like artifacts on tomograms if the object has high-frequency structures. One of approaches for removing such artifacts is to apply the methods of discrete tomography [1], which use a priori information on the values of the object function to be reconstructed.

The paper studies an original iterative algorithm for discrete tomography when a very limited number of projections are registered. The algorithm is based on the well-known multiplicative algebraic reconstruction technique (MART) [2]. The new algorithm we called MART-AP [3] organizes a cycle of «external» iterations where the image is corrected at each iteration, using the MART and an image mask synthesized with the help of a priori information. The MART-AP algorithm is implemented in C++ medium for 2D reconstruction in a serial mode and for 3D reconstruction in a parallel mode with the help of MPI library, respectively.

We present the results of the numerical experiment on reconstruction of 2D and 3D test phantoms. It is shown, that the algorithm proposed helps completely remove streak-like artifacts usually present on the tomograms reconstructed in conditions of strongly incomplete data.

### References

1. Discrete tomography: foundations, algorithms, and applications / ed. G. T. Herman, A. Kuba. Boston, Birkhauses, 1999.
2. R. Gordon, R. Bender, and G. T. Herman. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography // *J. Theor. Biol.*, V. 29, P. 471–481 (1970).
3. V. V. Vlasov, A. B. Konovalov and A. S. Uglov. An a priori information based algorithm for artifact preventive reconstruction

in few-view computed tomography // *Proc. 5th Int. Symp. Communication, Control and Signal Processing, ISCCSP 2012, Roma, Italy, 2–4 May 2012.*

6-33

### ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ШУМА ТОМОГРАФА С МЕГАЭЛЕКТРОНВОЛЬТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

А. Б. Коновалов, В. В. Власов

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

Для контроля методами рентгенографии внутренней структуры объектов, имеющих размеры 200–250 мм и содержащих вещества с большим атомным номером, необходим источник с энергией электронов не менее нескольких мегаэлектронвольт. При этом предъявляются жесткие требования к точности воспроизведения структур: как правило, требуется обеспечить разрешение деталей размером 50–100 мкм и менее. В настоящей работе выполнены оценки оптимальных геометрических параметров, а также допустимого уровня квантового шума рентгеновского томографа, удовлетворяющего указанным требованиям.

Для получения теоретических оценок пространственного разрешения томографа развита модель линейного фильтра, инвариантного к пространственному сдвигу [1, 2]. Выведены оригинальные аналитические соотношения для функции рассеяния точки и модуляционной передаточной функции системы. С целью оценки допустимого уровня шума на томографическом изображении получены выражения для корреляционной функции шума и спектральной плотности мощности шума. Точность воспроизведения структур с учетом шума на изображении оценивается с помощью характеристики «деталь-контраст». Показано, что в случае, когда размер фокального пятна источника на порядок и более превышает требуемую точность воспроизведения структур, коэффициент увеличения рентгено-оптического тракта следует выбирать в пределах 1,05–1,15. При этом пространственное разрешение  $\gamma$  томографа с оптимальными параметрами связано с собственным разрешением системы регистрации а простым эмпирическим соотношением  $r = 2a/3$ . Согласно полученным оценкам допустимый уровень квантового шума для системы, обеспечивающей разрешение 100 мкм, составляет 0,5%, а для томографа с разрешением 50 мкм – 0,25%.

Полученные теоретические результаты подтверждены численным экспериментом по реконструкции тестовых фантомов.

### Литература

1. Metz C. E., Doi K. Transfer function analysis of radiographic imaging systems // *Phys. Med. Biol.* – 1979. – V. 24. – P. 1079–1106.
2. Konovalov A. B., Vlasov V. V. Spatial resolution analysis for few-views discrete tomography based on MART-AP algorithm // *ISRN Sign. Process.* – 2013. – Article ID 356291. – 7 pages.

**ESTIMATING THE GEOMETRICAL  
PARAMETERS AND PERMISSIBLE NOISE LEVEL  
FOR MEGA-ELECTRON-VOLT ELECTRON BEAM  
TOMOGRAPHY**

A. B. Konovalov, V. V. Vlasov

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

For the X-ray radiography control of the internal structure of objects which are about 200–250 millimeters in size and contain material with high effective atomic numbers, we need a source with a mega-electron-volt electron beam. In this case, requirements for the accuracy of spatial structure reproduction are very rigorous. As a rule, the resolution of fine structures should be 50–100 micrometers and less. The paper estimates the optimal geometrical parameters and permissible quantum noise level of an X-ray tomograph that meets these requirements.

To obtain the theoretical estimates of its spatial resolution, we develop a model of a linear filter that is invariant to the spatial shift [1, 2]. We derive original analytical expressions for the point spread function and modulation transfer function of the system. To estimate the permissible level of noise on the tomographic image, we draw formulas for the noise autocorrelation function and the noise power spectrum. Structure reproduction accuracy subject to image noise is evaluated with the help of a contrast-detail curve. It is shown that the geometrical magnification factor of the system should be 1.05–1.15 when the size of the focal spot of the source is by order of magnitude greater than the structure reproduction accuracy required. Here the spatial resolution  $r$  of the tomograph with the optimal parameters depends on the proper resolution of the registration system in accordance with the simple empirical formula  $r = 2a/3$ . According to the estimates we obtained, the permissible level of quantum noise is close to 0.5% and 0.25% for systems with resolutions 100 and 50 micrometers, respectively.

Our theoretical results are verified by numerical experiment on the reconstruction of test phantoms.

**References**

1. Metz C. E., Doi K. Transfer function analysis of radiographic imaging systems // *Phys. Med. Biol.* – 1979. – V. 24. – P. 1079–1106.
2. Konovalov A. B., Vlasov V. V. Spatial resolution analysis for few-views discrete tomography based on MART-AP algorithm // *ISRN Sign. Process.* – 2013. – Article ID 356291. – 7 pages.

6-34

**ДВУМЕРНАЯ ЗАДАЧА О РАСПРОСТРАНЕНИИ  
ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ  
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МЕТОДИК**

А. А. Краюхин, В. Ю. Колобянин, Ю. В. Янилкин

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

В работе предложена двумерная задача для верификации блока расчета тензора напряжений в численной методике. Данная задача имеет аналитическое решение для скорости распространения продольных волн в упругих изотропных средах различной конфигурации: неограниченной среде, тонкой пластине и тонком стержне при продольном ударе. С помощью кода ЭГАК [1] проведено численное моделирование этой задачи на эйлеровой сетке с исследованием на сходимость результатов расчетов при измельчении счетной сетки. Рассмотрены случаи как наличия, так и отсутствия смешанных ячеек вдоль боковой границы области, в которой распространяется упругая волна. В первом случае результатов расчетов совпадают с теорией. Для второго случая изучен вопрос влияния реализованных в коде ЭГАК условий замыкания для смешанных ячеек (методов разделения дивергенции ячейки между компонентами) на скорость распространения продольной волны в цилиндрической оболочке. Отметим, что для упругопластики в коде ЭГАК в качестве замыкающих соотношений в смешанных ячейках используются условия замыкания для газодинамики, обобщенные для девиатора скорости деформаций. Рассмотрены следующие условия замыкания: равенство приращений давлений компонентов, равенство дивергенций компонентов и равенство скоростей компонентов, а также специальное условие замыкания для вакуума. В работе показано, что на скорость распространения продольной волны в цилиндрической оболочке сильное влияние оказывает наличие или отсутствие смешанных ячеек на боковой поверхности оболочки. В случае наличия смешанных ячеек при использовании некоторых условий замыкания имеется большая погрешность в скорости распространения упругой волны по оболочке. Причем величина этой погрешности коррелирует с относительным объемом материала оболочки, находящегося в смешанных ячейках.

**Литература**

1. Янилкин Ю. В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физических процессов*, 2003. Вып.1. С. 20–28.

## A TWO-DIMENSIONAL TRAVELING LONGITUDINAL WAVE PROBLEM FOR VERIFICATION OF ELASTOPLASTIC TECHNIQUES

A. A. Krayukhin, V. Yu. Kolobyanin, Yu. V. Yanilkin

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

E-mail: krayukhin@list.ru

We propose a two-dimensional problem for the verification of the stress tensor computational module in codes. This problem has an analytical solution for the velocity of longitudinal waves in elastic isotropic materials in various configurations: unbounded matter, thin plate and thin rod driven by a longitudinal impact. Numerical modeling of the problem was done using the EGAK code [1] on an Eulerian mesh with analysis of convergence with increase in mesh resolution. We consider cases both with mixed cells and without mixed cells along the side boundary of the region with a traveling elastic wave. In the first case, the simulated results match the theory. For the second case, we explore the effect of EGAK's closure conditions for mixed cells (cell divergence distribution between materials) on the velocity of a longitudinal wave in a cylindrical shell. Note that as a closure model for mixed cells in the elastoplastic case EGAK employs the closure conditions for hydrodynamics extended to the strain rate deviator. The following closure conditions are considered: equality of materials pressure increments, equality of materials divergences, equality of materials velocities, and a special closure condition for vacuum. We prove that the presence or absence of mixed cells on the side surface of a shell has a significant impact on the velocity of a longitudinal wave in a cylindrical shell. In the presence of mixed cells, some closure conditions give a large error in the velocity of an elastic wave in a shell. Note that the value of this error correlates with the relative volume of the shell material present in mixed cells.

### References

1. Yanilkin Yu.V. et al. The EGAK++ software package for modeling on adaptively refined meshes // VANT. Ser. Mathematical Modeling of Physical Processes. 2003. Issue 1. Pp. 20–28 (in Russian).

6-35

## ВАРИАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР БЛОЧНЫХ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК ВОКРУГ ТЕЛ С РУЛЯМИ И КРЫЛЬЯМИ

А. И. Белокрыс-Федотов<sup>1,2</sup>, В. А. Гаранжа<sup>1,2</sup>,  
Д. А. Забарко<sup>3</sup>, В. П. Котенев<sup>3</sup>, Л. Н. Кудрявцева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт  
(государственный университет), Москва, Россия

<sup>3</sup>ВПК «Научно-производственное объединение  
машиностроения», Реутов, Россия

Построение почти регулярных трехмерных расчетных сеток для расчетов высокоскоростного обтекания тел сложной формы в рамках модели уравнений Навье-Стокса вязкого газа является достаточно непростой задачей. Наиболее точные результаты при этом удается получать с использованием криволинейных блочно-структурированных сеток. Современные коммерческие построители сеток требуют больших затрат времени для ручного или полуавтоматического построения блочно-структурированных сеток. На практике число блоков в сетках редко бывает ниже нескольких сотен и может достигать нескольких тысяч.

Для полуавтоматического построения блочных криволинейных сеток вокруг протяженных тел с рулями и крыльями реализован крупноблочный алгоритм, основанный на вариационном методе. Входными данными для алгоритма является геометрическая модель в формате *step*, и параметры, задающие примерную нарезку сетки на блоки и число ячеек в блоках. В алгоритме реализованы различные типы расчетных сеток для блоков: а) аналитические, которые строятся посредством алгебраических методов; б) сетки, основанные на плоских сечениях; при этом в каждом сечении для построения сеток используется вариационный метод, в) общие трехмерные сетки, которые строятся с использованием вариационного метода, разработанного в ВЦ РАН. Вариационный метод гарантирует, что криволинейные сетки ортогональны у поверхности тела. При этом сетку около острых ребер или поверхностных элементов с большой кривизной можно строить без их явного выделения. Для этого используется специальная адаптация сеток к зонам высокой кривизны и к острым ребрам, которая позволяет разрешить зоны анизотропной кривизны без существенного скашивания ячеек. В общем случае такой подход может приводить к «перетеканию» ячеек сетки через острые ребра, которое в задачах обтекания, конечно, является нежелательным, однако точность расчетов на получаемых сетках остается приемлемой. Учитывая, что характерное время построения сетки для тел достаточно сложной формы при этом оказывается в диапазоне от нескольких минут до нескольких часов, а большинство положительных свойств блочных сеток, таких, как ортогональность вблизи границ, гладкость и регулярность, сохраняются, можно утверждать, что предложенный алгоритм является конкурентноспособным в классе задач.

**VARIATION GENERATOR OF BLOCK  
CALCULATION MESHES AROUND BODIES  
WITH VANES AND WINGS**

A. I. Belokrysov<sup>1,2</sup>, V. A. Garanzha<sup>1,2</sup>,  
D. A. Zabarko<sup>3</sup>, V. P. Kotenev<sup>3</sup>, L. N. Kudryavtseva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Dorodnitsyn Computation Center RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
Moscow, Russia

<sup>3</sup>JSC "Production Association Machine Building", Reutov,  
Russia

Building of almost regular 3D calculation meshes for high-speed flow-around of the bodies with complicated shape in the frames of Navie-Stokes equation of viscous gas is rather a difficult problem. The most accurate results are obtained using curvilinear block-structured meshes. Up-to-date commercial mesh builders require great expenses of time for manual or semi-automated building of block-structured meshes. In practice, the number of blocks in meshes rarely is less than several hundreds and can achieve several thousands.

For semi-automated building of curvilinear block-structured meshes around stretched bodies with vanes and wings, we realized large-block algorithm based on variation method. Input information for the algorithm is a geometric model in step format, and parameters specifying approximate mesh division into blocks, and the number of the cells in blocks. This algorithm realized various types of calculation meshes for blocks: a) analytical, which are built via algebraic methods; b) meshes based on flat sections, c) general 3D meshes, which are built using variation method developed in Computation Center RAS. Variation method guarantees that curvilinear meshes are orthogonal near the body surface. Near sharp ribs or surface elements with high curvature, the meshes can be built without their explicit determination. For this purpose, we use special adaptation of meshes to the zones with high curvature and to the sharp ribs. This will permit to have anisotropic curvature zones without sufficient sloping of the cells. In general case, such approach can lead to cell "flowing" over the sharp ribs. In flow-around problems, this is undesirable; however accuracy of calculations on obtained meshes remains acceptable. Taking into account that typical time of a mesh building for the bodies with complicated shape is in the range from several minutes up to several hours, and the majority of positive properties of block meshes, such as orthogonality near the boundaries, smoothness and regularity are preserved, it is possible to say that proposed algorithm is competitive in this class of problems.

6-36

**КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ  
В ЗАДАЧЕ МАЛЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ  
КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ УПРУГИХ ПЛАСТИН**

А. А. Кулешов

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

E-mail: andrew\_kuleshov@mail.ru

Рассматривается задача о малых поперечных колебаниях тонкой упругой пластины. Уравнение упругих колебаний изотропной пластины переменной толщины  $h(x, y)$ , лежащей на упругом (винклеровском) основании, имеет вид

$$\rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \Delta(D\Delta W) - (1 - \sigma) \times \\ \times (D_{yy}W_{xx} - 2D_{xy}W_{xy} + D_{xx}W_{yy}) + aW = F, \quad (x, y) \in \Omega, \quad (1)$$

где  $W(x, y, t)$  – поперечное отклонение пластины, отсчитываемые по оси  $z$ ,  $\rho$  – плотность материала пластины,  $D = Eh^3 / [12(1 - \sigma^2)]$  – цилиндрическая жесткость пластины,  $E$  – модуль упругости,  $\sigma$  – коэффициент Пуассона материала пластины,  $F$  – внешняя сила, заданная на поверхности пластины. На криволинейном контуре пластины заданы общие (обобщенные по Кирхгоффу) граничные условия: изгибающий момент и перерезывающая сила. Начальные условия:  $W|_{t=0} = \varphi(x, y)$ ,  $W_t|_{t=0} = \psi(x, y)$ .

Конечно-разностная аппроксимация уравнения (1) с использованием трехслойной разностной схемы, будет иметь многоточечный шаблон и ее численная реализация будет сложна. В нашем подходе [1] к построению разностной аппроксимации задачи исходное уравнение, имеющее второй порядок по времени, заменяется системой уравнений первого порядка по времени и эта система аппроксимирована двухслойной разностной схемой. Предложенная схема более удобна для численного решения задачи, чем трехслойная схема.

**Литература**

1. Кулешов А.А. О разностной аппроксимации задачи поперечных колебаний тонких упругих пластин // ЖВМ и МФ, 2005. Т. 45. № 4. С. 718–740.

**FINITE-DIFFERENCE APPROXIMATION  
FOR THE PROBLEM OF SMALL BENDING  
VIBRATIONS IN THIN ELASTIC PLATES**

A. A. Kuleshov

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow,  
Russia

E-mail: andrew\_kuleshov@mail.ru

The problem of small bending vibrations occurring in a thin elastic plate is considered. The equation of elastic vibrations of a thin isotropic plate of variable thickness  $h(x, y)$  lying on an elastic (Winkler) foundation has the form:

$$\rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \Delta(D\Delta W) - (1 - \sigma) \times \\ \times (D_{yy}W_{xx} - 2D_{xy}W_{xy} + D_{xx}W_{yy}) + aW = F, \quad (x, y) \in \Omega, \quad (1)$$

where  $W(x, y, t)$  is the plate deflections which is measured along the  $z$  axis,  $\rho$  is the density of the plate material,  $D = Eh^3/[12(1 - \sigma^2)]$  is the cylindrical stiffness of the plate,  $E$  is the modulus of elasticity,  $\sigma$  is Poisson's ratio of the plate material,  $F$  is the external force given on a surface of a plate. On the curvilinear contour of a plate general (Kirchhoff-generalized) conditions: the bending moment and the vertical shearing force are given. The initial conditions:  $W|_{t=0} = \varphi(x, y)$ ,  $W_t|_{t=0} = \psi(x, y)$ .

A finite-difference approximation to the equation (1) based on a three-level difference scheme will have a multi-point stencil and its numerical implementation will be complicated. In our approach [1] to construction of difference approximation of the problem, we replace the original equation with second order on time, by a system of equations with first order on time and approximation of this system with the two-level difference scheme. This scheme is more convenient for the numerical solution of the problem, than the three-layer scheme.

#### References

1. Kuleshov A.A. Difference approximation of the problem of bending vibrations of a thin elastic plate // Comput. Math. and Math. Phys., 2005. Vol. 45. No. 4. PP. 694–715.

6-37

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗАЩИТНЫХ СЛОЕВ СИСТЕМЫ ТОПЛИВО – ОБОЛОЧКА В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Е. И. Курбатова, А. И. Ксенофонтов, В. М. Демин

Национальный исследовательский ядерный университет  
НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

E-mail: elkur@km.ru

Материал оболочки, работая в системе с ядерным топливом, подвергается температурным, радиационным и физико-механическим воздействиям, вследствие чего в нем образуются микродефекты и трещины, приводящие к возникновению аварийных ситуаций [1].

С целью развития аспектов безопасности в работе рассматриваются вопросы влияния углерода на механизм формирования защитных слоев в стальных материалах методом ионно-плазменных технологий, а также их свойства при температурах, близких к вне-реакторным испытаниям.

При формировании защитных слоев в качестве мишени в процессе облучения ионными пучками тугоплавких металлов использовали различные легированные стали [2].

В ходе моделирования и исследования получены следующие основные результаты:

- Разработано программное обеспечение для моделирования поверхностных процессов при облучении углеродистых сталей потоками низкотемпературной плазмы.
- Исследован фазовый состав и структура защитных зон, сформированных в сталях с различным содержанием углерода, выявлено его влияние на механизм этого процесса;
- Показано, что при использовании в качестве мишени углеродистой стали, защитные слои состоят преимущественно из карбидов металла ионного потока и ширина зон не превышает 1–2 мкм.
- Установлено, что при использовании в качестве мишени модельных легированных сталей состав защитных зон представлен карбидами сложного состава, их ширина достигает 4–6 мкм.
- Исследованы физико-механические свойства стальных модельных образцов с защитными слоями при температурах 20–1000 °С, показано, что наиболее высокими свойствами отличаются образцы, содержащие молибден и вольфрам.
- Приведены результаты испытаний образцов на разрыв и изгиб.
- Показана возможность управления реакциями формирования защитных поверхностных зон в углеродсодержащих материалах для повышения их эксплуатационных свойств.

#### Литература

1. В. А. Цыканов, О. А. Нечаева, Л. А. Егорова. Исследование поведения топлива легководных реакторов в аварийных условиях, 7-я Российская конференция по реакторному материаловедению, Димитровград, 2003, с. 81.
2. N. V. Pleshivtsev, A. I. Bazhin. Physics of Influence of Ionic Beams on Materials, Vyshaya shkola, Moscow, 1998, pp. 392.

### COMPUTER MODELING AND RESEARCH OF CARBON INFLUENCE ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF BLANKET OF FUEL SYSTEM – CAN DURING FORMATION AND OPERATION

E. I. Kurbatova, A. I. Ksenofontov, V. M. Dyomin

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

E-mail: elkur@km.ru

The material of can, working in the system with nuclear fuel, is exposed to temperature, radiation and physic mechanical influences in consequence of which the micro defects and cracks resulting in occurrence of emergencies are formed [1].

With the purpose of elaboration of safety aspects the questions of carbon influence on the mechanism of blanket formation in steel materials by the ionic-plasma technology method, as well as their properties at the temperatures near to out-of-pile experiment are considered in this work.

At the blanket formation as a target during the ionic beams of refractory metals irradiation the various alloyed steels were used [2].

During modeling and research are obtained the following basic results:

- The software for modeling of surface processes at the irradiation carbonaceous steels by streams cryogenic plasma was developed.
- The phase structure and structure of protective zones formed in steels with various carbon inclusions was researched, as well as its influence on the mechanism of this process.
- It was shown the blankets mainly consist of carbide metal of the ionic stream and the width of zones does not exceed 1–2 microns at use of the blankets as a target of carbonaceous steel.
- It was established the structure of protective zones at use of the blankets as a target modeling alloyed steels was presented the carbides of complex structure; their width reaches 4–6 microns.
- The physic mechanical properties of steel modeling samples with the blankets at temperatures of 20–1000 °C were investigated. It was shown, that the samples containing molybdenum and tungsten have the highest properties.
- The test data of samples on break and bend were resulted.
- The opportunity of management by formation reactions of protective surface zones in carbonaceous materials for increase of their operational properties was shown.

## References

1. V. A. Tsykanov, O. A. Nechaeva, L. A. Egorova. The Research of Fuel Light-Water-Moderated Reactor Behavior in Emergency, The 7-th Russian Conference on Reactor Materials Science, Dimitrovgrad, 2003, p. 81.
2. N. V. Pleshivtsev, A. I. Bazhin. Physics of Influence of Ionic Beams on Materials, Vyshaya shkola, Moscow, 1998, pp. 392.

6-38

### О ЯДЕРНОМ ГОРЕНИИ DD И P – B<sup>11</sup> В ГЛУБОКОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА В ВАКУУМНОМ РАЗРЯДЕ

Ю. К. Куриленков<sup>1</sup>, В. П. Тараканов<sup>1</sup>, С. Ю. Гуськов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный Институт Высоких Температур РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
Москва, Россия

E-mail: yukurilenkov@rambler.ru

Генерация быстрых ионов и DD нейтронов в межэлектродной среде наносекундного вакуумного разряда (НВР) малой энергии с дейтерий-содержащим Pd анодом были продемонстрированы ранее [1]. Чтобы лучше понять физику ядерного синтеза в условиях разряда было проведено детальное моделирование эксперимента методом частиц на основе электродинамического кода KARAT [2]. Динамика всех заряженных частиц была реконструирована в межэлектродном пространстве (анод-катод, А-К). Моделирование выявило принципиальная роль образования виртуального катода (ВК) и соответствующей ему квазистационарной по-

тенциальной ямы (ПЯ) глубиной 50–60 кВ. Ионы D<sup>+</sup> как удерживаются, так и ускоряются потенциальной ямой до энергий в десятки кэВ, а их встречные столкновения на оси разряда приводят к ядерному синтезу, сопровождающемуся нейтронным выходом (обзор эксперимента и результаты моделирования представлены в обзоре [3]). В частности, ионы D<sup>+</sup> могут совершать гармонические колебания в потенциальной яме, сопровождающиеся соответствующим пульсирующим (осциляторным) выходом DD нейтронов. Наблюдаемая в реальном и численном эксперименте частота осцилляций ионов (~80 MHz) [1, 2] примерно совпадает с экстраполяцией оценки частоты колебаний ионов, полученной ранее для схемы инерционного электростатического удержания (ИЭУ) с периодически осциллирующими плазменными сферами (ПОПС) [4]. В данной работе продолжен анализ экспериментов с НВР [1–3], и моделирование методом частиц особенностей процессов ядерного горения в потенциальной яме НВР. В частности, замкнутая электростатическая ловушка была рассмотрена для более высоких, чем ранее [1–3], значений приложенного напряжения (до 250 кВ) и разрядного тока (до 7 кА). Полученные результаты, в частности, указывают на возможность ядерного горения p-B<sup>11</sup> в НВР, если достаточно глубокая ПЯ (глубиной порядка 150–200 кВ) будет реализована в эксперименте. Расчетные значения энергий протонов и ионов бора, осциллирующих в такой ПЯ, оказываются достаточными для синтеза. Моменты совпадения коллапсов протонов и ионов бора на оси разряда (и на дне ПЯ) будут сопровождаться безнейтронным горением p-B<sup>11</sup> с выходом трёх быстрых альфа-частиц, что моделируется и в коде KARAT.

## Литература

1. Yu. K. Kurilenkov, M. Skowronek and J. Dufty. *J. Phys.A: Math & Gen* **39** 4375 (2006).
2. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, 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. J. Park, R. Nebel et al. *Physics of Plasmas* **12** (2005) 05631.

### ON DD AND P-B<sup>11</sup> NUCLEAR BURNING AT THE DEEP POTENTIAL WELL OF VIRTUAL CATHODE IN VACUUM DISCHARGE

Yu. K. Kurilenkov<sup>1</sup>, V. P. Tarakanov<sup>1</sup>, S. Yu. Gus'kov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for High Temperatures, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute, RAS, 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 (NVD) with deuterium-loaded Pd anode has been demonstrated earlier [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 quasistationary potential well (PW) formed in the interelectrode space are recognised. Deuterons  $D^+$  being trapped by this well are accelerating up to energies of few tens keV that provides DD nuclear synthesis under head-on deuteron collisions (experimental data and modelling results related are presented at [3]). In particular, ions in the potential well may undergo high frequency ( $\sim 80$  MHz) harmonic oscillations accompanied by a corresponding regime of oscillatory DD neutron yield. This value of high frequency ion oscillations observed coincides approximately with the extrapolation of expressions obtained for IECF scheme with periodic oscillating plasma spheres (POPS) [4]. At the present work, the analysis of experiments with NVD has been continued as well as PIC modeling of specifics of nuclear burning at potential well. The study of opportunity of burning for advanced fuel like p- $B^{11}$  at inertial electrostatic confinement fusion scheme based on vacuum discharge is started also. In particular, the close electrostatic well of virtual cathode have been considered for higher voltage applied (up to 250 kV) and discharge current (up to 7 kA). The results obtained are indicating on the possibility of nuclear burning p- $B^{11}$  at the vacuum discharge if the sufficiently deep PW ( $\sim 150$  kV) would be realized at the experiment. The energies calculated for protons and boron ions oscillating at PW are sufficient for nucleosynthesis at head-on ions collisions. Aneutronic burning of p- $B^{11}$  with the yield of three alpha particles (it is modeling by KARAT also) will taking place at the moments of coinciding of the collapses of protons and boron ions at the bottom of PW at discharge axis.

## References

1. Yu. K. Kurilenkov, M. Skowronek and J. Dufty. *J. Phys.A: Math & Gen* **39** 4375 (2006).
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. J. Park, R. Nebel et al. *Physics of Plasmas* **12** (2005) 05631.

6-39

## ДИНАМИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ХОЛОДНОГО ГАЗОВОГО ШАРА

В. Ф. Куропатенко<sup>1</sup>, Е. С. Шестаковская<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет), Челябинск,  
Россия

E-mail: v.f.kuropatenko@rambler.ru, leshest@list.ru

Представлено автомодельное решение задачи о динамическом сжатии холодного газового шара, находящегося в сферическом сосуде с непроницаемой стенкой. Под действием зависящего от времени наружного давления стенка движется с отрицательной скоростью. В отличие от решений Я. М. Каждана, К. В. Брушлин-

ского и Л. Д. Ландау коэффициент автомодельности определяется с помощью законов сохранения массы и энергии. Такой метод позволяет найти только один показатель автомодельности для любого заданного показателя адиабаты. Получены уравнения для ударной волны и для величин в области между ударной волной и границей шара, как функций времени и пространственной координаты.

## DYNAMIC COMPRESSION OF COLD GAS BALL

V. F. Kuropatenko<sup>1</sup>, E. C. Shestakovskaya<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>South Ural state University (state University), Chelyabinsk,  
Russia

E-mail: v.f.kuropatenko@rambler.ru, leshest@list.ru

Presented self-similar solution of the problem of dynamic compression of cold gas ball located in a spherical vessel with an impermeable wall. Under the influence of the time-dependent pressure of the outer wall moves to the negative velocity. Unlike solutions Ya. M. Kazhdan, K. V. Brushlinsky and L. D. Landau similarity coefficient is determined by the laws of conservation of mass and energy. This method allows finding only one self-similarity index for any given adiabatic index. The equations for the shock wave and for the values in the area between the shock wave and the boundary of the ball as a function of time and spatial coordinates.

6-40

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕКЛАРАТИВНО-МОДУЛЬНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И СОЗДАНИЯ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

В. К. Лысых, А. М. Чупрунов

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

В докладе рассмотрен декларативно-модульный подход для описания предметной области и создания графического интерфейса пользователя.

Задача любого приложения с пользовательским интерфейсом заключается в задании данных в формах и их сохранение во внутренних структурах данных с возможностью сохранения этих данных в долговременное хранилище. В выбранном нами подходе данные сохраняются в объектном дереве, которое повторяет структуру предметной области. Эта же структура используется в организации пользовательского интерфейса. При этом происходит отражение объектной модели предметной области в объектную модель пользовательского интерфейса. Такое отражение, как правило, невозможно без указания дополнительных данных и инструкций. Наше решение заключается, во-первых, в упаковке понятий предметной области в модули –

специальные блоки, для которых определены свои сложные правила отражения. Во-вторых, такие правила отражения выполняются на основе декларативных инструкций, внедренных в модули. Выделение правил и описание данных с помощью такой метаинформации позволило сохранить ясность представления и редактируемость данных для разработчика.

Данный подход позволяет с минимальными усилиями поддерживать актуальность предметной области и сократить время создания пользовательского интерфейса. Он успешно зарекомендовал себя при разработке реального приложения на языке C# с интерфейсом пользователя на основе графической системы Windows Presentation Foundation (WPF).

#### APPLICATION OF DECLARATIVE-MODULAR APPROACH FOR OBJECT DOMAIN DESCRIPTION AND USER GRAPHICAL INTERFACE DEVELOPMENT

V. K. Lisykh, A. M. Chuprunov

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

Declarative-modular approach for object domain description and user graphical interface development is considered.

Any application with a user interface is aimed to specify data in the Windows form and retain these data in the internal data structure with the option of saving them in a long-term storage. In our approach, the data are retained in the object tree that repeats the structure of the object domain. The same structure is used to organize the user interface. At that, the object model of the object domain is reflected into the object model of the user interface. This reflection is usually impossible without additional data and instructions. Our solution comprises, first, blocking of the object domain notions into modules, i.e. special blocks with complex reflection rules being determined for them. Second, these rules of reflection are executed on the basis of the declarative instructions introduced into the modules. Rules formulation and data description with the help of such meta-information allowed clarity of data presentation and data editability to be retained for developers.

This approach makes it possible to refine current status of the object domain with minimum efforts and to reduce time for user interface development. This approach was successfully implemented to develop a real application in C# language with the user interface based on Windows Presentation Foundation (WPF) graphical system.

6-41

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ УДАРНЫХ ВОЛН В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЛАХ

А. Е. Майер<sup>1</sup>, К. В. Хищенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: mayer@csu.ru

Пластические свойства твердых тел обычно считаются существенными только для ударных волн малой интенсивности, в то время как при моделировании сильных волн чаще всего используется гидродинамическое приближение. В то же время, существуют экспериментальные и теоретические данные [1] о том, что упругопластические свойства проявляют себя в тонких металлических фольгах даже для интенсивных волн сжатия. Причиной являются высокие скорости деформации, обуславливающие рост динамического предела текучести [2].

В настоящей работе на основе модели дислокационной пластичности [3] численно исследованы формирование и эволюция ударных волн, возникающих в металлах (алюминий, медь, никель) при ударе или нагружении с контролируемым ростом давления. Разработана численная схема без искусственной вязкости, но с учетом физической вязкости. Исследованы параметры высоко- и низкоэнтропийных слоев вещества вблизи нагружаемой поверхности.

После соударения тел упругий предвестник сначала всегда обгоняет фронт волны пластического сжатия, начальная скорость предвестника больше продольной скорости звука и скорости ударной волны. При продвижении от контактной границы между телами амплитуда и скорость упругого предвестника уменьшаются. Рассматриваются два возможных сценария дальнейшей эволюции ударно-волновой структуры в зависимости от соотношения между скоростью пластической волны сжатия и продольной скоростью звука.

Работа поддержана грантами Президента РФ (№ МД-286.2014 и НШ-6614.2014.2) и РФФИ (№ 14-08-00967). Авторы признательны А. А. Чарахчяну, В. Ф. Куропатенко, И. Р. Макеевой, М. Е. Поварницыну и А. Ю. Семенову за полезные обсуждения.

#### Литература

1. Inogamov N. A., Zhakhovsky V. V., Petrov Yu. V., et al. // *Contrib. Plasma Phys.* 2013. V. 53. P. 796.
2. Armstrong R. W., Zerilli F. J. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. V. 43. P. 492002.
3. Mayer A. E., Khishchenko K. V., Levashov P. R., Mayer P. N. // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 193508.

## NUMERICAL MODELING OF FORMATION OF STRUCTURE OF SHOCK WAVES IN ELASTIC-PLASTIC BODIES

A. E. Mayer<sup>1</sup>, K. V. Khishchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: mayer@csu.ru

Plasticity of solids is commonly considered as important only at low intensity of shock waves, while hydrodynamic approximation is used for strong waves. Meanwhile, there are experimental and theoretical evidences [1] that the elastic-plastic properties reveal themselves in thin metal foils even for intense compression waves. The reason is high strain rates leading to increase of the dynamical yield strength [2].

In this work, we investigate numerically the formation and evolution of the shock wave in metals (aluminum, copper, nickel) after impact and ramp loading on the basis of the dislocation plasticity model [3]. A numerical scheme without artificial viscosity but with accounting of physical viscosity is developed. Structure of high-entropy and low-entropy layers near the loaded surface is investigated.

After impact, the elastic precursor runs away from the plastic wave front; the precursor velocity is initially higher than the longitudinal wave speed and the shock wave velocity. Amplitude and velocity of the precursor decrease with the distance; two different scenarios of further evolution can be realized depending on the relation between the plastic shock-wave velocity and the longitudinal sound speed.

This work is supported by the grants of RF President (№ MD-286.2014 and NSh-6614.2014.2) and RFBR (№ 14-08-00967). Authors are grateful to A. A. Charakhch'yan, V. F. Kuropatenko, I. R. Makeyeva, M. E. Povarnitsyn and A. Yu. Semenov for useful discussions.

### References

1. Inogamov N. A., Zhakhovsky V. V., Petrov Yu. V., et al. // *Contrib. Plasma Phys.* 2013. V. 53. P. 796.
2. Armstrong R. W., Zerilli F. J. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. V. 43. P. 492002.
3. Mayer A. E., Khishchenko K. V., Levashov P. R., Mayer P. N. // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 193508.

6-42

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ И ЦЕННОСТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА В МЕТОДЕ МОНТЕ-КАРЛО

И. Н. Медведев

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: min@osmf.sccc.ru

В докладе изучаются вопросы конечности дисперсии весовых оценок и уменьшения трудоемкости метода Монте-Карло при оценивании решения интегрального

уравнения 2-рода или системы таких уравнений. В частности, на примере задачи переноса излучения с учетом поляризации, показано, что для стандартной векторной оценки по столкновениям условия, гарантирующие ограниченность дисперсии оценки, могут быть существенно ослаблены, если использовать соответствующую скалярную оценку с ветвлением траектории. А именно, доказано, что дисперсия соответствующей рандомизированной скалярной оценки и среднее время моделирования одной траектории всегда ограничены, если исходное решение системы интегральных уравнений ограничено. Для уменьшения величины дисперсии весовой оценки решения линейного интегрального уравнения построены следующие модификации использования ветвления траектории для весовой оценки: только в случае, когда очередной весовой множитель  $q$  после каждого перехода больше 1 и когда «полный» вес после  $n$  переходов больше 1.

Представлено исследование эффективности построенных модификация весовых оценок с ветвлением траектории. Также, для задач переноса излучения в плоском слое исследована и обоснована модификация экспоненциального преобразования моделирования длины свободного пробега.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (12-01-00034а, 13-01-00441а, 13-01-00746а), а также программы «Ведущие научные школы» (грант НШ-5111.2014.1).

## ABOUT USING TRAJECTORY BIFURCATION AND HOLISTIC MODELING OF FREE PATH LENGTH IN MONTE-CARLO METHOD

I. N. Medvedev

Institute of Computation Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: min@osmf.sccc.ru

The work presents the issues of finitude for weight estimate dispersion and decreasing the complexity of Monte-Carlo method while assessing the solution of integral second kind equation or a system of such equations. In particular, an example of radiation transport problem with regard for polarization showed that for standard vector estimate on collisions, the conditions that guarantee limitation of estimate dispersion may be sufficiently weakened, if one uses corresponding scalar estimate with trajectory bifurcation. It was proved that dispersion of corresponding randomized scalar estimate and average time of one trajectory modeling are always limited, if the initial solution of integral equations system is limited. In order to decrease the dispersion of weight estimate for solutions of linear integral equation, the following modifications of using trajectory bifurcation were built: only in case, when recurrent factor  $q$  after each transition is more than 1 and when “total” value after  $n$  transitions is more than 1.

The work presents investigation into the efficiency of built modifications of weight estimate with trajectory bifurcation. Besides, for the problems of radiation transport in a flat later, modification of exponential transformation of modeling the free path was investigated and substantiated.

The work was performed under RFBR grant support (12-01-00034a, 13-01-00441a, 13-01-00746a) and the Program “Leading Scientific Schools” (grant NSh-5111.2014.1).

6-43

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СЖИМАЕМОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ

С. Л. Дерябин, А. В. Мезенцев, А. П. Садов

Уральский государственный университет путей сообщения,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: SDeryabin@usurt.ru, alsadov@yandex.ru,  
AMEzentsev@usurt.ru

В настоящее время для описания волн используются приближенные модели мелкой воды [1], которые не позволяют определять распределения параметров жидкости по вертикали. Однако для описания реальных физических процессов в работе [2] рассматривалась модель сжимаемой сплошной среды система уравнений газовой динамики. В настоящей работе использовалась двумерная модель газовой динамики для политропного газа с показателем политропы равным 7 [3]. Рассматривался плоский слой жидкости ограниченный свободной поверхностью и непроницаемым дном. Предполагалось, что жидкость находится в гравитационном поле, является сжимаемой и невязкой. Исследовались две задачи.

В первой задаче предполагалось, что на свободной поверхности – границе жидкости плотность среды равна нулю. В этом случае в виде сходящихся рядов решение построено в окрестности свободной поверхности. У построенного решения найдена звуковая характеристика и значения параметров жидкости на ней. В виде сходящихся рядов построено течение, лежащее между звуковой характеристикой и непроницаемым дном.

Во второй задаче предполагалось, что граница вода–воздух является контактным разрывом. Плотность воды существенно больше плотности воздуха, поэтому предполагается, что значения параметров воды через условия Гюгонио определяют значения параметров воздуха. В виде сходящихся рядов построено решение двух начально-краевых задач, описывающих течение от контактного разрыва до непроницаемого дна. Получены граничные условия на поверхности воды до границы уреза включительно.

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. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. Полное собрание сочинений. Т. VII. Гидравлика. Москва: Главная редакция авиационной литературы. 1937. С. 58–146.
3. Нигматуллин Р. И., Болотнова Р. Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Метод построения // Теплофизика высоких температур, 2008. Т. 46, № 2. С. 206–218.

## USING MODELS OF A COMPRESSIBLE CONTINUUM FOR DESCRIBING TWO-DIMENSIONAL FLUID FLOW

S. L. Deryabin, A. V. Mezentsev, A. P. Sadov

Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

E-mail: SDeryabin@usurt.ru, alsadov@yandex.ru,  
AMEzentsev@usurt.ru

To describe the waves are currently used approximate shallow water models [1]. These models do not allow determining the distribution parameters of the liquid vertically. However, to describe the actual physical processes in work [2] the model of continuous medium compressible in the form of system of equations of gas dynamics has been considered.

In this work we used two-dimensional model of gas dynamics for a polytropic gas with polytropic exponent equal to 7 [3]. The flat layer of liquid which is limited free surface and an impermeable bottom has been considered. It was assumed that the fluid is in a gravitational field is compressible and inviscid. We investigated two problems.

In the first problem, it was assumed that at the free surface – boundary of the fluid the density is equal to zero. In this case, in the form of convergent series solution is constructed in a neighborhood of the free surface. We found the sound characteristic of the built solutions and the parameters of fluid therein. We built a convergent series, describing the flow of fluid lying between the characteristic sound and impermeable bottom.

In the second problem was assumed that the air-water boundary is a contact discontinuity. Since the density of water significantly greater than the density of air, we assumed that the value of water gives a possibility, through the Hugoniot conditions, to determine the values of parameters of air. The solution of two initial value problems describing the flow of water lying from the contact discontinuity up to an impermeable bottom was built in the form of convergent series. Boundary conditions on the surface of water were obtained to border the shoreline inclusive.

This work was supported by RFBR (№ 11-01-00198).

### References

1. Khakimzyanov G. S., Shokin Y. I., Barakhnin V. B., Shokina N. Y. Numerical modeling of fluid flows with surface waves. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS. 2001. 394.
2. Zhukovsky N. E. About hydraulic shock in the water pipes. Complete Works. T. VII. Hydraulics. Moscow: Home Edition aviation literature. 1937. Pp. 58–146.
3. Nigmatulin R. I., Bolotnova A. D. Wide-range equation of state of water and steam. The method of constructing // High Temperature, 2008. T. 46, № 2. Pp. 206–218.

6-44

## CUDA-ВЕРСИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ТИС-1D». АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ. ЗАДАЧА КАЛИБРОВКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

К. Д. Меркулов, И. С. Меньшов

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

E-mail: parovoz1991@yandex.ru

В докладе представлены основные идеи адаптации вычислительного комплекса «ТИС-1D» для параллельного вычисления на графическом процессоре. Учитывая особенности выполнения программ на GPU, все расчетные функции метода (подсчет производных вектора-состояния, получение значений вектора-состояния на полушаге по времени, расчет потоков [1], подсчет новых значений вектора-состояния по потокам, решение системы ОДУ лагранжева упругопластического этапа) адаптированы для независимого счета на отдельных ячейках (функции упрощены, локализованы для конкретных ячеек сетки, во избежание расчетных коллизий для вычисления потоков и новых значений по ним применяется «шахматная» раскраска сетки, при которой расчет ведется сначала по четным, потом по нечетным ячейкам). Гибридный численный метод, лежащий в основе комплекса «ТИС-1D» [2], адаптирован для реализации на GPU, с помощью технологии CUDA для видеокарт NVidia разработана параллельная версия данного вычислительного комплекса.

В качестве иллюстрации возможностей расчетного модуля для GPU представлены расчеты ряда задач:

- набор стандартных газодинамических тестов;
- задача о соударении пластин;
- задача о сжатии толстостенной цилиндрической оболочки.

Проведено сравнение результатов расчетов на CUDA-версии комплекса с аналитическими решениями и результатами последовательной версии расчетного модуля для идентичных задач. Составлены таблицы зависимостей времени расчета от количества используемых вычислительных нитей для всевозможных задач механики и размеров расчетных сеток.

Полученные ускорения применены на практике: с помощью параллельной версии комплекса в результате больших серий расчетов получены наборы констант для различных моделей разрушения вязкоупругопластических сред и различных материалов. Выбор параметров осуществлялся на основе экспериментальных данных и известных табличных констант по сравнению графиков. Для перебора величин искомых констант применен генетический алгоритм.

### Литература

1. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // Мат. сб. – 1959. – том 47. – № 3. – С. 271–306.
2. Меньшов И. С., Мищенко А. В., Серёжкин А. А. Численное моделирование упругопластических течений методом Годунова на подвижных эйлеровых сетках // Математическое моделирование. – 2013. – том 25. – № 8. – С. 89–108.

## CUDA-VERSION OF SOFTWARE SYSTEM “TIS-1D”. PERFORMANCE ANALYSIS. CALIBRATION PROBLEM OF CONTINUUM MECHANICS COMPUTER MODELS

K. D. Merkulov, I. S. Menshov

VNIIA named after N.L. Dukhov, Moscow, Russia

E-mail: parovoz1991@yandex.ru

The paper presents fundamental ideas of “IS-1D” software system adaptation for parallel computation on graphics processors. With regard for features of program execution on GPU, all calculating functions of the method (calculation of state-vector derivatives, state-vector estimation on time half-step, flow calculation [1], finding of new state-vector values for flows, solution of combined ordinary differential expressions (ODE) of Lagrangian elastoplastic stage) are adapted for independent counting on discrete cells (functions are simplified, localized for specific cells, in order to avoid calculation collisions to compute flows and their new values the chess grid coloring is used, wherein at first even-cell and then uneven-cell computation is performed). The hybrid numerical method underlying the system “IS-1D” [2] is adapted to be implemented on GPU, using the technology CUDA for NVidia display cards, the parallel version has been designed for this computer system.

To illustrate potentialities of the computer modulus for GPU the calculations are presented for a number of problems:

- the set of standard gas-dynamic tests;
- plate collision problem;
- thick-walled cylindrical shell compression problem.

The results of calculations using CUDA system version were compared with analytical solutions and the results of computer modulus sequential version for identical problems. We compiled the tables of relations between the calculation time and the quantity of used computing threads for various continuum problems and computational grid dimensions.

The found accelerations are applied practically: as a result of large sets of computations using the parallel system version we have obtained the constant pools for different fracture models of viscoelastoplastic media and various materials. The parameters were chosen based on experimental data and available table constants by comparing the plots. To sweep target constant values the genetic algorithm was used.

### References

1. Godunov S. K. Difference method for numerical calculation of discontinuous solutions of hydrodynamics equations // Mat. sb. – 1959. – Vol. 47 – No 3. – Pp. 271–306.
2. Menshov I. S., Mishenko A. B., Serzhkin A. A. Numerical modeling of elastoplastic flows by Godunov method on moving Euler meshes // Mathematical Modeling. – 2013. – Vol. 25. – No 8. – Pp. 89–108.

6-45

### ОСОБЕННОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЭЙЛЕРОВА ПОДХОДА В РАСЧЕТАХ СЖАТИЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

Н. А. Михайлов, И. В. Глазырин, А. В. Ершова,  
А. В. Карпеев, А. А. Надольский, И. В. Самков,  
А. В. Хмелёв, М. Н. Чижков, С. Н. Щербакова

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

Численные коды, используемые в настоящее время для подготовки и анализа экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза, должны корректно решать задачу сжатия тонких оболочек ( $\sim 0,1R_0$ ) в десятки раз по радиусу. Возможность в рамках эйлерова подхода предсказывать важные особенности течения обеспечивается корректным учетом многокомпонентности [1]. Для локализации контактных границ и других особенностей в решении необходимо использовать монотонные схемы повышенного порядка аппроксимации и возможность адаптировать (измельчать) расчетную сетку в этих областях. Монотонные свойства схемы также важны для предотвращения появления численных возмущений на контактных границах веществ, которые могут приводить к развитию неустойчивостей течения.

В работе исследуется влияние указанных факторов на качество моделирования сжатия лазерных мишеней в рамках кода Фокус.

#### Литература

1. R. Abgrall and S. Karniy. Computations of Compressible Multifluids. Journal of Computational Physics 169. 594–623 (2001).

### NUMERICAL DETAILS OF MULTICOMPONENT EULERIAN APPROACH IN THE SIMULATION OF LASER TARGETS COMPRESSION

N. A. Mikhaylov, I. V. Glazyrin, A. V. Ershova,  
A. V. Karpeev, A. A. Nadolskiy, I. V. Samkov,  
A. V. Khmelyov, M. N. Chizhkov, S. N. Shcherbakova

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

The simulation codes currently used to design and analyze the experiments in Inertial Confinement Fusion have to solve the problem of thin shells ( $\sim 0,1R_0$ ) compression ten times in radius. The ability of Eulerian approach to predict important observables is provided by the correct treatment of multicomponent flows [1]. Oscillation-free high order scheme and a possibility to refine the calculation grid are necessary to localize the contact discontinuities and other solution irregularities. It is the oscillation-free property of the scheme that is essential for avoiding of the numerical perturbations on the contact boundaries which can lead to the growth of flow instabilities.

In the work the influence of mentioned factors on a numerical simulation quality of the laser targets compression is examined by the FOCUS code.

#### References

1. R. Abgrall and S. Karniy. Computations of Compressible Multifluids. Journal of Computational Physics 169. 594–623 (2001).

6-46

### ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПИ: КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

К. Л. Михайлюков, И. В. Храмов, А. В. Скобеев,  
С. В. Потапов, Н. В. Фролова, М. Д. Романова

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

Метод протонной радиографии с использованием магнитных линз, впервые появившийся с Лос-Аламосе в середине 90-х годов прошлого века и применяемый ВНИИЭФ с 2005 года на ускорителе У-70 в Протвино, зарекомендовал себя качественным инструментом по исследованию газодинамических процессов с высоким пространственным разрешением. Данный метод обладает серьезными преимуществами перед рентгеновской радиографией: многокадровость, высокая проникающая способность, и, как следствие, большое поле обзора.

В настоящее время в ИФВЭ (Протвино) ведется интенсивное строительство полномасштабного протонографического комплекса ПРГК-100 с диаметром поля обзора 220 мм и энергией протонов 70 ГэВ. На 2014 год намечен физический пуск комплекса. Ведутся исследования по построению на базе ускорителя У-70 протонной установки, работающей с увеличением (протонный микроскоп). Поэтому остро встает вопрос о математическом обеспечении и сопровождении данных установок.

В этой связи, начиная с 2009 года, в ИТМФ ведутся работы по созданию программного комплекса по моделированию протонных изображений различных объектов, как статических, так и динамических, полученных в результате газодинамических расчетов.

В рамках комплекса параллельно создаются две программы по получению протонных изображений, основанные на методе лучевых сумм и методе Монте-Карло, соответственно. Метод Монте-Карло базируется на программе GEANT4 – пакета программ для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло.

В докладе дается представление о текущей версии программного комплекса ПИ (Протонные Изображения), создаваемого для математического моделирования процесса прохождения пучка протонов через 2D- и 3D-объекты и расчета протонных изображений объектов. Дано краткое описание используемых алгоритмов и функций. Представлены расчетные изображения.

**PI PROGRAM TO SIMULATE PROTON IMAGES:  
BRIEF DESCRIPTION AND EXAMPLES  
OF IMPLEMENTATION**

K. L. Mikhailukov, I. V. Khramov, A. V. Skobeev,  
S. V. Potapov, N. V. Frolova, M. D. Romanova

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

Method of proton radiography using magnetic lenses that first appeared in Los Alamos in mid-1990s and that is used in RFNC–VNIIEF since 2005 at U-70 accelerator in Protvino showed itself as a high-quality tool to study gas dynamic processes at high spatial resolution. This method has serious advantages as compared to the X-ray radiography: multi-frame operation, high penetration ability and consequently a larger visual field.

An intensive construction of full-scale protonographic complex PRGK-100 with the visual field 220 mm in diameter and the energy of protons of 70 GeV is underway in IHEP, Protvino. First criticality of the complex is scheduled for the year 2014. A possible creation of a proton facility on the basis of U-70 accelerator that would work with magnification (a proton microscope) is studied. So, there is an acute issue of mathematical support stewardship of these facilities.

So, starting with the year 2009, ITPM has been carrying out the works to create a complex to simulate proton images of various objects, both static and dynamic, produced in the result of gas dynamic calculations.

Two programs to produce proton images based on the ray-Sum method and Monte-Carlo method, respectively, are being created in parallel within the complex. Monte-Carlo method is based on GEANT4 Program – a package of programs to simulate the path of elementary particles through the matter using Monte-Carlo.

The paper describes a current version of the PI (Proton Imaging) software complex being created for mathematical simulation of the process when the bundle of protons passes through 2D- and 3D-objects and for calculations of the proton imaged objects. There is a brief description of the algorithms and functions used. Calculated images are also provided.

6-47

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ  
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ДАНЫХ ПО ОТКОЛЬНОМУ РАЗРУШЕНИЮ  
В ОДНОМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ**

А. В. Мищенко<sup>1</sup>, И. С. Меньшов<sup>1,2</sup>, А. Б. Киселев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт  
автоматики имени Н. Л. Духова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: 7sanches@rambler.ru, imen57@mail.ru,  
akis2006@yandex.ru

Подробно экспериментально изученная задача о плоском соударении тонких пластин [1] является важным валидационным тестом для оценки эффективности применения как численного метода, так и используемой математической модели. Вместе с тем, на данный момент не существует единой математической модели, позволяющей с одинаково высокой точностью описывать ударную волну, волну разгрузки и откольное разрушение пластины-мишени в эксперименте. Доклад посвящен анализу наиболее используемых моделей (в частности, вязкоупругопластическая модель [2, 3], упругопластическая модель с учетом дислокационной динамики [4], модель повреждаемой среды с диссипационным критерием разрушения [3]) и их применению для описания различных тестов по соударению пластин. С помощью подобранных констант модели разрушения решена также задача об откольном разрушении сферической оболочки. В качестве численного метода используется метод разделения по физическим процессам [5] с использованием метода С. К. Годунова [6] на подвижных эйлеровых сетках.

**Литература**

1. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах. М.: Физматлит 2008, 304 с.
2. Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: Физматлит, 2001.
3. Киселев А. Б., Математическое моделирование динамического деформирования и комбинированного микроразрушения термоупруговязкопластической среды // Вестн. Моск. унта Матем. Механ. 1998 № 6, с. 32–40.
4. Красников В. С., Куксин А. Ю., Майер А. Е., Янилкин А. В. Пластическая деформация при высокоскоростном нагружении алюминия: многомасштабный подход // ФТТ 2010, т. 52, в. 7, с. 1295–1304.
5. Меньшов И. С., Мищенко А. В., Сережкин А. А. Численное моделирование упругопластических течений методом Годунова на подвижных эйлеровых сетках // Мат. Моделирование 2013, т. 25, № 8, с. 89–108.
6. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.

**USE OF DIFFERENT ELASTO-PLASTIC MODELS  
FOR DESCRIBING EXPERIMENTAL DATA  
OF METAL SCABBING IN ONE-DIMENSIONAL  
STATEMENT**

A. V. Mischenko<sup>1</sup>, I. S. Menshov<sup>1,2</sup>, A. B. Kiselev<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>All Russia Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

E-mail: 7sanches@rambler.ru, imen57@mail.ru, akis2006@yandex.ru

The high-speed impact problem [1] is experimentally established in detail. This problem is important validation test for evaluation of efficiency of application numerical methods and mathematical models. At this moment unified mathematical model which could describe shock wave, unloading wave and scabbing in target in experiment with high accuracy does not exist. The report is devoted to analysis of most utilized elasto-plastic models (elasto-viscoplastic model [2, 3], elasto-plastic model with accounting of dislocation dynamics [4], model of damageable medium with dissipation [3]) and application of these models for solving high-speed impact problem. Also the problem of scabbing spherical shell is solved using model of damageable medium. As a numerical method we use the method of physical processes division [5] with Godunov method [6] and moving eulerian mesh.

**References**

1. Kanel G. I., Razorenov S. V., Utkin A. V., Fortov V. E., Experimental profiles of shock waves in condensed substances, Moscow: FIZMATLIT, 2008 (in Russian).
2. Kulikovskij A. G., Pogorelov N. V., Semenov A. Y., Mathematical aspects of numerical solutions of hyperbolic systems, Moscow: FIZMATLIT, 2001 (in Russian).
3. Kiselev A. B. Mathematical modelling of dynamical deforming and combined microfracture of damageable thermoelastoviscoplastic medium. Studies in Applied Mechanics 45: Advanced Methods in Materials Processing Defects. Amsterdam: Elsevier, 1997. pp. 43–50.
4. Mayer A. E., Khishchenko K. V., Levashov P. R., Mayer P. N., Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading, Journal of Applied Physics, 113, 193508 (2013).
5. Menshov I. S., Mischenko A. V., Serezhkin A. A., An eulerian Godunov-type scheme for calculation of the elastic-plastic flow equations with moving grids, Vienna: ECCOMAS 2012.
6. Godunov S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. I., Kraiko A. N., Prokopov G. P. Resolution Numerique des problems Multidimensionals de la dynamique des gas, Moscow, USSR, Ed.: Mir (1976).

6-48

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСПАДЕ РАЗРЫВА  
В ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ  
И ТРЕХТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ  
ДИНАМИКЕ**

Н. Я. Моисеев

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

E-mail: nyamoiseyev@vniitf.ru

В работах [1, 2] проведены исследования и даны обоснования применения метода Годунова [3] к решению задач трехтемпературной газовой динамики. Однако вопрос о конкретной реализации алгоритма решения задачи Римана в среде при наличии излучения, вообще говоря, остался открытым: для смеси компонентов нет единого уравнения состояния.

В докладе рассмотрены алгоритмы точного и приближенного решения задачи о распаде произвольного разрыва в двухтемпературной и трехтемпературной газовой динамики. Особенность алгоритмов состоит в том, что для нахождения решений не требуется общего уравнения состояния смеси. Точное решение находится численно итерационным методом, основы которого изложены в работе [4].

**Литература**

1. Забродин А. В., Прокопов Г. П. Методика численного моделирования двумерных нестационарных течений теплопроводного газа в трехтемпературном приближении // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1998. Вып. 3. С. 3–16.
2. Прокопов Г. П. Задача о распаде разрыва в трехтемпературной газовой динамике. М. Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. № 66. 2004.
3. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // М: Матем. Сб. 1959. № 47. Вып. 3. С. 271–306.
4. Моисеев Н. Я., Мухамадиева Т. А. Метод Ньютона для решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва в средах с уравнениями состояния общего вида // Ж. вычисл. и матем. физики. 2008. Т. 48. № 6. С. 1–9.

**SOLUTION OF THE RIEMANN PROBLEM  
FOR TWO-TEMPERATURE  
AND THREE-TEMPERATURE GAS DYNAMICS**

N. Ya. Moiseev

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

E-mail: nyamoiseyev@vniitf.ru

Papers [1, 2] present the results of investigations and substantiate the Godunov's scheme [3] as applied to three-temperature gas dynamics problem. However, the specific algorithm used to solve the Riemann problem in the medium, given that irradiation is available, is not completely implemented: a unified equation of state does not exist for the component combination.

The presentation describes algorithms of accurate and approximated solutions of the Riemann problem for



two-temperature and three-temperature gas dynamics. The algorithm properties make it possible to find solutions without general equation of state of the composition. An accurate solution is found numerically using the iteration method, and the basis for this method is given in paper [4].

#### References

1. Zabrodin A. V., Prokopov G. P. Methods of numerical modeling of 2D nonstationary gas dynamic flow with heat conduction in three-temperature approach // *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Mathematical modeling of physical processes*. 1998. Issue 3. P. 3–16.
2. Prokopov G. P. Riemann problem for three-temperature gas dynamics. M. Preprint Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Science. Number 66. 2004.
3. Godunov S. K. Differential method of numerical calculation of discontinuous solutions for hydrodynamic equations // *M: Collection of mathematical articles*. 1959. Number 47. Issue 3. P. 271–306.
4. Moiseyev N. Ya., Mukhamadieva T. A. Newton's method as applied to the Riemann problem for media with general equations of state // *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*. 2008. Volume 48. Number 6. P. 1–9.

---

6-49

### УДАРНО-ВОЛНОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ ЭКРАНОВ ПРИ УДАРЕ ОСКОЛКОМ

Н. И. Гуляева, Е. В. Недоспасова,  
С. В. Родиков, В. Н. Смирнов

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

Исследование затухания расходящейся УВ в металлическом экране вследствие удара осколка по нему составляло цель данной работы. Параметры осколка: геометрия – сферическая, материал – сталь и алюминий. Масса осколка  $m = 1–200$  г; скорость  $U = 1–3$  км/с.

Расчеты проводились по программе конечно-элементного анализа с помощью лагранжево-эйлерового метода. Результаты расчетов уменьшения относительного давления на фронте УВ в экране приведены в виде графиков  $P/P_0(x)$  и  $P/P_0(t)$ . Затухание УВ больше в материале с малой скоростью звука.

### SHOCK-WAVE LOADING OF PROTECTIVE BARRIER ON IMPACT BY FRAGMENT

N. I. Gulyaeva, E. V. Nedospasova,  
S. V. Rodikov, V. N. Smirnov

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

The aim of this work was to study how shock waves attenuate in protective barrier when this barrier is impacted by a fragment. This paper gives computational data on high-speed interaction between this fragment and the metal barrier. Fragment had spherical geometry and consisted of steel and aluminum. Fragment mass was  $m=1–200$  g; fragment velocity was  $U=1–3$  km/s.

The Lagrange-Euler computations were performed using computer code for finite-element analysis. Computational results describing how relative pressure decreases at the shock-wave front in protective barrier are plotted as  $P/P_0(x)$  and  $P/P_0(t)$ . Attenuation effect is more obvious in the material with low sound velocity.

---

6-50

### РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ВИНЕРА-ХОПФА В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ВЗРЫВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ МЕТОДОМ КРЫЛОВА

Г. В. Орлов

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

Ключевые слова: уравнение винера-хопфа, факторизация цифрового фильтра, метод крылова, z-преобразование.

Для восстановления прерванного входного сигнала, прошедшего через измерительную аппаратуру взрывного эксперимента, разработан алгоритм корректной аппроксимации решения цифрового интегрального уравнения первого рода с конечным интервалом наблюдения, то есть цифрового уравнения Винера-Хопфа.

В рамках теории z-преобразований последовательностей, дающей для их аналитических образов простые спектральные условия временной причинности, показана возможность факторизации причинного цифрового фильтра в виде последовательной свертки фильтра, имеющего антипричинный обратный, и фильтра, имеющего причинный обратный. Из этого следует, что задачу восстановления оборванного входного сигнала можно решить в обратной последовательности в два этапа. Сначала с помощью обычной линейной свертки причинного выходного сигнала с обратно причинным фильтром точно восстанавливается промежуточный оборванный причинный сигнал. После этого искомым входной сигнал получается сверткой промежуточного сигнала с обратным антипричинным фильтром. Но применение этого фильтра требует знания значений сигнала за пределами интервала наблюдения. Эти значения предлагается получить экстраполяцией промежуточного сигнала за интервал наблюдения методом Крылова. Оказывается, при весьма слабых условиях на аппаратную функцию удается получить аппроксимацию входного сигнала очень хорошего качества.

Разработаны численные алгоритмы указанной задачи, включая алгоритм свертки причинной и антипричинной последовательностей и алгоритм факторизации аппаратной последовательности.

## SOLUTION OF THE WIENER-HOPF EQUATION FOR EXPERIMENTAL SHOCK DATA PROCESSING WITH THE KRYLOV METHOD

G. V. Orlov

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

Keywords: wiener-hopf equation, digital filter factoring, krylov method, z-transform

For reconstruction an interrupted input signal transmitted in the instrumentation of a shock experiment, we propose an algorithm which correctly approximates the solution of a numerical integral equation of the first kind with a limited observation interval, i.e., the Wiener-Hopf equation.

With z-transform theory for consequences, which gives simple spectral conditions of temporal causality for their analytical patterns, we show that the causal digital filter can be factorized as a successive convolution of a filter which has an anti-causal inverse one and a filter which has a causal inverse one. This suggests that a broken input signal can be inversely reconstructed in two steps. First an interim broken causal signal is correctly reconstructed through a traditional linear convolution of the causal input signal with an inverse causal filter. Then the sought input signal is found through the convolution of the interim signal with an inverse anti-causal filter. But this filter requires the signal values to be known beyond the observation interval. We propose getting these values through an extrapolation of the interim signal beyond the observation interval with the Krylov method. Under very weak conditions for the instrument function it seems possible to get a very good approximation to the input signal.

Numerical algorithms are developed, including convolution algorithm of a causal and anti-causal consequences, and an impulse response consequence factoring algorithm.

---

6-51

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖАТИЯ РЕАГИРУЮЩЕГО ДЕЙТЕРИЯ

И. Б. Палымский

Новосибирский филиал Военного учебно-научного центра Сухопутных войск общевойсковой военной академии ВС РФ, Новосибирск, Россия

Численно моделируется процесс обжатия газообразного дейтерия с учетом двух возможных термоядерных реакций D-D и T-D типа. Используется метод частиц, при этом каждая частица взаимодействует со всеми остальными. Считается, что между частицами действует центральная сила (аналог многократно усиленной силы тяжести), обеспечивающая необходимое сжатие и сила кулоновского отталкивания. При этом полагается, что реакция имеет место, если частицы подходят достаточно близко к друг другу и имеют кинетическую энергию, достаточную для преодоления кулоновского барьера. В расчетах учитывается от 5000 до 50000 частиц, для простоты задача рассматривается в двумерной постановке, коэффициенты в законах притягивающей

центральной силы и отталкивающей силы Кулона выбранны одного порядка, масса ядра дейтерия считается равной 2, а его заряд 1. В начальный момент времени задается вращающийся как твердое тело газовый диск. Типичная картина такова: из начальных данных формируется сходящаяся ударная волна, которая сменяется отраженной. При этом в центре диска плотность увеличивается примерно в 20 раз, давление – в 1440, а температура – в 77 раз. Затем формируется вторая сходящаяся волна, увеличивающая плотность в центре диска еще примерно в 3 раза, давление – в 10 и температуру в 3,3 раза. Описанные процессы сопровождаются протеканием реакции D-D типа, образующиеся при этом высокоэнергетические ядра трития при благоприятных обстоятельствах вступают в термоядерную реакцию T-D типа. Протекание термоядерных реакций приводит к значительному выделению кинетической энергии и как следствие рассеянию газового диска вместе с отраженной ударной волной.

## THE NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS OBZHATIYA ING DEUTERIUM

I. B. Palymskiy

Novosibirsk branch of military-scientific centre of the military academy of Russia, Novosibirsk, Russia

The process of gaseous deuterium compression with two possible thermonuclear reactions D-D and T-D type is numerically simulated. The method of the particles (n-body problem) is used, herewith each particle interacts with each. It is assumed that between particles act the central power (the analogue of increased gravity power), providing necessary compression and power of Coulomb repulsion. Herewith is assumed that reactions exist if particles approach enough close and have a kinetic energy sufficient for overcoming of the Coulomb barrier. In simulations is taken into account from 5000 up to 50000 particles, for simplicity problem is considered in two-dimensional statement, the coefficients in laws of attracting central and repulsing powers are chosen to be approximately equal, mass kernel deuterium is equal to 2 and its charge is equal to 1. At initial time moment the gas disk is revolving as hard body. The typical picture of flow development is: from initial distribution the converging shock wave is formed, which is replaced by reflected one. Herewith in the centre of disk the density increases the 20 times approximately, pressure – the 1440 times and the temperature – the 77 times. Then the second reconverging wave is formed, increasing density in the centre of the disk the 3 times approximately, pressure – the 10 times and the temperature the 3,3 times. The described processes are accompanied with reactions of D-D type, forming the high-energy kernel of tritium and at favourable circumstances the thermonuclear reaction of T-D type is arising. The existing of thermonuclear reactions brings the significant kinetic energy and as effect the dissipation of the gas disk together with reflected shock wave.

---

6-52

## ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВЗВЕСИ

А. В. Панов, В. Е. Фёдоров

Челябинский государственный университет, Челябинск,  
Россия

E-mail: gjd@bk.ru, kar@csu.ru

Рассматривается система уравнений

$$\begin{cases} \frac{d\rho_1}{dt_1} + \rho_1 \operatorname{div} \vec{u}_1 = 0, \\ \frac{d\rho_2}{dt_2} + \rho_2 \operatorname{div} \vec{u}_2 = 0, \\ \rho_1 \frac{d\vec{u}_1}{dt_1} + m_1 \nabla P(\rho_1, \rho_2) = -\frac{\rho_2(\vec{u}_1 - \vec{u}_2)}{\tau}, \\ \rho_2 \frac{d\vec{u}_2}{dt_2} + m_2 \nabla P(\rho_1, \rho_2) = \frac{\rho_2(\vec{u}_1 - \vec{u}_2)}{\tau}, \end{cases}$$

описывающая течение смеси газа и мелких частиц [1]. В предположении конечности объемной концентрации дискретных частиц и отсутствия температурных эффектов данная система состоит из уравнений сохранения массы и импульса каждой из фаз. Правая часть отвечает за силу вязкого трения между фазами. Кроме того,  $\rho_i = m_i \rho_{ii}$  – средняя плотность  $i$ -ой фазы,  $m_i, \rho_{ii}, u_i$  – объемная концентрация, истинная плотность, скорость  $i$ -ой фазы,  $P$  – давление, общее для смеси в целом. Первая фаза соответствует газу, вторая – частицам. Операторы лагранжевых производных имеют вид  $\frac{d}{dt_1} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{u}_1 \cdot \nabla$ ,  $\frac{d}{dt_2} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{u}_2 \cdot \nabla$ . Для данной системы найдено ядро основных алгебр Ли [2], оно совпало с алгеброй Ли группы Галилея. Используя оптимальную систему подалгебр данной алгебры [3], выписаны подмодели на четырехмерных подалгебрах. Найдены простые и частично инвариантные решения.

### Литература

1. Физико-математическое моделирование подавления детонации облаками мелких частиц / Федоров А. В., Фомин П. А., Фомин В. М., Тропин Д. А., Чен Дж. – Р. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2011. –156 с.
2. Овсянников Л. В. Групповой анализ дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1978. 399 с.
3. Ovsyannikov L. V. On the optimal system of subalgebras // Lie Groups and Their Appl., 1994. V. 1, № 2. P. 18–26.

## EXACT SOLUTIONS FOR GAS SUSPENSION EQUATION SYSTEM

A. V. Panov, V. E. Fedorov

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: gjd@bk.ru, kar@csu.ru

The system under consideration is

$$\begin{cases} \frac{d\rho_1}{dt_1} + \rho_1 \operatorname{div} \vec{u}_1 = 0, \\ \frac{d\rho_2}{dt_2} + \rho_2 \operatorname{div} \vec{u}_2 = 0, \\ \rho_1 \frac{d\vec{u}_1}{dt_1} + m_1 \nabla P(\rho_1, \rho_2) = -\frac{\rho_2(\vec{u}_1 - \vec{u}_2)}{\tau}, \\ \rho_2 \frac{d\vec{u}_2}{dt_2} + m_2 \nabla P(\rho_1, \rho_2) = \frac{\rho_2(\vec{u}_1 - \vec{u}_2)}{\tau}, \end{cases}$$

and it describes the flow of the gas mixed with small particles [1]. With the assumption that volume concentration of discrete particles is finite and temperature effects are absent, the system consists of the mass and pulse conservation equations for each phase. The right side introduces force of the viscous friction between the phases. Besides,  $\rho_i = m_i \rho_{ii}$  – average density of the  $i$ -th phase,  $m_i, \rho_{ii}, u_i$  – volume concentration, true density, and velocity of the  $i$ -th phase,  $P$  – pressure, common for the mixture at large. The first phase represents gas, the second – particles. Operators of the Lagrangian derivatives have the form  $\frac{d}{dt_1} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{u}_1 \cdot \nabla$ ,  $\frac{d}{dt_2} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{u}_2 \cdot \nabla$ . For this system, nucleus of the basic Lie algebras [2] is found, it coincides with the Lie algebra of the Galilean group. Submodels are written out in four-dimensional subalgebras using the optimal system of subalgebras for the given algebra [3]. Simple and partly invariant solutions are found.

### References

1. Physico-mathematical modeling of detonation suppression with clouds of small particles / A. V. Fedorov, P. A. Fomin, V. M. Fomin, D. A. Tropin, J. – R. Chen. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2011. – p. 156.
2. L. V. Ovsyannikov Group analysis of differential equations. Moscow: Nauka, 1978. p. 399
3. Ovsyannikov L. V. On the optimal system of subalgebras // Lie Groups and Their Appl., 1994. V. 1, № 2. P. 18–26.

6-53

## АНАЛИЗ ИНВАРИАНТНОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАЛИЛЕЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ УНИТАРНОГО ТОПЛИВА ВО ВЗРЫВ

Ю. М. Ковалев, В. Ф. Куропатенко, Е. Е. Пигасов

Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет), Челябинск,  
Россия

E-mail: pigasovee@mail.ru

Развитие современной вычислительной техники позволило значительно усложнить математические модели физических процессов, используемых в науке и технике. В связи с этим повысился статус математического моделирования как источника получения информации о процессах. Поэтому с особой остротой встает проблема адекватности математических моделей тем физическим процессам, которые они пытаются описывать. Отсутствие в природе чистых веществ привело к активному развитию теории математических моделей многокомпонентных сред [1], основанных на гипотезе взаимопроникающих взаимодействующих континуумов [2].

В данной работе проведен анализ инвариантности относительно преобразования Галилея математической модели, описывающей переход горения во взрыв твердого унитарного топлива в двухфазной гетерогенной среде: газ – твердые частицы [3]. В результате анализа было показано, что уравнение сохранения полной энергии смеси для данной математической модели не является инвариантным относительно преобразования Галилея. В работе [4] было показано, что не инвариантность относительно преобразования Галилея уравнения сохранения полной энергии приводит к физически не обоснованному росту энтропии, связанному с движением системы координат. Следовательно, математическая модель, описанная в работе [3], не может быть использована при анализе перехода конвективного горения твердого унитарного топлива во взрыв.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 13-01-00072.

### Литература

1. Куропатенко, В. Ф. Новые модели механики сплошных сред / В. Ф. Куропатенко // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 1. С. 74–92.
2. Рахматулин Х. А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред / Х. А. Рахматулин // ПММ. – 1956. – т. 20. вып. 27. – С. 184–195.
3. Вайнштейн П. Б. Нестационарные задачи горения взрывоопасного унитарного топлива / П. Б. Вайнштейн, Р. И. Нигматулин, В. В. Попов, Х. А. Рахматулин // Известия АН СССР, Серия «Механика жидкости и газа». – 1981. – вып. 3. – С. 39–43.
4. Ковалев, Ю. М. Анализ инвариантности относительно преобразования Галилея некоторых моделей математических многокомпонентных сред / Ю. М. Ковалев, В. Ф. Куропатенко // Вестник ЮУрГУ, Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2012. – № 27. – С. 69–73.

## ANALYSIS OF THE INVARIANCE UNDER GALILEAN TRANSFORMATION MATHEMATICAL MODEL OF THE TRANSITION OF COMBUSTION OF A UNITARY FUEL IN BLAST

Yu. M. Kovalev, V. F. Kuropatenko, E. E. Pigasov

South Ural state University (state University), Chelyabinsk,  
Russia

E-mail: pigasovee@mail.ru

The development of modern computer technology has greatly complicate the mathematical models of physical processes used in science and technology. In this regard, increased status of mathematical modeling as a source of information about the processes. Therefore, there is a problem particularly acute adequacy of mathematical models of physical processes so that they are trying to describe. Lack of pure substances in nature has led to active development of the theory of mathematical models of multicomponent media [1], based on the hypothesis of mutually interacting continua [2].

This paper analyzes the invariance under Galilean transformations mathematical model describing the transition of combustion into an explosion of solid monopropellant in a biphasic heterogeneous environment: gas – solids [3]. The analysis showed that the total energy conservation equation for mixtures of this mathematical model is not invariant with respect to the Galileo transformation. In [4] it was shown that not invariant under a Galilean transformation equations of conservation of total energy leads to physically sound growth of entropy associated with the motion of the coordinate system. Therefore, the mathematical model described in [3], can not be used in the analysis of the transition of convective combustion of solid a unitary fuel in blast.

This work was supported by RFBR grant № 13-01-00072.

### References

1. Kuropatenko V. F. New models of continuum mechanics / V. F. Kuropatenko // Engineering Journal of Physics. – 2011. – T. 84, № 1. – S. 74–92.
2. Rakhmatulin Kh. A. Fundamentals of gas dynamics of interpenetrating motions of compressible media / Kh. A. Rakhmatulin // J. Appl. mathematics and mechanics – 1956. – T. 20. Issue 27. – S. 184–195.
3. Vainshtein P. B. Unsteady problems monopropellant combustion in air / P. B. Vainshtein, R. I. Nigmatulin, V. V. Popov, Kh. A. Rakhmatulin // Proceedings of the USSR, Series «Mechanics. Liquid and gas». – 1981. – Issue 3. – S. 39–43.
4. Kovalev Yu. M. Analysis of invariance under Galilean transformations of some mathematical models of multicomponent media / Yu. M. Kovalev, V. F. Kuropatenko // Bulletin of South Ural State Univtrstity series Mathematical modeling and programming. – 2012. – № 27. – P. 69–73.

6-54

## К ТЕОРИИ И ОБОСНОВАНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ ФРАКТАЛЬНЫХ ЛАБИРИНТОВ

А. А. Потапов

Институт радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru

В настоящее время интенсивно развиваются методы синтеза фрактальных искусственных композитов и метаматериалов, такие, например, как сверхминиатюрные фрактальные антенны, фрактальные структуры в фотонных/магнонных кристаллах, модели фрактальных импедансов и дробных операторов, перколяционный синтез, канторовские блоки и т. д.

Цель работы – представить основные сведения о фрактальных лабиринтах с привлечением математики дробного исчисления, а также «раскрыть» фрактальный лабиринт как новый объект математической физики. Топология фрактальных лабиринтов явилась в последние несколько лет предметом быстро растущего интереса ученых. Описание таких фрактальных структур или систем не укладывается в традиционные рамки дифференциальных уравнений целого порядка. Более точно эти процессы и объекты количественно описываются операторами дробного интегро-дифференцирования. Авторское определение: фрактальный лабиринт – это топологическая связная структура с фрактальной размерностью больше единицы и скейлинговым характером проводящих путей.

Разработано новое программное средство, позволяющее синтезировать многопараметрическую лабиринтную фрактальную геометрию. При разработке продукта учтены, прежде всего, первичные нужды пользователя и дополнение его различными вспомогательными функциями, делающими процесс разработки фрактальных устройств удобнее, а результат – качественнее. Остановимся в докладе еще и на выборе структур нейронных сетей. Дело в том, что основу каждой нейронной сети составляют относительно простые и однотипные элементы, имитирующие работу нейронов мозга. Многослойные нейронные сети некоторой оптимальной конфигурации могут служить генераторами рассматриваемой геометрии фрактальных структур и использоваться в этом качестве как инструмент моделирования и анализа нелинейных явлений, в том числе и в нанотехнологиях. При этом, топология и структура, а также параметры нейронной сети зависят от типа и свойств фракталов.

Таким образом, представленные результаты указывают на возможные выходы и в нанотехнологии, где еще много «мест».

Полученные результаты предполагается использовать при разрешении целого ряда фундаментальных вопросов, а именно:

(i) – обладает ли геометрический лабиринтный фрактал с однородным генератором фрактальным характером импеданса.

(ii) – возможен ли на основе фрактальных лабиринтов генетический синтез и оптимизация конструкций многомасштабных робастных фрактальных антенных решеток с большим числом элементов. Напомним, что фрактальные антенны уже находят применение в медицине, военных приложениях, физических экспериментах, сотовых системах связи на базовых станциях и мобильных терминалах.

(iii) – вопросы синтеза принципиально нового «не энергетического» фрактального обнаружителя сигналов по их сингулярностям и топологии принятой выборки. Здесь имеется в виду принципиальный отход от энергетических характеристик сигнала (на чем основана вся радиотехника и радиолокация).

(iv) – применение в микро- и нанотехнологиях.

Перечисленные приложения приведены здесь только в виде тезисов, в докладе они будут обсуждены более подробно.

## ON THE THEORY AND JUSTIFICATION OF PHYSICAL APPLICATIONS FRACTAL LABYRINTHS

А. А. Potapov

Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics,  
Moscow, Russia

E-mail: potapov@cplire.ru

Currently intensively develops methods for the synthesis of fractal artificial composites and metamaterials, such as subminiature fractal antennas, fractal structures in photonic/magnon crystals, model of fractal impedances and fractional operators, percolation synthesis, Cantor blocks, etc.

The purpose of this work is the presentation of basic information about fractal labyrinths involving mathematics of fractional calculus, as well as “to open” fractal maze as a new object of mathematical physics. Topology fractal labyrinths appeared in the last few years the subject of rapidly growing interest of scientists. Description of fractal structures or systems does not fit into the traditional framework of differential equations of integer order. More precisely, these processes and objects are quantitatively described by the operators of fractional integro-differentiation. Author's definition: fractal labyrinth is topological connecting structure with a fractal dimension greater than one and scaling character of a pathways.

A new software tool was developed, that allows you to synthesize multiparameter labyrinth fractal geometry. First of all, the primary user's needs were taken into consideration during product development and addition it's by various subsidiary features that makes easier the development process of fractal devices, and the result of this development is better.

We will also discuss in the report on the choice of structures of neural networks. The point is that the bases of every

neural network represent a relatively simple and uniform components imitating operation of brain neurons. Multi-layer neural networks an optimal configuration can act as generators of the considering structures with fractal geometry and used as a modeling tool and analysis of nonlinear phenomena, including nanotechnology. In this case, the topology and structure, as well as parameters of the neural network depends on the type and properties of fractals. Thus, these results indicate the possible exits and nanotechnology, where a lot of “space”.

The results obtained will be used in the resolution of a number of fundamental issues, namely:

(i) – Whether the geometric fractal labyrinth with homogeneous generator has fractal nature of impedance.

(ii) – Is it possible, genetic synthesis based on fractal labyrinths and optimization of multiscale robust fractal antenna arrays with a large number of elements. Recall that the fractal antennas already being used in medicine, military applications, physical experiments, base stations of cellular communication systems and mobile terminals.

(iii) – Questions of synthesis new fundamentally “not energy” fractal signals detector at their singularities and topology of adopted sample. Here it means a fundamental deviation from energy characteristics of the signal (radios and radar based on).

(iv) – Applications in micro-and nanotechnology.

The above applications are shown here only in form of abstracts, in the report they will be discussed in more detail.

---

6-55

### **МЕТОДЫ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ МЕДУЗА-П НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПАМЯТЬЮ**

В. А. Пронин

Российский федеральный ядерный центр –  
ВНИИ экспериментальной физики, институт теоретической  
и математической физики, Саров, Россия

E-mail: pronin@md08.vniief.ru

В работе изложены методы распараллеливания комплекса МЕДУЗА-П. В основе комплекса лежит методика МЕДУЗА, использующая представление Лагранжа и неструктурированную двумерную сетку для аппроксимации системы уравнений движения сплошной среды. Основными особенностями методики являются: однообластной подход, центрированность термодинамических и кинематических величин, использование неструктурированной подвижной сетки произвольного вида, реберный формат хранения сетки, изменяемые сеточные связи в процессе счета, использование конечно-объемного метода решения уравнений, наличие этапа корректировки сетки для поддержания ее качества.

Основное внимание в работе уделено изложению следующих методов:

1. Методы распараллеливания модулей расчета основных уравнений методики, позволяющие эффективно решать явные разностные уравнения.

Эффективность достигается совмещением вычислительной работы процессоров с их обменами.

2. Методы распараллеливания модулей корректировки неструктурированной сетки, позволяющие проводить изменения сеточных связей без ограничений на форму границ параобластей. При этом может изменяться как соседство параобластей, так и их связность.

3. Методы эффективной динамической балансировки нагрузки ядер на основе оценки вычислительных затрат с использованием кусочно-постоянной и дифференцированной весовых функций;

4. Создана технология проведения сквозных расчетов задач по комплексу МЕДУЗА-П на декомпозиции в виде произвольного графа.

В результате стало возможным проведение расчетов в параллельном режиме на декомпозиции произвольного распределенного графа по комплексу программ МЕДУЗА-П с приемлемой эффективностью (порядка 50%), высокой скоростью и использованием неструктурированной сетки, способной динамически изменять связи в процессе счета без ограничений на форму границ параобластей. Это обеспечивает высокую степень безаварийности счета.

### **METHODS FOR PARALLELING THE MEDUZA-P SOFTWARE PACKAGE ON DISTRIBUTED-MEMORY COMPUTERS**

V. A. Pronin

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

E-mail: pronin@md08.vniief.ru

The paper presents the methods for paralleling the MEDUZA-P software package. The package is based on the MEDUZA code, which uses the Lagrange representation and an unstructured two-dimensional mesh to approximate the system of equations of continuum motion. The distinctive features of the code include: single-domain approach, cell-centered thermodynamic and kinematic quantities, arbitrary unstructured moving mesh, edge mesh storage format, process-aware variation of mesh connectivity, solution of equations by the finite volume method, mesh correction step to maintain the mesh quality.

Special attention in the paper is paid to the following methods:

1. Paralleling methods for the computational modules of the code’s major equations that enable efficient calculations of explicit difference equations. The efficiency is reached due to the combination of the computational work done by processors and their exchange.

2. Paralleling methods for the unstructured mesh correction modules that enable variations in the mesh connectivity without constraints on the shape of para-domain boundaries. Both neighborhood and connectivity of para-domains can be varied.

3. Methods for efficient core load balancing based on the evaluation of computational load using the piecewise-constant and differentiated weight functions;

4. A technology for shock-capturing simulations using MEDUZA-P with arbitrary-graph decomposition was developed.

As a result, it became possible to run parallel simulations with arbitrary distributed graph decomposition in MEDUZA-P with acceptable efficiency (about 50%), high speed and use of an unstructured mesh that can dynamically vary its connectivity without constraint on the shape of para-domain boundaries during a computation. This makes the computations highly crash-proof.

6-56

### ОБОБЩЕННОЕ ТЕЧЕНИЕ КУЭТТА

С. Н. Аристов<sup>1</sup>, Е. Ю. Просвирыков<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский университет им. А. Н. Туполева, Казань, Россия

Наиболее известным точным решением, описывающим движение вязкой несжимаемой жидкости, по всей видимости, является течение Куэтта. Успех полученного решения определялся содержательной физической постановкой задачи, благодаря которой конвективная производная в уравнениях Навье-Стокса тождественно равна нулю. Известно множество обобщений течения Куэтта для жидкостей с реологией и стратификацией, а также работ по исследованию устойчивости таких течений. Отметим, что дальнейшее изучение слоистых течений необходимо для решения многих важных задач геофизики. Исходя из приближений крупномасштабности получено решение уравнений Навье-Стокса, описывающее слоистые течения вязкой несжимаемой жидкости с ненулевой конвективной производной. Решение вычисляется в виде разложения гидродинамических полей в ряды Тейлора, ограничиваясь при этом линейными слагаемыми. Найденное решение позволяет описывать возникновение завихренности в жидкостях при отсутствии силы Кориолиса, что поможет описать в точной постановке вихревые образования при отсутствии вращения и экваториальные противотечения.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФСР МФП НТС (программа СТАРТ) и РФФИ.

### GENERALIZED COUETTE FLOW

S. N. Aristov<sup>1</sup>, E. Yu. Prosviryakov<sup>2</sup><sup>1</sup>Institute of Continuum Mechanics, Urals Branch of RAS, Perm, Russia<sup>2</sup>Kazan National Research Institute – KAI named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

The best known accurate solution, which describes the motion of viscous incompressible fluid is apparently the Couette flow. The success of the obtained solution is due to physical problem description owing to which the convective derivative in Navier-Stokes equations is identically zero. A lot of generalized Couette flows for fluids with rheology and stratification are known, as well as the papers devoted to flow stability analysis. Note that further analysis of laminar flows is essential to solve many critical geophysical prob-

lems. On account of large-scale approximation we have solved Navier-Stokes equations, which describe laminar flows of viscous incompressible fluid with nonzero convective derivative. We computed the solution as hydrodynamic Taylor approximation, restricting ourselves to linear terms. The obtained solution allows description of vortex formation in fluids in the absence of the Coriolis force; this can aid in describing vortex formations (in precise formulation) in the absence of rotation, and also equatorial counter-currents.

The work has been performed with financial support from FSR MFP NTS (START program) and RFPI.

6-57

### РАЗРУШЕНИЕ И УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

А. В. Радченко, П. А. Радченко, С. П. Батуев

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

Численно моделируется деформирование и разрушение хрупких анизотропных материалов и конструкций из них при ударных и импульсных нагрузках. Рассмотрено высокоскоростное взаимодействие стальных ударников с анизотропными преградами в диапазоне скоростей 700–2000 м/с, импульсное всестороннее сжатие ортотропного шара и падение заполненной оболочечной конструкции, имитирующей ракетный двигатель на твердом топливе, на жесткое основание. Проводится сравнение с имеющимися экспериментальными данными. Исследуется влияние анизотропии на напряженно-деформированное состояние, ударно-волновые процессы и разрушение материала. Численное моделирование проводится методом конечных элементов в трехмерной постановке в рамках феноменологического подхода механики сплошной среды. Поведение анизотропного материала описывается упруго-хрупкой моделью, учитывающей различия в прочности анизотропного материала при сжатии и растяжении, для описания поведения стального ударника используется упругопластическая модель.

### FRACTURE AND SHOCK-WAVE PROCESSES IN ANISOTROPIC MATERIALS AT DYNAMIC LOADS

A. V. Radchenko, P. A. Radchenko, S. P. Batuev

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Deformation and fracture of brittle anisotropic materials and designs from them is modeled at impact and pulse loadings. High-velocity interaction of steel striker with anisotropic barriers in a speed range 700–2000 M/with, pulse comprehensive compression of an anisotropic sphere and fracture of the filled shell imitating the rocket engine on solid fuel, on the rigid base is considered. Comparison with available experimental data is carried out. Influence of

anisotropy on stress-strain condition, shock-wave processes and material fracture is investigated. Numerical modeling is carried out by a method of final elements in three-dimensional statement within phenomenological approach of mechanics of the continuous environment. The behavior of an anisotropic material is described by the elastic-fragile model considering distinctions in strength of an anisotropic material at compression and a tension, for the description of behavior of the steel striker the elastic-plastic model is used.

6-58

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БАЛКИ ИЗ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ**

П. А. Радченко, С. П. Батуев, Д. В. Лоскутова,  
И. А. Лебедев, Д. Г. Копаница, А. В. Радченко

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

В работе численно и экспериментально исследуется поведение балки из клееной древесины при низкоскоростном ударе. Эксперименты проводились на копро-вой установке. На балку размером  $330 \times 110 \times 3000$  мм сбрасывался груз массой 385 кг. Высота, с которой сбрасывался груз, варьировалась от 0,25 до 1,4 м. При испытаниях образцов для увеличения продолжительности действия нагрузки использовались демпферы. В процессе эксперимента проводились измерения деформаций, ускорений и скоростей. Для этого на поверхности балки были установлены тензорезисторы с базой 20 мм, датчики ускорения, работающие в двух плоскостях.

Численное моделирование проводилось методом конечных элементов в трехмерной постановке в рамках феноменологического подхода механики сплошной среды с использованием оригинальной численной методики. Поведение материала балки описывалось анизотропной средой с ортотропной симметрией упругих и прочностных свойств. При описании разрушения учитывались различия в прочности древесины при сжатии и растяжении. В качестве критериев разрушения использованы тензорно-полиномиальные критерии четвертого и второго порядка. Исследовано влияние кинематических и геометрических параметров на динамику разрушения балки.

### **MODELING OF DEFORMATION AND FRACTURE OF BEAM FROM GLUED WOOD AT LOW-SPEED IMPACT**

P. A. Radchenko, S. P. Batuev, D. V. Loskutova,  
I. A. Lebedev, D. G. Kopanitsa, A. V. Radchenko

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

In work numerical the behavior of a beam from glued wood also is experimentally investigated at low-speed impact. Experiments were made on technical installation. On a beam of  $330 \times 110 \times 3000$  mm freight by weight

385 kg was dumped. Height from which freight was dumped, varied from 0.25 to 1.4 m. At tests of samples for increase in duration of action of loading dampers were used. In the course of experiment measurements of deformations, accelerations and speeds were carried out. For this purpose on a surface of a beam tenoresistors with base 20 mm, the sensors of acceleration working in two planes were installed.

Numerical modeling was carried out by a method of finite elements in three-dimensional statement within phenomenological approach of mechanics of the continuous environment with use of an original numerical technique. The behavior of a material of a beam was described by the anisotropic environment with orthotropic symmetry of elastic and strength properties. At the description of fracture distinctions in wood strength were considered at compression and tension. As criteria of fracture tensor and polynomial criteria of the fourth and second order are used. Influence of kinematic and geometrical parameters on dynamics of fracture of a beam is investigated.

6-59

### **МЕТОДЫ И ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА «ФРЕГАТ» РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ В СМЕШАННЫХ ЯЧЕЙКАХ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК**

Е. Н. Ребенко, Л. М. Зуева,  
Д. В. Могиленских, Т. Б. Фёдорова

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

E-mail: rebenok\_lena@mail.ru

Для решения задачи распределения веществ и вычисления физических величин в смешанных ячейках произвольных гексагональных сеток разработана параллельная программа ФРЕГАТ, которая входит в состав программного комплекса 3D препроцессора РФЯЦ – ВНИИТФ. На основе пересечения ячеек сеток с областями произвольной САД геометрии модели, где области характеризуют вещество, вычисляются массовые и объемные концентрации веществ в смешанных ячейках и другие физические величины. В результате формируется начальное состояние сеточных полей физических величин, которые передаются на расчет в прикладные программы в формате HDF. В докладе представлены результаты численных исследований на примерах различных моделей. Расчеты выполнялись в разных режимах с различным числом процессов.



## METHODS AND PARALLEL PROGRAM "FREGAT" FOR DISTRIBUTING SUBSTANCES IN MIXED CELLS OF COMPUTATIONAL MESHES

E. N. Rebenok, L. M. Zueva,  
D. V. Mogilenskikh, T. B. Fedorova

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

E-mail: rebenok\_lena@mail.ru

To solve a task of substances distribution and physical values computation in mixed cells of arbitrary hexagonal meshes developed was parallel program FREGAT as a part of computer codes of 3D preprocessor in RFNC – VNIITF. The results of intersects of mesh cells with arbitrary CAD model geometry domains, where domains characterize substance, are the basis for calculating mass and volume concentrations of substances in mixed cells and other physical values. In result generated is the initial profile of mesh fields of physical values, which are transferred to be calculated to applied programs in HDF format. The paper presents results of numerical investigations at different models. Calculations were conducted in different modes with various numbers of processes.

[4] уравнения первого порядка  $F_1 = f(u)$ , дополненной соотношением  $F_2 = -f(u)$ , что позволяет определить первоначально произвольную функцию  $f(u)$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проекта 12-С-1-1001 «Обратные задачи математической физики и их приложение к синтезированию гидролокационных апертур на борту подводных роботов» и проекта 12-П-1-1009 «Разработка и применение новых аналитических, численных и асимптотических методов в нелинейных задачах математической физики».

### Литература

1. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. О решении уравнения потенциала // Тр. Института математики и механики УрО РАН. 2008. Т. 14, № 1. С. 130–145.
2. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. Один геометрический метод решения нелинейных уравнений в частных производных // Тр. Института математики и механики УрО РАН. 2010. Т. 16, № 2. С. 209–225.
3. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. Решение нелинейных уравнений в частных производных геометрическим методом // Тр. Института математики и механики УрО РАН. 2012. Т. 18, № 2. С. 209–225.
4. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. Об одном методе решения уравнения нелинейной теплопроводности // Сибирский математический журнал. 2012. Т. 53, № 5, С. 1091–1101.

6-60

## ОДИН МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

Л. И. Рубина, О. Н. Ульянов

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО  
РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: rli@imm.uran.ru, secretary@imm.uran.ru

В ряде нелинейных уравнений в частных производных порядка выше первого (нелинейное уравнение теплопроводности, уравнение потенциала в автомобильных переменных, ряд уравнений нелинейной акустики и др.)

$$F(u, u_i, u_{ij}, \dots, u_{i_1, i_2, \dots, i_n}) = 0, (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, m)$$

для получения точных решений может быть использована модификация геометрического метода [1–3]. Этот подход можно считать развитием хорошо известного метода решения обыкновенных уравнений, не содержащих независимые переменные, когда полагается, что  $y' = p(y)$ , и порядок уравнения понижается.

В случае нелинейного уравнения в частных производных выделяется часть исходного уравнения, содержащая только первые производные решения  $u$

$$F(u, u_i, u_{ij}, \dots, u_{i_1, i_2, \dots, i_n}) = \\ = F_1(u, u_i) + F_2(u, u_i, u_{ij}, \dots, u_{i_1, i_2, \dots, i_n}) = 0$$

и приравнивается к некоторой неизвестной функции  $f$ :  $F_1 = f(u)$ ,  $F_2 = -f(u)$ .

Решение исходного нелинейного уравнения находится как некоторое подмножество из множества решений расширенной системы уравнений характеристик

## ONE METHOD OF OBTAINING EXACT SOLUTIONS OF THE NON-LINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS IN PARTIAL DERIVATIVES

L. I. Rubina, O. N. Ulyanov

N. N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yekaterinburg, Russia

E-mail: rli@imm.uran.ru, secretary@imm.uran.ru

In a number of the nonlinear equations in private derivatives of an order is higher than the first (the nonlinear equation of heat conductivity, the potential equation in automodel variables, a number of the equations of nonlinear acoustics, etc.)

$$F(u, u_i, u_{ij}, \dots, u_{i_1, i_2, \dots, i_n}) = 0, (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, m)$$

for obtaining exact decisions modification of a geometrical method [1–3] can be used. This approach can be considered as development of a well-known method of the solution of the ordinary equations which aren't containing independent variables when it is necessary that  $y' = p(y)$ , and an order of the equation goes down.

In case of the nonlinear equation in private derivatives the part of the initial equation containing only the first derivative decisions  $u$  is allocated

$$F(u, u_i, u_{ij}, \dots, u_{i_1, i_2, \dots, i_n}) = \\ = F_1(u, u_i) + F_2(u, u_i, u_{ij}, \dots, u_{i_1, i_2, \dots, i_n}) = 0$$

also it is equated to some unknown function  $f$ :  $F_1 = f(u)$ ,  $F_2 = -f(u)$ .

The solution of the initial nonlinear equation is found as some subset from a set of decisions of expanded system of the equations of characteristics of [4] equations of the first order of  $F_1 = f(u)$  added with a ratio of  $F_2 = -f(u)$  that allows to define originally any function  $f(u)$ .

Work is performed with financial support within the project 12-C-1-1001 «The return problems of mathematical physics and their annex to synthesizing of sonar apertures onboard underwater robots» both the project 12-P-1-1009 «Development and application of new analytical, numerical and asymptotic methods in nonlinear problems of mathematical physics».

## References

- 1 Rubina L. I., Ulyanov O. N. About the solution of the equation of potential // Tr. Mathematics and mechanics institute of the Ural office of the Russian Academy of Sciences. 2008. T. 14, No. 1. S. 130–145.
- 2 Rubina L. I., Ulyanov O. N. Odin a geometrical method of the solution of the nonlinear equations in private derivatives // Tr. Mathematics and mechanics institute of the Ural office of the Russian Academy of Sciences. 2010. T. 16, No. 2. S. 209–225.
- 3 Rubina L. I., Ulyanov O. N. The solution of the nonlinear equations in private derivatives a geometrical method // Tr. Mathematics and mechanics institute of the Ural office of the Russian Academy of Sciences. 2012. T. 18, No. 2. S. 209–225.
- 4 Rubina L. I., Ulyanov O. N. About one method of the solution of the equation of nonlinear heat conductivity // Siberian mathematical magazine. 2012. T. 53, No. 5, S. 1091–1101.

6-61

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ УПРУГОГО ПРЕДВЕСТНИКА В МАТЕРИАЛАХ

Н. В. Савельева<sup>1,2</sup>, Ю. В. Баяндин<sup>1</sup>, О. Б. Наймарк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

E-mail: saveleva@icmm.ru

В работе проводится моделирование поведения материалов при ударно-волновом нагружении. Описание процесса проводится в рамках статистико-термодинамического подхода поведения среды с дефектами [1]. Ключевой особенностью используемой теории является введение двух переменных, характеризующих дефектную структуру материала.

На основе используемого подхода была сформулирована система дифференциальных уравнений в частных производных, характеризующая различные стадии эволюции дефектов (дисперсное накопление мезоскопических дефектов, локализация разрушения) и их влияние на релаксационные свойства [2]. В результате моделирования был описан ряд эффектов, таких как релаксация упругого предвестника, откольное разрушение и рост откольной прочности при увеличении скорости деформирования. Время и координата откольного разрушения определялись исходя из предположения, что в ударно-волновом эксперименте наибольший вклад в деформирование образца вносят дефекты объемного типа. Краевая задача, соответствующая постановке плоского удара [3], решалась в пакете прикладных программ MATLAB.

Релаксация упруго-пластических свойств материала была исследована по профилям скорости в различных сечениях образца. Было установлено, что затухание уп-

ругого предвестника удовлетворительно описывается экспоненциальной зависимостью. Падение амплитуды предвестника, по мере его распространения, свидетельствует о значительной релаксации напряжений за его фронтом. Связано это может быть со значительным расходом энергии на образование и рост дефектов в ударной волне. Описание в рамках одной модели всех выше представленных эффектов позволяет говорить об адекватности разработанной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-01-00842 А, 12-01-33072 мол\_а\_вед) и программы УрО РАН № 16 (проект 14-01-НП-291).

## Литература

1. Наймарк О. Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 45–72.
2. Савельева Н. В., Баяндин Ю. В., Наймарк О. Б. Численное моделирование деформирования и разрушения металлов в условиях плоского удара // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 300–307.
3. Савельева Н. В., Баяндин Ю. В., Наймарк О. Б. Модель формирования откола // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – № 3. – С. 210–221.

## NUMERICAL STUDY OF ELASTIC PRECURSOR DECAY

N. V. Saveleva<sup>1,2</sup>, Yu. V. Bayandin<sup>1</sup>, O. B. Naimark<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of continuous media mechanics UB RAS, Perm, Russia

<sup>2</sup>Perm national research polytechnical university, Perm, Russia

E-mail: saveleva@icmm.ru

The paper is concerned with modeling the behavior of materials under shock-wave loading. The process is described in the framework of statistical thermodynamic approach of solids with defects [1]. The key concept of this theory is the introduction of two variables, which characterize the material defect structure.

In the framework of the proposed approach, a system of partial differential equations is formulated that characterizing different stages of defects evolution (disperse accumulation of mesoscopic defects, fracture localization) and their influence on the relaxation properties [2]. The results of numerical simulation allowed to describe a number of effects such as elastic precursor decay, spall fracture and increase in the spall strength with the strain rate. Time and location of spall failure are determined on the assumption that the isotropic defects make the main contribution in the specimen deformation during the shock-wave experiment. The boundary value problem, formulating mathematically in terms of the plane shock wave approximation [3], is solved using the MATLAB application package.

The relaxation of elastic-plastic material properties is investigated using the free surface velocity profiles obtained in different sections of the specimen. It has been found that the elastic precursor decay is described rather well by an exponential relationship. The drop of the precursor amplitude as it propagates through the specimen is a demonstration of considerable stress relaxation behind its front. This can be associated with a significant amount of energy spent on the formation and growth of defects under shock wave condi-

tions. The possibility of describing all above mentioned effects in the framework of a single model can be considered to be a strong argument for the adequacy of the developed model.

The study is supported by RFBR (grants №14-01-00842 A, 12-01-33072 мол\_а\_вед) and the program UB RAS №16 (№14-01-НП-291).

### References

1. 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.
2. Savelieva N. V., Bayandin Yu. V., Naimark O. B. Numerical simulation deformation and fracture of metals under plane shock // Computational Continuum Mechanics, 2012, V. 5, № 3, P. 300–307.
3. Savelieva N. V., Bayandin Yu. V., Naimark O. B. Model for spalling formation // PNRPU Mechanics Bulletin, 2013, № 3, P. 210–221.

---

6-62

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

А. А. Серёшкин, И. С. Меньшов

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

E-mail: aaserezhkin@gmail.com

В докладе представляется модель многофазных течений в упругопластических пористых средах. Данная модель предназначена для описания процессов деформирования упругопластических пористых веществ с учетом наполненности пор газообразной средой, горения и детонации твердых пористых ВВ и пр. Модель основана на классических подходах к описанию многофазной среды Р. И. Нигматулина и Байера-Нунзиато. Кроме того в докладе представлен численный метод типа С. К. Годунова построенный на идее расщепления по физическим процессам для решения системы уравнений модели. Численные результаты решения тестовых и демонстрационных задач получены с помощью комплекса прикладных программ ТИС.

## MODELING MULTIPHASE FLOW IN ELASTO-PLASTIC POROUS SOLIDS

A. A. Serezhkin, I. S. Menshov

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: aaserezhkin@gmail.com

In lecture we present model of multiphase flows in elasto-plastic solids. This model using for simulation of processes of solid deformation, taking into account the fullness of pores by gas phase, deflagration and detonation of porous explosives etc. Model based on classical multiphase approaches by Nigmatulin and Bayer-Nunziato. Also in lecture we present numerical Godunov-type method based on separation by physical processes idea for numerical solution of model system of equations. Numerical results of

test and demonstration problems solutions we have taken from simulation on “TIS” program complex.

---

6-63

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ТРЕНЕР К ЗАДАЧАМ РАЗВЕДКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

С. Б. Серов

Независимый разработчик, Снежинск, Россия

E-mail: sbserov@yandex.ru

Одной из актуальных задач ядерной геофизики является каротаж нефтедобывающих скважин. Среди каротажных методов особое место занимает импульсный нейтрон-нейтронный каротаж (ИННК) [1]. Нейтроны обладают уникальной способностью проникать на значительное расстояние в толщу геофизического пласта и возвращаться в скважину, неся с собой важную информацию о составе формации. Вторичная нейтронная волна, индуцированная титаново-третиевой мишенью в результате ее облучения скважинным генератором нейтронов, легко преодолевает такое препятствие как обсадная труба, что делает ИННК незаменимым в условиях непрерывного процесса производства углеводородов из действующих нефтяных скважин. Другие методы корпускулярного каротажа в этих условиях имеют ограниченное применение в связи со слабым проникновением импульсного излучения в породу, а также по другим причинам. Например, при  $\gamma$ -каротаже нужно уметь разделять отраженный полезный сигнал и естественный  $\gamma$ -фон формации, что создает дополнительные трудности.

Численное моделирование задач ИННК является важным инструментом в процессе нефтедобычи и оценки остаточной производительности пласта на различных глубинах. Соответствующие нейтронно-альбедные расчеты используются геофизиками и эксплуатирующими организациями для лучшего понимания и определения расположения нефтеносных слоев, окружающих скважину, а также для совершенствования технологии добычи углеводородов.

В докладе представлены результаты 3D расчетов каротажных кривых  $\lambda(t)$  и  $\Sigma(t)$ , характеризующие нейтронно-поглощающие, рассеивающие и отражающие свойства геофизической среды. Расчеты выполнены на основе использования комплекса программ ТРЕНЕР [2] в массово-параллельной постановке. Эти кривые, рассчитанные до момента времени  $t$  в 2000 мкс дают представление о плотности, составе, флюидонасыщенности и пористости сплошной среды. На основе их обработки можно сделать вывод о концентрации водорода Н в материале формации, что оказывается очень важным для анализа содержания углеводородов в пласте на различных глубинах.

Данный подход может быть применен и к решению более общей задачи разведки полезных ископаемых, обладающих характерными спектрами отраженных нейтронов: угля, золота, уран-содержащих руд и т. д.

**Литература**

1. Замятнин Ю. С., Шиканов А. Е. 50 лет импульсному нейтронному каротажу (1955–1958 гг., Г. Н. Флёров). Сообщение Объединенного института ядерных исследований, 2007, P3-2007-151.
2. Серов С. Б. Численное решение 3-мерного кинетического уравнения в системах координат сферического и цилиндрического типов. ВАНТ, сер.: Матем. модел. физ. процессов, вып. 3, 1990, с. 18–21.

**THE APPLICATION OF THE TRENER CODE  
SYSTEM TO THE EXPLORATION OF MINERAL  
RESOURCES**

S. B. Serov

Independent developer, Snezhinsk, Russia

E-mail: sbserov@yandex.ru

One of the actual problems of nuclear geophysics is logging of the oil producing wells. Among logging methods, pulse neutron-neutron logging (PNNL) holds a special place. Neutrons have a unique ability to penetrate widely into the geophysical formation and return back, carrying important information about formation composition. Secondary neutron wave, induced by titanium-tritium target as a result of its exposure to well neutron generator, easily gets through a barrier like casing. This makes PNNL essential for logging producer wells without shutting them in. Other methods of particulate logging have limited application under such conditions due to the poor penetration of pulse radiation into the formation and some other reasons. For example, during  $\gamma$ -logging it is important to differentiate the reflected useful signal from the natural  $\gamma$ -background, which creates additional difficulties.

Numerical modeling of PNNL problems is an important tool for oil production and assessing of the residual production capacity of the layer at different depths. The corresponding neutron-albedo calculations are used by geophysicists and production companies to better understand and determine the positions of oil-bearing strata, surrounding the well, as well as to improve hydrocarbon recovery techniques.

The report presents the results of 3D calculations of  $\lambda(t)$  and  $\Sigma(t)$  log curves, which characterize neutron-absorbing, scattering and reflecting properties of the geophysical medium. Calculations are done with the help of the TRENER [2] code system in massively-parallel arrangement. These curves, calculated by the time  $t$  equal 2000 microseconds, give an indication of density, composition, fluid saturation and porosity of a continuous medium. Based on their processing, it is possible to make a conclusion about hydrogen H concentration in the formation material, which is very important for analyzing hydrocarbon content in the formation at different depths.

This approach can be applied to handling a more general problem of the exploration of mineral resources, which have characteristic spectra of reflected neutrons: coal, gold, uranium-containing ores, etc.

**References**

1. Zamyatnin Yu. S., Shikanov A. E. 50 years to pulse neutron logging (1955–1958, G. N. Flyorov). The report of the United institute of nuclear research, 2007, P3-2007-151.

2. Serov S. B. Numerical solution of a 3D transport equation in the system coordinates of spherical and cylindrical types. VANT, ser.: Math. model. of physical processes, iss. 3, 1990, pp. 18–21.

---

6-64

**РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ,  
КИНЕТИКИ ПРОТЕКАНИЯ  $\alpha'$ - $\epsilon$ -ФАЗОВОГО  
ПРЕВРАЩЕНИЯ, ЗАРОЖДЕНИЯ, РАЗВИТИЯ  
И ЗАЛЕЧИВАНИЯ ОТКОЛЬНЫХ  
ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ  
ИЗ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА  
ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Н. Д. Соколова, Е. А. Козлов, А. В. Петровцев,  
Д. М. Шалковский, Н. С. Жилиева,  
И. И. Кузнецова, Л. В. Хардина

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

Представлено описание моделей сдвиговой и откольной прочности закаленной стали 30ХГСА НРс35...40, учитывающее протекание в этом материале обратимого твердофазного  $\alpha'$ - $\epsilon$ -фазового превращения, а также постановка и результаты использованных для калибровки моделей ранее проведенных экспериментов с регистрацией двух- и трехволновых конфигураций волн напряжений в образцах различной исходной толщины при двух режимах взрывного нагружения.

Приводятся основные результаты расчетно-теоретического моделирования взрывных экспериментов с фотохронографической (методом оптического рычага) и лазерно-интерферометрической регистрацией (по схемам Фабри-Перо и PDV) волновых профилей в закаленной стали 30ХГСА.

Проведенное сравнение расчетных и измеренных волновых профилей, а также прогнозируемых и наблюдаемых на микро- и макрофотографиях поперечных сечений сохраненных образцов расположения зон откольных и сдвиговых микро-, мезо- и макроповреждений, свидетельствует об адекватном описании расчетом волновых процессов в образцах из закаленной стали 30ХГСА с учетом проявления изучаемым материалом упруго-пластических свойств, протекания в волнах напряжений прямого и обратного  $\alpha'$ - $\epsilon$ -фазового превращения, кинетики зарождения, развития и залечивания откольных и сдвиговых повреждений.

**MATHEMATICAL MODELING  
OF HIGH-STRAIN-RATE DEFORMATION,  
KINETICS OF  $\alpha'$ - $\epsilon$ -PHASE TRANSITION,  
AS WELL AS NUCLEATION, GROWTH  
AND RECOMPACTION OF SPALL DAMAGE  
FOR RECOVERED SAMPLES OF QUENCHED  
30KHGSA STEEL UNDER EXPLOSIVE LOADING**

N. D. Sokolova, E. A. Kozlov, A. V. Petrovtsev,  
D. M. Shalkovsky, N. S. Zhilyaeva,  
I. I. Kuznetsova, L. V. Khardina

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

Advanced models for shear and spall strengths of the quenched 30KhGSA steel (HRc35...40) are described to take into account the reversing solid-state  $\alpha'$ - $\epsilon$ -phase transition, as well as the setup and results of earlier experiments with registration under two explosive loading modes of the two-, and three-wave configurations of stress waves in samples having different initial thickness.

Consideration is given to the main theoretical predictions and simulation results for explosive experiments wherein wave profiles in the quenched 30KhGSA steel were registered with the help of streak-camera using the optical lever method and with the help of laser-interferometry using the Fabry-Perot and PDV methods.

Comparing the calculated wave profiles with the measured ones, as well as comparing the predicted locations of the spall and shear micro-, meso-, and macrodamage zones with those observed on micro-, and macrophotographs of recovered samples cross-sections indicates that our calculations adequately describe wave processes in samples of the quenched 30KhGSA steel taking into account the elastic-plastic properties, direct and reverse  $\alpha'$ - $\epsilon$ -phase transition in stress waves, as well as kinetics of nucleation, growth, and recompaction of spall and shear damages.

6-65

**ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В МЕХАНИКЕ  
ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД**

V. С. Сузов<sup>1</sup>, И. В. Березанский<sup>1</sup>, Е. Н. Степаненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ожно-Уральский государственный университет  
(Национальный исследовательский университет), Челябинск,  
Россия

<sup>2</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск,  
Россия

E-mail: surov@math.susu.ac.ru,

Представлен характеристический анализ моделей Baer'a – Nunziato, Saurel'a – Abgrall'a [1], В. Ф. Куропатенко [2], Chung'a, Chang'a, Lee [3] и Yeom'a G.-S., Chang'a [4], описывающие течение многоскоростной гетерогенной среды. Показано, что модель среды с газодинамическим ядром из [5], в отличие от моделей [1–4], качественно и количественно описывает поведение газожидкостных смесей во всем диапазоне изменения концентрации газа в смеси. Описан узловый метод характеристик, с использованием которого в рамках

модели [5] рассчитан ряд задач о распаде произвольно-го разрыва в дисперсной среде.

Наряду с моделями многоскоростной гетерогенной среды обсуждаются односкоростные модели многокомпонентной среды [6], которые используются при моделировании волновых процессов во вспененных жидкостях и полимерах, в пузырьковых жидкостях, для локализации контактных поверхностей в многожидкостной гидродинамике, при разработке моделей кавитации и расчетах детонационных явлений. 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. При рассмотрении распространения тепла вместо закона Фурье применялся закон Максвелла – Каттанео, учитывающий релаксацию теплового потока и обеспечивающий конечность скоростей перемещения тепловых волн, что в свою очередь связано с принадлежностью системы уравнений к гиперболическому типу. Вязкие релаксационные напряжения, как и тепловые эффекты, вводятся в уравнения модели многокомпонентной среды на уровне смеси в целом. Показано, что при использовании релаксационных законов для диссипативных процессов системы уравнений модели относятся к гиперболическому типу. С использованием узлового метода характеристик рассчитан ряд задач многожидкостной гидродинамики, а также исследованы волновые процессы в пенных и пузырьковых жидкостях. Показано, что в ряде случаев на волновую картину течения существенное влияние оказывают теплообменные явления.

**Литература**

1. Zein A., Hantke M., and Warnecke G. Modeling phase transition for compressible two-phase flows applied to metastable liquids // J. Comput. Phys. – 2010. – Vol. 229. – P. 2964–2998.
2. Куропатенко В. Ф. Модель многокомпонентной среды / Докл. РАН. – 2005. – Т. 403, № 6. – С. 761–763.
3. Chung M.-S., Chang K.-S., and Lee S.-J. Numerical solution of hyperbolic two-fluid two-phase flow model with non-reflecting boundary conditions / Int. J. of Engineering Science. – 2002. – Vol. 40. – P. 789–803.
4. Yeom G.-S., and Chang K.-S. A modified HLLC-type Riemann solver for the compressible six-equation two-fluid model / Computers & Fluids. – 2013. – Vol. 76. – P. 86–104.
5. Сузов В. С. Гиперболическая модель многоскоростной гетерогенной среды / Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85, № 3. – С. 495–502.
6. Сузов В. С. Односкоростная модель гетерогенной среды с гиперболическим адиабатическим ядром / Журн. вычисл. математики и матем. физики. – 2008. – Т. 48, № 6. – С. 1111–1125.

**HYPERBOLIC MODEL IN MECHANICS  
OF HETEROGENEOUS MEDIA**

V. S. Surov<sup>1</sup>, I. V. Berezanskiy<sup>1</sup>, E. N. Stepanenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>South-Ural State University (National Research University),  
Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: surov@math.susu.ac.ru

Presents a characteristic pattern analysis Baer – Nunziato, Saurel – Abgrall [1], V. F. Kuropatenko [2], Chung, Chang, Lee [3] and Yeom, Chang [4] which describe the

multirate for heterogeneous environment. It is shown that the model of the environment with gasdynamic kernel [5], unlike the models [1-4], both qualitatively and quantitatively describe the behavior of gas-liquid mixtures over the entire range of gas concentration in the mixture. Node method described characteristics, using the model in which [5] to calculate the number of problems on an arbitrary discontinuity in the dispersion medium.

Along with multi-speed models of heterogeneous media are discussed one-high-speed model multicomponent medium [6], which are used for modeling of wave processes in foamed fluids and polymers, in bubbly liquids, for localization of the contact surfaces in the multifluid hydrodynamics, model development and cavitation calculations of detonation phenomena. Inclusion in the equation mixture of viscous friction forces and expands the scope of application of heat conduction model and makes it possible to carry out calculations of flows, for example, hydrocarbon mixtures, biological fluids, etc. When considering the propagation of heat instead of the Fourier law to apply the laws of Maxwell–Cattaneo, taking into account the relaxation of the heat flux and provides finiteness velocities of the thermal waves, which in turn is connected with the clothes – the system of equations of the hyperbolic type. The viscous stress relaxation as thermal effects introduced into the model equations of a multicomponent mixture on the level of the medium as a whole. It is shown that when using the relaxation of laws for dissipative processes of the model equations are hyperbolic. With the use of the method of characteristics and Godunov’s method [7] designed a number of problems, a lot of fluid hydrodynamics, and also investigated the wave processes in foam and bubble-liquids. It is shown that in some cases the wave flow pattern is significantly influenced by the heat transfer phenomena.

## References

1. Zein A., Hantke M., and Warnecke G. Modeling phase transition for compressible two-phase flows applied to metastable liquids // *J. Comput. Phys.* – 2010. – Vol. 229. – P. 2964–2998.
2. Куропатенко В. Ф. Модель многокомпонентной среды / *ДАН.* – 2005. – Т. 403, № 6. – С. 761–763.
3. Chung M.-S., Chang K.-S., and Lee S.-J. Numerical solution of hyperbolic two-fluid two-phase flow model with non-reflecting boundary conditions / *Int. J. of Engineering Science.* – 2002. – Vol. 40. – P. 789–803.
4. Yeom G.-S., and Chang K.-S. A modified HLLC-type Riemann solver for the compressible six-equation two-fluid model / *Computers & Fluids.* – 2013. – Vol. 76. – P. 86–104.
5. Surov V. S. Гиперболическая модель многоскоростной гетерогенной среды / *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* – 2013. – Vol. 85, No. 3. – P. 530–538.
6. Surov V. S. One-Velocity Model of a Heterogeneous Medium with a Hyperbolic Adiabatic Kernel / *Computational Mathematics and Mathematical Physics.* – 2008. – Vol. 48. № 6. – P. 1048–1062.
7. Surov V. S. Метод Годунова для расчета течений многоскоростной гетерогенной среды / *Инженерно-физический журнал.* – 2014. – Т. 87, № 2. – С. 367–375.

6-66

## О ПОВЕДЕНИИ НЕКОТОРЫХ РЕШЕНИЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Л. И. Рубина, О. Н. Ульянов

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: rli@imm.uran.ru, secretary@imm.uran.ru

В ряде работ [1–3] авторы доклада, развивают геометрический метод, позволяющий получать точные решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (НДУ) путем сведения их к обыкновенным дифференциальным уравнениям (ОДУ) или к системе ОДУ. Выделение направления наиболее интенсивного развития процесса, описываемого НДУ, позволяет исследовать во многих случаях характер процесса.

Предложенным методом исследовано как линейное, так и нелинейное уравнения теплопроводности. Выявлены причины отличий в поведении решений рассматриваемых уравнений, в том числе обострения в случае нелинейного уравнения. Показано, как можно избежать обострения.

Также этим методом исследован ряд систем уравнений в частных производных, которые предварительно приведены к соответствующим системам ОДУ. Системы ОДУ получены:

- для системы уравнений, описывающей плоские, цилиндрические и сферические течения политропного газа;
- для системы безразмерных уравнений Стокса динамики вязкой несжимаемой жидкости;
- для системы уравнений газовой динамики в цилиндрических координатах и др.

Рассмотрены некоторые задачи, в ряде случаев получены точные решения.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проектов 12-С-1-1001 и 12-П-1-1009.

## Литература

- 1 Рубина Л. И., Ульянов О. Н. О решении уравнения потенциала // *Тр. Института математики и механики УрО РАН.* 2008. Т. 14, № 1. С. 130–145.
2. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. Один геометрический метод решения нелинейных уравнений в частных производных // *Тр. Института математики и механики УрО РАН.* 2010. Т. 16, № 2. С. 209–225.
3. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. Решение нелинейных уравнений в частных производных геометрическим методом // *Тр. Института математики и механики УрО РАН.* 2012. Т. 18, № 2. С. 265–280.

## ABOUT BEHAVIOUR OF SOME SOLUTIONS FOR NONLINEAR MATHEMATICS MODELS

L. I. Rubina, O. N. Ulyanov

N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the  
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg,  
Russia

E-mail: rli@imm.uran.ru, secretary@imm.uran.ru

In a number of works [1–3] authors of the report, develop the geometrical method, allowing to receive exact solutions of the nonlinear partial differential equations (PDEs) reducing them to the ordinary differential equations (ODE) or to system of the ODEs. Allocation of the direction of the most intensive development of the process described by PDEs, allows us to investigate nature of process in many cases.

By the offered method it is investigated both linear, and nonlinear the heat conduction equations. The reasons of differences in behavior of solutions of the considered equations, including blow-up of solutions in case of the nonlinear equation are found out. It is shown how it is possible to prevent blow-up of solutions.

Also by this method we are investigated a number of systems of PDEs which are brought previously to the relevant systems the ODEs. Systems the ODEs are received for the system:

- of the equations describing flat, cylindrical and spherical polytropic gas flows;
- of the dimensionless Stokes equations of dynamics of viscous incompressible fluid;
- of the equations of gas dynamics in cylindrical coordinates, etc.

Some problems are considered, in some cases exact solutions are obtained.

Work was partially supported by the projects 12-C-1-1001 and 12-P-1-1009.

### References

1. Rubina L. I., Ul'yanov O. N. On solving the potential equation // Proc. Steklov Inst. Math. 261 (2008), suppl. 1, S. 183–S200.
2. Rubina L. I., Ul'yanov O. N. A geometric method for solving nonlinear partial equations // Trudy Instituta Matematiki i Mekhaniki UrO RAN. 2010. Vol. 16, No. 2. P. 209–225 (in Russian).
3. Rubina L. I., Ul'yanov O. N. Solution of nonlinear partial differential equations by the geometric method // Trudy Instituta Matematiki i Mekhaniki UrO RAN. 2012. Vol. 18, No. 2. P. 265–280 (in Russian).

6-67

## АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ СЕТОК В ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОБЛАСТЯХ ВРАЩЕНИЯ

Н. А. Артемова, Т. Н. Бронина, О. В. Ушакова

Институт математики и механики им Н. Н. Красовского,  
Уральское отделение РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: ana@imm.uran.ru, btn@imm.uran.ru, uov@imm.uran.ru

Предлагаются алгоритмы и программы построения сеток в объемах, полученных деформацией осесимметричных конструкций. Алгоритмы созданы на основе разработок [1–7]. Они предназначены для численного моделирования процессов многокомпонентной гидродинамики [8] и созданы в рамках подхода [9]. Описываемые алгоритмы осуществляют построение структурированных оптимальных сеток (невырожденных, близких к равномерным и ортогональным сеткам) [9], состоящих из шестигранных ячеек [8]. Описываются четыре вида алгоритмов и программ.

Первая группа алгоритмов предназначена для построения сеток в областях, образованных объемами вращения с различными осями вращения. Их основу составляют алгоритмы построения структурированных сеток на составных поверхностях, образованных поверхностями второго порядка с различными осями вращения, и алгоритмы построения трехмерных сеток для двух способов отображения криволинейного шестигранника на параметрический куб (конфигурация оболочки – квадрат, конфигурация типа ротационной [1]).

Вторая группа алгоритмов осуществляет построение сеток в областях, полученных деформацией областей вращения осесимметричными областями вращения. Предложены алгоритмы деформации области (сетки) и определения допустимого шага деформации, при котором при деформации сеток не возникает вырожденных ячеек.

Следующий вид алгоритмов осуществляет консервативную перестройку сеток в деформированных областях вращения. Под консервативностью понимается свойство сохранения объёма области с допустимой точностью при перестройке сеток как локально, так и глобально по всей области. Перестройка сеток осуществляется с целью удовлетворения требований оптимальности. Для областей вращения (без деформации) предложены новые алгоритмы для держания точек образующей, формирующей область вращения, когда на линию вращения точки образующей в процессе перестройки всегда попадают узлы сетки, а на гранях осуществляется перестройка сеток.

Четвертый алгоритм является алгоритмом построения нестационарных сеток. Он объединяет алгоритмы деформации, определения допустимого шага деформации и перестройки сеток в единый комплекс для расчетов сеток в областях с подвижными деформируемыми границами.

Приводятся примеры расчетов и результаты тестирование построенных сеток на невырожденность и оптимальность по критериям [5–7, 9].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12-01-00130), УрО РАН (проект 13-1-006-ЯЦ), в рамках программы Президиума РАН № 15 при поддержке УрО РАН (проект 12-П-1-1023).

### Литература

1. Бронина Т. Н., Гасилова И. А., Ушакова О. В. Алгоритмы построения трехмерных структурированных сеток // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. 2003. Т. 43. 6. С. 875–883.
2. Bronina T. N., Ushakova O. V. Application of Optimal Grid Generation Algorithms to the Volumes of Revolution // *Advances in Grid Generation*. ed. by O. V. Ushakova. Novascience Publishers, 2007.
3. Бронина Т. Н. Алгоритмы построения начальных трехмерных структурированных сеток для областей вращения // Труды института математики и механики. 2008. Т. 14. 1. С. 3–10.
4. Ушакова О. В. Алгоритмы оптимизации трехмерных сеток для областей вращения // Труды института математики и механики. 2008. Т. 14. 1. С. 150–180.
5. Ушакова О. В. Классификация шестигранных ячеек // Журнал выч. матем. физики. Т. 48. 8. С. 1426–1428.
6. Прохорова М. Ф. Проблемы гомеоморфизма, возникающие в теории построения сеток // Труды института математики и механики. 2008. Т. 14. 1. С. 112–129.
7. O. V. Ushakova. Nondegeneracy tests for hexahedral cells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 200 (2011) 1649–1658.
8. Anuchina N. N., Volkov V. I., Gordeychuk V. A., Es'kov N. S., Pyutina O. S., and Kozyrev O. M. Numerical simulation of 3D multi-component vortex flows by MAH-3 code // *Advances in Grid Generation*. ed by Ushakova O. V. Novascience Publishers. 2007.
9. Khairullina O. B., Sidorov A. F., and Ushakova O. V. Variational methods of construction of optimal grids // *Handbook of Grid Generation*. Thompson J. F., Soni B. K., and Weatherill N. P., eds. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 1999. P. 36–1–36–25.

### GRID GENERATION ALGORITHMS FOR DEFORMED DOMAINS OF ROTATION

N. A. Artemova, T. N. Bronina, O. V. Ushakova

Institute of Mathematics and Mechanics  
named after N.N. Krasovskii, Ural Branch of the RAS,  
Ekaterinburg, Russia

E-mail: ana@imm.uran.ru, btn@imm.uran.ru, uov@imm.uran.ru

Algorithms and programs for grid generation in the volumes obtained by the deformation of axisymmetric constructions have been suggested. Algorithms have been developed on the basis of investigations [1–7]. They have been designed for numerical modelling the processes of multicomponent hydrodynamics [8] and have been developed within the approach [9]. Described algorithms generate structured optimal grids (nondegenerate and closed to uniform and orthogonal grids) [9], composed of hexahedral cells [8]. Four types of algorithms are described.

The first group of algorithms are for generation of grids in the domains formed by volumes of rotation with different axis of rotation. In their basis, there are algorithms of grid generation on the surfaces composed of the surfaces of the second order with different axis of rotation and algorithms for three-dimensional grid generation for two forms of the mapping of a curvilinear hexahedron to a parametric cube (shell with square configuration and rotational configuration [1]).

The second group of algorithms carries out grid generation in the domains obtained from the deformation of the axisymmetric domains by the axisymmetric domains. Algorithms are suggested both for deformation of the domain (grid) and for calculation of the admissible step of deformation for which degenerate cells do not arise.

The next group of algorithms performs the conservative reconstruction of grids in the deformed domains of rotation. The conservative quality is understood as a property to conserve the volume of the domain with admissible accuracy during the reconstruction both locally and globally in the whole domain. The reconstruction of grids is utilized for the purpose to satisfy the optimality criteria. For the volumes of rotations (without deformation) new algorithms for keeping points of the curve generating the domain of rotation when on the line of rotation of the point the nodes of a grid are always arranged during reconstruction, so the reconstruction is carried out on the faces of the domains.

The fourth algorithm is the algorithm for generation of nonstationary grids. It unites the deformation algorithm, the algorithm for definition of an admissible step of deformation and the reconstruction algorithm in one code for calculation of grids in the domains with moving boundaries.

Examples of calculations and results of testing of generated grids according to criteria of nondegeneracy and optimality [5–7, 9] are given.

This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (project 12-01-00130), Ural Branch of RAS (project 13-1-006-NC), within the program 15 of the Presidium of RAS under support of the Ural Branch of RAS (project 12-P-1-1023).

### References

1. Bronina T. N., Gasilova I. A., Ushakova O. V. Algorithms for three-dimensional structured grids generation // *Comput. Math. Math. Phys.* 43 (6). 2003. 836–844.
2. Bronina T. N., Ushakova O. V. Application of Optimal Grid Generation Algorithms to the Volumes of Revolution // *Advances in Grid Generation*. ed. by Ushakova O. V. Novascience Publishers, 2007.
3. Bronina T. N. Algorithm for constructing initial three-dimensional structured grids for the domains of revolution // *Proc. Steklov Inst. Math. Suppl.* 1. 2008. S. 36–43.
4. Ushakova O. V. Optimization algorithms for three-dimensional grids in domains of rotations // *Proc. Steklov Inst. Math. Suppl.* 1. 2008. S. 228–259.
5. Ushakova O. V. Classification of hexahedral cells // *Comput. Math. Math. Phys.* 48 (8). 1327–1348.
6. Prohorova M. P. Problems of homeomorphism arising in the theory of grid generation // *Proc. Steklov Inst. Math. Suppl.* 1. 2008. S. 165–182.
7. Ushakova O. V. Nondegeneracy tests for hexahedral cells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 200. 2011. 1649–1658.
8. Anuchina N. N., Volkov V. I., Gordeychuk V. A., Es'kov N. S., Ilyutina O. S., and Kozyrev O. M. Numerical simulation of 3D multi-component vortex flows by MAH-3 code // *Advances in Grid Generation*. ed by Ushakova O. V. Novascience Publishers. 2007.
9. Khairullina O. B., Sidorov A. F., and Ushakova O. V. Variational methods of construction of optimal grids // *Handbook of Grid Generation*. Thompson J. F., Soni B. K., and Weatherill N. P., eds. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 1999. P. 36–1–36–25.



6-68

## ГРУППОВОЙ АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ КИНЕТИКИ ДЕФЕКТОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Н. В. Филин

Челябинский государственный университет, Челябинск,  
Россия

E-mail: nikolay\_filin@inbox.ru

Работа посвящена групповому анализу уравнения кинетики вакансионных пор в облучаемом металле [1]

$$c_{tt}(t, x) = ac_{xx}(t, x) + g(c(t, x))c_x(t, x),$$

со свободным элементом  $g(c)$ . Была найдена алгебра Ли групп преобразований эквивалентности [2]. Например, в случае  $g'(c) \neq 0$ , состоит из операторов

$$Y_1 = \frac{\partial}{\partial t}, \quad Y_2 = \frac{\partial}{\partial x}, \quad Y_3 = \frac{\partial}{\partial c}, \quad Y_4 = c \frac{\partial}{\partial c},$$

$$Y_5 = t \frac{\partial}{\partial t} + x \frac{\partial}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial g}.$$

Были найдены спецификации элемента  $g(c)$ , которым соответствуют дополнительные симметрии. Так функции  $g(c) = c^b$ ,  $b \in \mathbb{R}$ , соответствует оператор дополнительной симметрии

$$X_3 = c \frac{\partial}{\partial c} - bt \frac{\partial}{\partial t} - bx \frac{\partial}{\partial x},$$

для  $g(c) = e^c$  получен оператор

$$X_4 = c \frac{\partial}{\partial c} - t \frac{\partial}{\partial t} - x \frac{\partial}{\partial x}.$$

Найдены инвариантные решения и подмодели уравнения. К примеру, уравнению

$$c_{tt} = ac_{xx} + e^c c_x$$

соответствует следующая подмодель

$$(s^2 - as^4)\varphi''(s) + (s^2 e^{\varphi(s)} - 2as^3)\varphi'(s) + 1 = 0,$$

решением которой являются функции:

при  $a > 0$

$$\varphi(s) = \ln \frac{s(\sqrt{as} + 1)^{\frac{C_1 - b}{2b}}}{(\sqrt{as} - 1)^{\frac{C_1 + b}{2b}}} - \ln \left( \int \frac{s(\sqrt{as} + 1)^{\frac{C_1 - b}{2b}}}{(\sqrt{as} - 1)^{\frac{C_1 + b}{2b}}} ds - C_2 \right),$$

в случае  $a < 0$

$$\varphi(s) = \ln \frac{s}{\sqrt{as^2 + 1}} + 2C_1 \arctan \sqrt{as} - \ln \left( \int \frac{e^{\frac{C_1 \arctan \sqrt{as}}{\sqrt{a}}}}{(as^2 + 1)^{3/2}} ds - C_2 \right),$$

где  $s = t/x$ .

Научный руководитель д.ф.-м.н, проф. В.Е. Федоров.

### Литература

1. Девятко Ю. Н., Каган М. Ю., Хомяков О. В. Новый механизм образования вакансионных пор // Физика низких температур. 2010. Т. 36, №. С. 398–402
2. Овсянников Л. В. Групповой анализ дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1978.

## GROUP ANALYSIS OF THE EQUATION OF DEFECTS KINETICS IN A SOLID

N. V. Filin

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: nikolay\_filin@inbox.ru

The work concerns group analysis of the equation of vacancy voids kinetics in an irradiated metal [1]

$$c_{tt}(t, x) = ac_{xx}(t, x) + g(c(t, x))c_x(t, x),$$

with free element  $g(c)$ . Lie algebra of the equivalence transformations group was found [2]. For example, in the case  $g'(c) \neq 0$ , algebra has a basis of the form

$$Y_1 = \frac{\partial}{\partial t}, \quad Y_2 = \frac{\partial}{\partial x}, \quad Y_3 = \frac{\partial}{\partial c}, \quad Y_4 = c \frac{\partial}{\partial c},$$

$$Y_5 = t \frac{\partial}{\partial t} + x \frac{\partial}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial g}.$$

Nonlinear specifications of  $g(c)$ , were found corresponding to additional symmetries. For the function  $g(c) = c^b$ ,  $b \neq 0$ , we have generator of additional symmetry

$$X_3 = c \frac{\partial}{\partial c} - bt \frac{\partial}{\partial t} - bx \frac{\partial}{\partial x},$$

for the specification  $g(c) = e^c$  generator

$$X_4 = c \frac{\partial}{\partial c} - t \frac{\partial}{\partial t} - x \frac{\partial}{\partial x},$$

was obtained.

Invariant solutions and submodels are calculated. For example, for the equation  $c_{tt} = ac_{xx} + e^c c_x$  we have the submodel  $(s^2 - as^4)\varphi''(s) + (s^2 e^{\varphi(s)} - 2as^3)\varphi'(s) + 1 = 0$ , then corresponding invariant solution will be of the form: if  $a > 0$

$$\varphi(s) = \ln \frac{s(\sqrt{as} + 1)^{\frac{C_1 - b}{2b}}}{(\sqrt{as} - 1)^{\frac{C_1 + b}{2b}}} - \ln \left( \int \frac{s(\sqrt{as} + 1)^{\frac{C_1 - b}{2b}}}{(\sqrt{as} - 1)^{\frac{C_1 + b}{2b}}} ds - C_2 \right),$$

in the case  $a < 0$

$$\varphi(s) = \ln \frac{s}{\sqrt{as^2 + 1}} + 2C_1 \arctan \sqrt{as} - \ln \left( \int \frac{e^{\frac{C_1 \arctan \sqrt{as}}{\sqrt{a}}}}{(as^2 + 1)^{3/2}} ds - C_2 \right),$$

where  $s = t/x$ .

Scientific supervisor Prof. V. E. Fedorov.

### References

1. Devyatko Y. N., Kagan M. Y., Khomyakov O. V. New mechanism of the formation of vacancy voids. Low Temperature Physics. 2010. Vol. 36, no. 4. P. 313–316.
2. Ovsyannikov L. V. Group Analysis of Differential Equations; transl. from the Russian. – New York a.o.: Academic press, 1982.

6-69

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВЗВЕСЯХ, СОДЕРЖАЩИХ РЕАГИРУЮЩИЕ И ИНЕРТНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Ю. В. Кратова, А. В. Федоров, Т. А. Хмель

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

Работа посвящена исследованию процессов взаимодействия волны гетерогенной детонации с облаком инертных частиц. Актуальность обусловлена необходимостью подавления детонации при ее неконтролируемом распространении. Добавление инертных частиц во взрывоопасную смесь может привести к различным режимам протекания детонации смеси. Описанные в литературе экспериментальные исследования подавления детонации впрыском химически инертных частиц перед фронтом волны в большей степени касаются газовой детонации. Проблема взаимодействия гетерогенной детонации с облаком инертных частиц исследована недостаточно подробно.

В настоящем исследовании представлены результаты численного моделирования процесса взаимодействия гетерогенной детонационной волны, распространяющейся в плоском канале как в режиме Чемпен-Жуге (ЧЖ), так и ячеистом, с облаком химически инертных частиц. Реагирующая смесь представляет собой частицы алюминия стехиометрической концентрации, инертные частицы – глинозем.

Цель работы выявить влияние параметров инертной смеси (массовая доля и размер частиц, разброс инертных частиц по размерам, форма облака, неравномерная концентрация частиц) на режимы распространения детонации.

Описание динамических процессов в газозвесьях твердых частиц высокой насыщенности проводится в рамках механики гетерогенных сред. Проводится сравнение бесстолкновительной модели и модели с учетом хаотического давления и температуры. Для описания хаотического движения и столкновений частиц применяются молекулярно-кинетические подходы.

Для численной реализации использовалась схема TVD для газа и Джентри-Мартина-Дэйли для частиц.

Анализ результатов позволил определить режимы распространения детонации при взаимодействии с облаком инертных частиц при влиянии объемной концентрации, размера инертных частиц, а также полидисперсного состава облака. Определена критическая длина облака, достаточная для подавления детонации. Полученная разница в критической длине облака при распространении детонации ЧЖ и ячеистой детонации говорит о влиянии поперечных волн на предельные режимы.

Сопоставление результатов расчетов по стандартной бесстолкновительной модели и модели с учетом столкновения частиц показало, что хаотическое движение и столкновения частиц инертной фазы не оказывают влияния на скорость фронта, размер ячеек, структуры

течения в окрестности фронта. Имеются некоторые различия в распределении параметров в дальнем следе ячеистой детонации. Здесь за счет столкновений частиц размазываются слои инертной фазы, сформированные в поперечных потоках, что сказывается на распределении параметров течения.

### NUMERICAL MODELING OF CELLULAR DETONATION IN GAS-PARTICLE MIXTURES OF REACTING AND CHEMICALLY INERT SOLID PARTICLES

Yu. V. Kratova, T. A. Khmel, A. V. Fedorov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,  
RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia  
E-mail: khmel@itam.nsc.ru

The study is devoted to the investigations of heterogeneous detonation wave interaction with a cloud of chemically inert particles. The timeliness is primarily caused by problems of explosion and fire safety of industrial processes that involve dust-laden flows with a high probability of uncontrolled explosions. The available experimental investigations of detonation suppression by injection of chemically inert particles ahead of the wave front are concerned to a large measure with gaseous detonation. The problem of interaction of heterogeneous detonation with a cloud of inert particles has not been investigated enough.

In this research the results of numerical modeling of Chapman-Jouguet (CJ) and cellular heterogeneous detonation propagation in a gas solid particle suspension containing of chemically inert particles are presented. We consider a flat channel filled with a homogeneous stoichiometric monodisperse mixture of oxygen and fine disperse aluminum particles and alumina inert particles ( $Al_2O_3$ ).

The work was aimed at determining the influence of the parameters of an inert mixture (mass fraction of particles and their size) on the modes of heterogeneous detonation propagation.

The computations are based on a mathematical model of detonation of aluminum particles in oxygen, which was verified against experimental data on the detonation velocity as a function of the fraction of particles. The model is based on principles of the mechanics of many-velocity many-temperature continuum.

The comparison of the effect of collisional particle dynamics was also carried out. A mathematical model of two-phase medium using molecular-kinetic approach of theory of granular materials for the description of shock wave processes in gas particle suspensions with regard for particle-to-particle collisions was used.

The numerical method based on the application of the TVD scheme for gas and of the Gentry-Martin-Daly scheme for particles was used.

The analysis of the results allows defining the detonation propagation modes. It has been shown that the chemically non-reactive solid particle additives lead to the changes in the detonation characteristics and detonation failure. The influence of non-reactive particle dispersion, the mass fraction on the detonation suppression has been demonstrated. The minimal cloud size for detonation quenching has been found. The difference in magnitudes of the cloud size for

CJ and cellular detonations shows the effect of transverse waves on the limiting propagation modes.

The calculations of detonation flow in reacting particle suspensions in gas with presence of inert particles reveal that particle-to-particle collisions do not affect the detonation velocity, cell size and the flow structure behind the front but lead to dispersion the inert phase layer-type structures in the far zone of cellular detonation.

---

6-70

### РОСТ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ВСЕСТОРОННЕМ СЖАТИИ

Н. А. Дмитриев, Л. Ф. Потапкина, С. А. Холин

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

Автомодельное газодинамическое решение однородного всестороннего сжатия допускает бесконечную кумуляцию энергии и бесконечный рост плотности вещества. Известно, что при достаточно больших плотностях показатель адиабаты становится меньше 5/3. Показано, что при этом сжатие становится неустойчивым, что препятствует бесконечной кумуляции. Приведены численные примеры.

### INSTABILITY GROWTH UNDER ALL-AROUND COMPRESSION

N. A. Dmitriev, L. F. Potapkina, S. A. Kholin

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

The self-similar gas dynamic solution for uniform all-around compression assumes infinite cumulation of energy and infinite growth of the material density. It is a well known fact that with sufficiently large densities the adiabatic index becomes lower than 5/3. The paper shows that compression becomes unstable in this case and such conditions prevent infinite cumulation of energy. Numerical examples are given.

---

6-71

### ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МИШЕНЬ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА УМЕРЕННОЙ МОЩНОСТИ

А. Ю. Круковский, В. Г. Новиков, И. П. Цыгвинцев

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

E-mail: iliatsygvintsev@gmail.com

Целью данной работы является численное моделирование физических процессов, протекающих при воздействии лазера на различные мишени, с целью получения лазерной плазмы, эффективно излучающей в заданном спектральном диапазоне. В качестве

«инструмента» численного моделирования используется трехмерный комплекс программ 3DLINE [1].

Основным приближением для описания лазерной плазмы является нестационарная одножидкостная двухтемпературная радиационная газодинамика. Расчет переноса излучения осуществляется в диффузионном многогрупповом приближении. При обработке результатов расчета используется трассировка излучения по длинным характеристикам. В расчете учитываются эффекты, связанные с нестационарной ионизацией, теплопроводностью, рефракцией лазерного импульса в плазме и отражением его от критической поверхности. Используются табличные уравнения состояния и оптические коэффициенты [2].

Проведен ряд расчетов, моделирующих процесс взаимодействия лазерного излучения интенсивностью  $10^{10}$ – $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> с веществом мишени, как в аксиально-симметричной постановке (перпендикулярное падение гауссова пучка на плоскость), так и в случае, когда аксиальной симметрии нет (падение под углом). В качестве вещества мишени взято олово, которое является высокоэффективным источником излучения, необходимого для нужд литографической промышленности [3].

Результаты расчетов неплохо согласуются как с экспериментами [3], так и с расчетами, проведенными по двумерным комплексам программ РАЗРЯД [4] и RZLINE [5].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-01-00744).

### Литература

1. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Новиков В. Г. // Программа 3DLINE: численное моделирование трехмерных нестационарных задач радиационной газовой динамики. Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша, 2013, № 20.
2. 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, 400 с.
3. V. Bakshi // EUV Sources for Lithography, SPIE Press, Bellingham, WA (2005).
4. Гасилов В. А., Круковский А. Ю., Новикова Т. П., Оточин А. А. // Об алгоритмах решения двумерных уравнений магнитной гидродинамики в комплексе программ РАЗРЯД. Препринт ИММ РАН, № 36, М., 1993.
5. Konstantin N. Koshelev, Vladimir V. Ivanov, Vladimir G. Novikov, Viacheslav Medvedev, Alexander S. Grushin, et al. // RZLINE code modeling of distributed tin targets for laser-produced plasma sources of extreme ultraviolet radiation, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 11 (2), 021112 (May 21, 2012).

### THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF LASER PULSE IMPACT ON THE TIN TARGET

I. P. Tsygvintsev, A. Yu. Krukovskiy, V. G. Novikov

KIAM RAS, Moscow, RF.

E-mail: iliatsygvintsev@gmail.com

The aim of this work is the numerical simulation of physical processes taking place under the influence of the laser pulse on various targets in order to obtain plasma that effectively radiates in a given spectral range. Three dimensional code 3DLINE is used as numerical simulation “tool” [1].

Main approximation for describing laser plasma evolution is a model of non-stationary one-fluid two-temperature radiation gas dynamics. Radiation transport is calculated in multi-group diffusion approximation. Ray tracing algorithm is used for post processing of calculation results. Effects of non-equilibrium ionization, thermal conductivity, laser refraction and reflection are accounted in calculations. The equation of state and the optical data are used in a tabulated form [2].

The impact of laser beam with intensity of  $10^{10}$ – $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> on the target material in the axial-symmetric setting (perpendicular Gaussian beam incidence on the flat target) and in the case when there is no axial symmetry (non perpendicular incidence) was simulated. Tin was used as target material due to its high efficiency as a source of extreme ultra-violet radiation for lithography [3].

Calculation results are compared with experiments [3] and data obtained using two-dimensional codes [4, 5].

Work is supported by RFBR (project №12-01-00744).

## References

1. I.P. Tsygvintsev, A.Yu. Krukovskiy, V.G. Novikov. // 3DLINE code: numerical simulation of three-dimensional non-stationary radiation gas dynamical problems. KIAM preprint, 2013, № 20. (in Russian)
2. A. F. Nikiforov, V. G. Novikov, V. B. Uvarov. // Quantum-Statistical Models of Hot Dense Matter: Methods for Computation Opacity and Equation of State. ISBN-10 3-7643-2183-0; ISBN-13: 978-3-7643-2183-3. Published by Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 2005.
3. V.Bakshi. // EUV Sources for Lithography, SPIE Press, Bellingham, WA (2005).
4. V. A. Gasilov, A. Yu. Krukovskiy, T. P. Novikova, A. A. Otchin // On algorithms for solving two-dimensional magnetohydrodynamic equations in PAЗРЯД code, IMM preprint, № 36, M., 1993. (in Russian)
5. Konstantin N. Koshelev, Vladimir V. Ivanov, Vladimir G. Novikov, Viacheslav Medvedev, Alexander S. Grushin, et al. // RZLINE code modeling of distributed tin targets for laser-produced plasma sources of extreme ultraviolet radiation, J. Micro / Nanolith. MEMS MOEMS. 11(2), 021112 (May 21, 2012).

с коэффициентами, вычисляемыми по населенностям уровней и электронной температуре, которая удовлетворяет уравнению энергобаланса. 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.

Основные результаты:

- разработанный ранее комплекс параллельных программ пополнен программами для случая фойгтовских профилей излучения с учетом нескольких сотен спектральных линий при этом вещество в слое может быть либо неподвижно (несколько подобластей, заполненных смесью веществ с разными плотностями и составом), либо разлетаться с постоянной скоростью разлета (одна подобласть);
- использование нескольких способов регуляризации при нахождении решения системы уравнений кинетики;
- разработка нового распараллеливания по двум тесно-гнездовым циклам для программы с 1000 линиями (достигнуто ускорение в 880 раз при использовании 1500 процессоров; время счета на одной итерации – 22 сек.).

Проведены серии расчетов на суперкомпьютерах УРАН (ИММ УрО РАН, г. Екатеринбург) и МВС-100К (МСЦ РАН, г. Москва). Представлены результаты численных экспериментов. Проведено сравнение результатов расчетов, полученных по методикам МАПИ и МПЛЧ. Исследована зависимость интенсивности от количества учитываемых спектральных линий. Изучено влияние скорости разлета среды на результаты численного моделирования в однородных слоях, в т. ч. на поведение интенсивности излучения и населенностей уровней при различных значениях скорости, на сходимость процесса численного решения и т. д.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проектов 12-П-1-1023 и 12-С-1-1001.

## Литература

1. Леликова Е. Ф., Рубина Л. И., Ульянов О. Н., Чашин М. А. Параллельные вычисления в задачах, возникающих при математическом моделировании переноса излучения // В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы (Серия «Б», том VII-1 «Математическое моделирование в низкотемпературной плазме». Часть 3. Под ред. Ю. П. Попова. Гл. редактор серии ак.В.Е. Фортов.). М.: ЯНУС-К, 2008. 698 с. С. 514–522.
2. Рубина Л. И., Ульянов О. Н., Чашин М. А. О развитии двух параллельных алгоритмов численного моделирования взаимодействия излучения с веществом // Вестн. УГАТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. Т. 17, № 2 (55). С. 64–74.

6-72

## МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В ПОДВИЖНОМ СЛОЕ

М. А. Чашин, Л. И. Рубина, О. Н. Ульянов

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО  
РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: cma@imm.uran.ru, rli@imm.uran.ru,  
secretary@imm.uran.ru

Представлены результаты развития методики [1, 2] численного моделирования взаимодействия излучения с плоским слоем вещества, полученные за период, прошедший со времени XI ЗНЧ. При решении соответствующей системы уравнений: рассчитывается вклад каждой учитываемой спектральной линии; вычисляются населенности уровней в соответствии с уравнениями кинетики населенностей; находится интенсивность излучения в соответствии с уравнением переноса

## TECHNIQUE OF NUMERICAL MODELLING OF INTERACTION OF RADIATION WITH SUBSTANCE IN MOBILE LAYER

M. A. Chaschin, L. I. Rubina, O. N. Ulyanov

N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: cma@imm.uran.ru, rli@imm.uran.ru, secretary@imm.uran.ru

Results of development of a technique [1, 2] for numerical modelling of interaction of radiation with a flat layer of the substances received for the period, passed since the XI ZST are presented. At solving the corresponding system of the equations: the contribution of each considered spectral line are computed; population of levels according to the equations of kinetics are calculated; there is an intensity of radiation according to the transfer equation with the coefficients computed on densities of population of levels and electronic temperature which satisfies to the energy balance equation. The technique is based on realization of two methods (MAPI and MPLCh) of the numerical solution of a problem of radiation transfer. The MAPI method is based on obvious representation of intensity of radiation, the MPLCh method – on use of interpolation Lagrange polynomials on Chebyshev's nodes.

Main results:

- the complex of parallel programs developed earlier be filled up with codes for a case the Foigt profiles of radiation taking into account several hundred spectral lines thus substance in a layer can or not movably (some subareas filled with mix of substances with different density and structure) or to scatter with a constant speed of scattering (one subarea);
- use of several ways of regularization when finding the decision of system of the equations of kinetics;
- development of new parallelization on two close-nested cycles for the program with 1000 lines (acceleration by 880 times is reached when using 1500 processors; counting duration on one iteration – 22 sec.).

A series of calculations using supercomputers URAN (IMM UB RAS, Yekaterinburg) and MVS-100K (JSCC RAS, Moscow) are carried out. The results of numerical experiments are presented. Comparison of results of the computations received by techniques of MAPI and MPLCh is carried out. Dependence of intensity on number of considered spectral lines is investigated. The influence of speed of scattering of the environment on results of numerical modeling in uniform layers, including on behavior of intensity of radiation and of level populations is studied at various values of speed, on convergence of process of the numerical solving, etc.

Work was partially supported by the projects 12-P-1-1023 and 12-S-1-1001.

### References

1. Lelikova E. F., Rubina L. I., Ul'yanov O. N., and Chashchin M. A. «Parallel computing in problems that occur during mathematical simulation of radiation transfer» in Encyclopedia of Low-Temperature Plasma [Editor-in-Chief V. E. Fortov]. Series B, Volume VII-1, Part 3 Mathematical modeling of low-temperature plasmas [Editor-in-Chief Yu. P. Popov], pp. 514–522. (In Russian).

2. Rubina L. I., Ulyanov O. N., Chaschin M. A. Development of two parallel algorithms for numerical simulation of interaction of radiation with substance // Vestnik UGATU. 2013. V. 17, No. 2 (55). Pp. 64–74.

6-73

## ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ РЕШАТЕЛЬ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ «МОДУЛЬ NEWT». ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В МЕТОДИКЕ КОРОНА

С. В. Чеботарь, А. С. Сухих

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

E-mail: cheb@vniief.ru, Stas9ih@mail.ru

Решение систем линейных алгебраических уравнений является одним из наиболее затратных этапов численного моделирования природных явлений и работы технических устройств с помощью решения уравнений в частных производных неявными методами. Методы решения систем линейных уравнений постоянно развиваются, в частности, в связи с необходимостью их адаптации к усложняющейся с течением времени архитектуре вычислительной техники. Одним из ключевых моментов в развитии вычислительной техники было создание кластеров машин с распределенной памятью. Это, соответственно, потребовало создания параллельных алгоритмов и программ решения систем линейных алгебраических уравнений для таких компьютеров.

Во ВНИИЭФ для решения систем линейных алгебраических уравнений создан и продолжает развиваться решатель «модуль Newt». Основной задачей является разработка и реализация по возможности небольшого числа методов, каждый из которых мог бы обеспечить эффективную и устойчивую работу модуля на своем, максимально широком классе задач без его перенастройки. Модуль Newt используется в методике КОРОНА и в других методиках при решении уравнений теплопроводности, турбулентного перемешивания, спектрального переноса излучения, газовой динамики, электронной кинетики и при решении других уравнений в частных производных неявными методами.

Модуль Newt имеет дружественный пользовательский интерфейс. Решатель включает в себя реализации нескольких итерационных алгоритмов и нескольких предобусловливателей. Основу модуля составляет параллельное многоуровневое неполное  $LU$ -разложение разреженных матриц в сочетании с неполным блочным разложением обратной матрицы. Имеются реализации алгебраического многоуровневого метода для решения стационарных или почти стационарных уравнений, и метода решения пучков систем линейных уравнений с узкими профильными матрицами, в том числе трехдиагональными.

В докладе описаны принципы организации пользовательского интерфейса модуля, приведено краткое описание основных алгоритмов, реализованных в модуле Newt. Представлены экспериментальные результаты, – длительность счета и эффективность

распараллеливания,– полученные при решении модельных тестовых задач и реальных задач по методике КОРОНА.

**PARALLEL SOLVER “NEWT MODULE”  
FOR LINEAR ALGEBRAIC EQUATION SYSTEMS  
AND ITS APPLICATION IN CODE KORONA**

S. V. Chebotar, A. S. Sukhikh

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

E-mail: cheb@vniief.ru, Stas9ih@mail.ru

Finding solutions to systems of linear algebraic equations is one of the most costly stages in the numerical simulation of natural phenomena and engineering designs by solving partial differential equations with implicit schemes. Numerical schemes for systems of linear equations have been being developed continuously and, in particular, owing to the necessity of adapting them to advanced computer architectures. One of the key points in the development of modern computers is the appearance of distributed-memory computer clusters. Of course, such clusters require parallel algorithms and codes to solve systems of linear algebraic equations.

VNIIEF developed and continues improving solver “module Newt” for linear algebraic equation systems. The principal task is to develop and implement an as small as possible set of numerical schemes, each of which could provide an efficient and stable operation of the module without readjustments for a wide, to the extent possible, class of problems.

Module Newt is used in code KORONA and some other codes to solve heat conduction, turbulent mixing, spectral radiation transport, electron kinetics equations and other types of partial differential equations using implicit schemes.

Module Newt has a user-friendly interface. The solver includes implementations of several iterative algorithms and several pre-conditioners. The module is based on parallel multilevel incomplete *LU*-factorization of a sparse matrix in combination with incomplete block factorization of an inverse matrix. Also, there are implementations of the multilevel algebraic method for steady-state, or almost steady-state equations and the method of solving batches of linear equation systems with narrow profile matrices, including the three-diagonal ones.

The paper describes the ideas of the user interface organization in module Newt, gives a brief description of the main algorithms implemented in the module, and also presents results of numerical experiments (runtimes and parallelization efficiency data), which have been obtained by solving model test problems and production problems using KORONA code.

6-74

**НЕЯВНАЯ КОНЕЧНО-ОБЪЕМНАЯ СХЕМА  
С TVD-РЕКОНСТРУКЦИЕЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО  
РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ  
ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В P1-ПРИБЛИЖЕНИИ**

А. Д. Гаджиев, И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков

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

Уравнение переноса теплового излучения в P1-приближении представляет собой гиперболическую систему. Построение монотонной схемы второго порядка для такой системы является сложной задачей. В работе построена неявная конечно-объемная схема с TVD-реконструкцией повышенного порядка аппроксимации с улучшенными монотонными свойствами для численного моделирования переноса теплового излучения в P1-приближении. Целью работы являлось не только построение монотонной схемы второго порядка аппроксимации, но и создание быстросходящегося итерационного метода для совместного решения уравнения переноса и уравнения энергии.

**AN IMPLICIT FINITE-VOLUME TVD SCHEME  
FOR SOLVING THE 2D RADIATIVE HEAT  
TRANSFER EQUATION IN P1-APPROXIMATION**

A. D. Gadzhiev, I. S. Chubaresenko, A. A. Shestakov

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

The radiative heat transfer equation in P1 approximation is a hyperbolic system. The construction of a monotonic scheme of order two for such a system is rather challenging. We offer an implicit higher order finite-volume TVD scheme with better monotonicity for the numerical simulation of radiative heat transfer in P1 approximation. We not only constructed the scheme, but also developed a fast iterative method to simultaneously solve the heat transfer and energy equations.

6-75

**ПРОГРАММА INTERVAL-3D ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ  
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН  
С ОДНОЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ  
РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ НА ДРУГУЮ**

Н. В. Чухманов, В. И. Тарасов, И. В. Сырова

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

Появление и постоянное совершенствование быстросходящих электронных вычислительных машин (ЭВМ) привело к изменению технологии научных исследований, колоссально увеличив возможность тео-

ретического изучения, прогноза сложных физических процессов благодаря применению математического моделирования и новых численных методов, предназначенных для ЭВМ.

Решение крупных научно-технических проблем требует учета различных физических процессов. Такие исследования проводятся на основе математического описания (модели) физических процессов и последующего решения соответствующих математических задач на ЭВМ при помощи вычислительных алгоритмов. На основе этих алгоритмов создаются математические методики, которые выполняют численное моделирование различных физических процессов.

Поддержка на должном уровне возможностей по учету всех физических процессов в рамках одной математической методики является достаточно трудоемкой и сложной задачей. Как правило, каждая методика в математическом отделении РФЯЦ – ВНИИЭФ ориентирована на решение определенного класса задач, для решения которых применяются различные подходы к расчету течений среды (лагранжевый, эйлеровый, лагранжево-эйлеровый), методы решения разностных уравнений (явные и неявные), подходы к восстановлению веществ на разностной сетке (с помощью концентраций, дробных сеток, составных ячеек и т. д.) и тип пространственных сеток (структурированные или неструктурированные). При моделировании сложных задач зачастую требуется использование нескольких методик для учета всех необходимых процессов, в результате чего становится актуальным решение проблемы передачи результатов расчета, выполненного по одной методике, для продолжения счета по другой методике.

Доклад посвящен решению проблемы передачи данных с одной трехмерной расчетной сетки на другую при численном моделировании сложных физических процессов с использованием программы глобального пересчета сеточных величин InterVal-3D.

В докладе приведены основные принципы, заложенные в программу пересчета, а также реализованные методы и алгоритмы для решения проблемы передачи данных с одной расчетной сетки на другую.

Показан интерфейс программы InterVal-3D для задания параметров пересчета, описан функционал программы, позволяющий учитывать особенности различных методик.

Программа работает как на персональной ЭВМ, так и в многопроцессорном режиме на ЭВМ с распределенной памятью. Приводятся формулы для оценки эффективности распараллеливания, критерии оценки качества выполненного пересчета.

Работоспособность программы и удовлетворительное качество пересчета сеточных величин продемонстрированы на примере нескольких задач с различными типами пространственных сеток.

## INTERVAL-3D FOR GAS-DYNAMIC VALUES TRANSFER BETWEEN 3D ARBITRARY COMPUTATION GRIDS

N. V. Chukhmanov, V. I. Tarasov, I. V. Syrova

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

The high-performance computers and their development resulted in technology change of scientific research, increasing the possibility of theoretical study, prediction of complex physical processes because of the application of mathematical simulation and computer-oriented numerical methods.

The large-scale scientific and technical problems require different physical processes to be accounted. The study is carried out in terms of the mathematical description (model) of physical processes followed by computer solutions of the corresponding mathematical problems using computational algorithms. The algorithms are used to develop the mathematical techniques for numerical simulation of different physical processes.

The adequate support of account capability for all physical processes is a time consuming and challenging problem in the context of one mathematical technique. Generally, each technique in mathematical department of RFNC – VNIIEF is oriented to a certain class of problems for which different approaches are used to calculate the medium flows (Lagrangian, Eulerian, Lagrangian-Eulerian), difference equation methods (explicit and implicit), approaches to recover the materials on difference grid (using concentrations, fractional grids, composite cells, etc.) and the type of space grids (structured and unstructured). Several techniques are involved to account for all the required processes when simulating the complex problems. As a result, the problem of computational result transfer using one of the techniques is of current interest to continue the calculation using another technique.

This paper is devoted to the problem of data transfer between 3D computation grids for numerical simulation of complex physical processes using integrated re-computation program of grid values – InterVal-3D.

The paper presents the main principles of re-computation program as well as implemented methods and algorithms for data transfer problems between the computation grids.

InterVal-3D interface is shown to set the re-computation parameters, the program functional is described to account for characteristic features of different techniques.

The program enables both personal computer and distributed memory multiprocessor computer operations. Parallelization efficiency estimation formulas are given, as well as re-computation quality estimation criterion.

Program efficiency and acceptable quality of grid values re-computation are exemplified by several problems with different types of space grids.

6-76

**МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В ДОННОЙ ОБЛАСТИ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Ю. В. Грахов, В. И. Хлыбов, Р. К. Швалева

Государственный ракетный центр имени академика В. П. Ма-  
кеева, Миасс, Россия

E-mail: src@makeyev.ru

При полете по траектории за донным срезом летательных аппаратов (ЛА) образуется область со сложной вихревой картиной течения, возвратными течениями, особенно, при взаимодействии струй с внешним потоком. Исследование донных течений имеет большое значение, как для определения донного давления, так и для расчета конвективного теплообмена.

Для исследования газодинамических процессов в донной области ЛА с использованием средств вычислительной аэродинамики на основе решения уравнений Навье-Стокса конечно-объемным методом была разработана методика создания математической модели и управления процессом решения, включающая:

- метод построения расчетной сетки, соответствующей выбранной SST-модели турбулентности;
- способ задания термодинамических параметров воздуха и соплового газа;
- метод задания граничных условий и управления ими при моделировании струй двигателей;
- метод адаптации расчетной сетки с применением комплекса параметров течения: давления, числа Маха и скорости сдвиговых напряжений – для более точного выделения скачков, разрывов и зон отрыва.

Используя данную методику, были проведены расчеты донного давления многосопловой ракеты при полете на активном участке траектории. Сравнение результатов расчетов с результатами летных экспериментов показало их удовлетворительное соответствие.

Проведены исследования картины течения за коническим телом при числе Маха около 4. Визуализация расчетного донного течения сравнивалась с шпиррен изображениями, полученными в экспериментах. Качественно картины обтекания хорошо согласуются, наглядно видны характерные области течения.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности представленного метода исследования процессов в донной области ЛА.

**METHODOLOGY OF NUMERICAL MODELLING  
OF AEROGASDYNAMIC PROCESSES  
IN THE BOTTOM PART OF FLIGHT VEHICLES**

Yu. V. Grakhov, V. I. Khlybov, R. K. Shvaleva

Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Russia

E-mail: src@makeyev.ru

When a vehicle flies along its trajectory there appears an area with the complicated vortex flow pattern, in particular, when streams interact with the external flow. The study of

the bottom flows is of significant importance in analysis of both the bottom pressure and convective heat transfer.

A methodology for creation of a math model and control of the solving procedure was developed to study the gas dynamic processes in the bottom area of a Flight Vehicle (FV) with the CFD software on the basis of the finite volume solution of the Navier-Stokes equations, including:

- a method for forming a computational grid for the selected turbulence SST-model;
- a method to input the thermodynamic parameters of the air and gas flown out a nozzle;
- a method to input the boundary conditions and control them in simulation of the engine streams;
- a method to adapt the computational grid with a set of flow parameters - pressure, Mach number and the shear stress velocity – to segregate shocks, discontinuities and breakaway zones.

The bottom pressure of a multinozzle rocket in the powered flight leg was estimated with the methodology. The comparison of the computational and experimental results demonstrates their good compliance.

The flow pattern behind a conic body at Mach 4 was studied. The visualized estimated bottom flow was compared with the experimentally obtained Schieren photos. The flow patterns are in good quantitative agreement, the typical flow areas can be obviously seen.

The obtained results prove the efficiency of the presented method used to investigate processes in the FV bottom area.

6-77

**ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ  
ПОПРАВочНОГО МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ  
ДИАГОНАЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА  
ДЛЯ СОВМЕСТНОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ  
ЭНЕРГИИ И УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА  
ИЗЛУЧЕНИЯ**

А. А. Шестаков

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

Рассматриваются модификации метода выделения диагонального элемента для итерационного решения неявных конечно-разностных уравнений, аппроксимирующих нелинейную систему нестационарных дифференциальных уравнений, состоящую из уравнения переноса фотонов и уравнения энергии. Проводится теоретическое исследование скорости сходимости итераций.



### CONVERGENCE STUDY OF A CORRECTION DIAGONAL ELEMENT METHOD FOR SOLVING COUPLED ENERGY AND RADIATIVE TRANSFER EQUATIONS

A. A. Shestakov

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

The paper considers some variations of the diagonal element method for the iterative solution of implicit finite-difference equations approximating a nonlinear system of non-stationary differential photon transport and energy equations. An analytical study of iteration convergence.

---

6-78

### ОБ ОДНОЙ ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧЕ РГД НА СЖАТИЕ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ

А. С. Вершинская, Д. С. Нецветаев,  
А. В. Уракова, А. А. Шестаков

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

В работе рассмотрена новая тестовая задача, моделирующая сильное сжатие слоистой системы, состоящей из двух веществ. Достоинством данного теста является то, что расчеты, проведенные в приближении лучистой теплопроводности, в одноклассовом и многоклассовом кинетическом, P1, диффузионном приближениях, дают близкие результаты. Это позволяет на одной задаче тестировать сразу несколько приближений уравнения переноса лучистой энергии и сравнивать их между собой.

### A TEST PROBLEM ON RADIATIVE TRANSFER IN A COMPRESSED LAYERED SYSTEM IN DIFFERENT APPROXIMATIONS

A. S. Vershinskaya, D. S. Netsvetayev,  
A. V. Urakova, A. A. Shestakov

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

The paper discusses a new test problem which models a strongly compressed two-layer system. The test is useful as it gives close results in calculations in radiative heat, one- and multigroup kinetic, P1 and diffusion approximations, which makes it possible to test and compare different approximations for one problem.

6-79

### СХЕМА ГРОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ КВАЗИДИФФУЗИОННЫМ МЕТОДОМ

С. А. Грабовенская, В. В. Завьялов, А. А. Шестаков

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

В работе рассматривается новая конечно-разностная схема для численного решения нестационарной системы уравнений переноса теплового излучения квазидиффузионным методом. Для итерационного решения нелинейной системы квазидиффузионных уравнений используется ВДМ-метод. Приводятся результаты численных расчетов тестовых задач.

### GROM SCHEME FOR SOLVING RADIATIVE TRANSFER EQUATIONS BY A QUASI-DIFFUSION METHOD

S. A. Grabovenskaya, V. V. Zaviyalov, A. A. Shestakov

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

The paper considers a new finite-difference scheme for solving nonstationary heat transfer equations by the quasi-diffusion method. The solution of nonlinear quasi-diffusion equations is iterated with IDM method. Test calculations are provided.

---

6-80

### МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ВЕКТОРНЫЙ МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ ОБЛАСТЯХ

Э. П. Шурина, Д. А. Архипов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Поведение гармонического по времени электромагнитного поля описывается векторным уравнением Гельмгольца [1]. Для построения дискретного аналога реализован векторный метод конечных элементов, использующий базисные функции второго полного порядка на тетраэдральных геометрических элементах [2, 3].

Для задач геоэлектрики характерны области с внутренними границами, разделяющими разномасштабные и контрастные по электрофизическим свойствам подобласти. Наличие тонких проводящих элементов (обсаженная скважина, трещины, заполненные проводящими флюидами) приводит к необходимости построения мелкой сетки для получения решения векторного уравнения Гельмгольца, в результате размерность СЛАУ резко увеличивается, что приводит к росту объема памяти и времени счета [3].

В докладе рассматривается модифицированная вариационная постановка, учитывающая тонкий проводящий экран и дающая возможность не производить построение расчетной сетки внутри него, что позволило на порядки сократить требования к объемам памяти компьютера и сократить время решения СЛАУ.

#### Литература

1. Nedelec J. C. A New Family of Mixed Finite Elements in  $R^3$ . – In: Numer. Math., № 50, 1986, p. 97–81.
2. Webb J. P. Edge elements and what they can do for you // IEEE Transaction on magnetic, 1993, № 2, p. 1460–1465.
3. М. И. Эпов, Э. П. Шурина, Д. А. Архипов. Параллельные конечноэлементные вычислительные схемы в задачах геоэлектрики. Вычислительные технологии. Том 18, № 2, 2013. стр. 95–112.

### THE MODIFIED VECTOR FINITE ELEMENT METHOD FOR MODELING OF THREE-DIMENSIONAL ELECTROMAGNETIC FIELDS IN INHOMOGENEOUS AREAS

E. P. Shurina, D. A. Arhipov

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics  
SB RAS, Novosibirsk, Russia

The electromagnetic harmonic field is described by the vector Helmholtz equation [1]. The vector Helmholtz equation discrete analog was realized by vector finite element method with using second-order basis functions on tetrahedral geometry elements [2, 3].

The area with internal boundaries separating regions with different scale and contrasting of the electrophysical properties are characterized for geoelectrics problems. Thin conductive elements (cased borehole, cracks with conductive fluids) required creating fine grid for solving the discrete vector Helmholtz equation. So the dimension of system of linear algebraic equations (SLAE) increased and increased the memory volume and time accounts [3].

Modified variation definition taken account thin conductive screen and meshless inside of screen offered in report. Such definition allowed to reduce the requirements to the computer memory and increase time for solving SLAE.

#### References

1. Nedelec J. C. A New Family of Mixed Finite Elements in  $R^3$ . – In: Numer. Math., № 50, 1986, p. 97–81.
2. Webb J. P. Edge elements and what they can do for you // IEEE Transaction on magnetic, 1993, № 2, p. 1460–47.
3. М. И. Эпов, Э. П. Шурина, Д. А. Архипов. Parallel computational finite element schemes in problems of geoelectrics. Computational technologies. Volume 18, number 2, 2013. pp. 95–112.

### ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕНЗОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД С МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ

М. И. Эпов<sup>1</sup>, Э. П. Шурина<sup>1,2</sup>,  
Н. В. Штабель<sup>1</sup>, Е. И. Михайлова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия  
<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия  
E-mail: mik\_kat@ngs.ru, shurina@online.sinor.ru

Вычисление эффективных электрофизических характеристик сред с микровключениями является одной из актуальных задач прикладной математики во многих областях биологии, химии и физики. Структура композитной среды представляет собой матрицу и включения, которые могут различаться по форме, размерам и иметь как регулярное, так и хаотичное распределение в матрице материала.

Один из наиболее распространенных подходов к вычислению эффективных характеристик среды – нахождение некоторых средних скалярных коэффициентов по аналитическим формулам [1]. Однако такой подход не позволяет учитывать взаимодействие между включениями, которые могут значительно влиять на эффективные свойства композитного материала.

В данной работе предлагается способ вычисления эффективных электрических тензорных характеристик. Композитный материал представляется как анизотропная среда [2]. Эффективные характеристики рассматриваются как тензоры второго ранга и находятся из результатов моделирования прямой задачи в гармоническом режиме [3]. Предлагаемый в работе подход применим для широкого круга трехмерных задач электромагнетизма. Использование тензорного коэффициента позволяет полностью учитывать процессы в объекте.

Для предложенного метода определяется область применимости: находится предельно допустимая контрастность материалов «скелета» и включений. Исследуется влияние частоты на вычисленные тензорные характеристики.

#### Литература

1. Li J., Huang Y. Introduction to Metamaterials // Time-Domain Finite Element Methods for Maxwell's Equations in Metamaterials. – Springer Berlin Heidelberg, 2013.
2. Шурина Э. П., Штабель Н. В. Анализ векторных конечноэлементных аппроксимаций уравнений Максвелла в анизотропных средах // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18. – № 4. – С. 91–104.
3. Эпов М. И., Шурина Э. П., Михайлова Е. И. Моделирование электромагнитного поля в неоднородных по электрофизическим свойствам средах // Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач. – 2013. – С. 107.

**ELABORATION AND ANALYSIS  
OF THE EFFECTIVE TENSOR ELECTRICAL  
AND MAGNETIC CHARACTERISTICS  
OF HETEROGENEOUS MEDIUM  
WITH MICROINCLUSIONS**

M. I. Epov<sup>1</sup>, E. P. Shurina<sup>1,2</sup>,  
N. V. Shtabel<sup>1</sup>, E. I. Mikhailova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics  
SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

E-mail: mik\_kat@ngs.ru, shurina@online.sinor.ru

The calculation of the effective electrophysical characteristics of medium with microinclusions is one of the most important problems of applied mathematics in many areas of biology, chemistry and physics. The structure of a composite material can be considered as a matrix and inclusions which may have different shape and size, be regularly or chaotically distributed in a material matrix.

One of the most common approaches to the calculation of the effective properties of the medium is to find some average scalar coefficients by analytical formulas [1]. However this approach doesn't take into account the interaction between inclusions, which can significantly affect the effective properties of the composite material.

The approach of calculating the effective tensor electric characteristics is assumed in the paper. The composite material is considered as the anisotropic medium [2]. The effective characteristics are treated as second-rank tensors and are found from the solution of the direct problem in the harmonic mode [3]. The proposed approach can be applied for a wide range of 3D electromagnetic problems. The usage of the tensor coefficient allows us take into account all processes in an object.

The limits of possible contrast of the object's matrix and inclusion properties have been found out. The influence of the frequency on the tensor coefficient is investigated.

#### References

1. Li J., Huang Y. Introduction to Metamaterials // Time-Domain Finite Element Methods for Maxwell's Equations in Metamaterials. – Springer Berlin Heidelberg, 2013.
2. Шурина Э. П., Штабель Н. В. Анализ векторных конечноэлементных аппроксимаций уравнений Максвелла в анизотропных средах // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18. – № 4. – С. 91–104.
3. Эпов М. И., Шурина Э. П., Михайлова Е. И. Моделирование электромагнитного поля в неоднородных по электрофизическим свойствам средах // Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач. – 2013. – С. 107.

6-82

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА  
В РОТОРЕ МОДЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ  
ЦЕНТРИФУГИ ИГУАССУ**

Ю. В. Янилкин, В. П. Стаценко, Ю. Д. Чернышев,  
О. О. Топорова, В. Ю. Колобянин, И. Ю. Турутина,  
С. П. Беляев, А. С. Дмитриева

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

В докладе рассматриваются задачи обтекания газоотборника в отборной камере газовой центрифуги (ГЦ) рабочим газом – гексафторидом урана UF<sub>6</sub>. Для решения этой задачи предложена физико-математическая модель и численная методика, в которой учитывается газодинамическое движение рабочего газа, а также конвективный перенос тепла в нем. В модели рассматривается полная (с учетом теплопроводности) модель теплопереноса в газе и отборнике, а также вязкого теплообмена между газом и стенками ГЦ.

Методика реализована в рамках кода ЭГАК. Были модифицированы, разработаны и реализованы следующие программы:

- Программа расчета движения вязкого газа.
- Программа сглаживания скоростей с учетом сохранения момента импульса.
- Программа расчета теплопроводности с учетом граничных условий.
- Программа расчета диффузии компонентов.
- Программа, реализующая циклические граничные условия.
- Программы, реализующие втекание и вытекание газа через кольцевые щели в диафрагмах и в блоке питания.
- Программы расчета цилиндрических сеток и начальных данных на этих сетках.
- Программа построения внешней части реального отборника.
- Программы распараллеливания и связи областей 3D и 2D течений (отборная и разделительная камеры) и др.

Приводятся результаты расчетов нескольких модельных задач, которые находятся в удовлетворительном согласии с известными или полученными в данной работе аналитическими решениями.

**NUMERICAL SIMULATION OF A 3D GAS FLOW  
IN BOWL OF THE IGUASSU MODEL GAS  
CENTRIFUGE**

Yu. V. Yanilkin, V. P. Statsenko, Yu. D. Chernyshev,  
O. O. Toporova, V. Yu. Kolobyanin, I. Yu. Turutina,  
S. P. Belyaev, A. S. Dmitrieva

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

The paper considers the problem of a working gas flow (uranium hexafluoride, UF<sub>6</sub>) around a gas sampler in the gas centrifuge's (GC) sample chamber. The paper offers

a physico-mathematical model and a numerical technique that allow accounting for the gas-dynamic motion of the working gas and convective heat transfer in it. The paper describes the full model of the heat transfer process in the working gas and sampler (with regard to heat conductivity), as well as the viscous heat exchange between the gas and GC walls.

The numerical technique has been implemented in EGAK code. The following programs have been developed, modified, and implemented:

- a program for the viscous gas motion simulation;
- a program for smoothing velocities with regard to angular momentum conservation;
- a program for heat conductivity simulations with regard to boundary conditions;
- a program for diffusion of materials;
- a program, which implements cyclic boundary conditions;
- programs, which implement the gas inflow/outflow through annular slits in membranes and a power supply unit;
- programs for calculating cylindrical grids and initial data on these grids;
- a program for constructing the outer part of a real gas sampler;
- programs for parallelizing and linking domains of 3D and 2D flows (a sampling chamber and a separating chamber), etc.

The paper gives results of simulations for several model problems, which are in a good agreement with the earlier known analytical solutions and those obtained in the present work.

---

6-83

### КОД ЭГИДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

Ю. В. Янилкин, С. П. Беляев, В. Ю. Колобянин,  
А. В. Городничев, А. Р. Гужова, Л. И. Дегтяренко,  
Н. П. Интяпина, В. Г. Куделькин, С. А. Линяев,  
Д. В. Логинов, А. Л. Потехин, Е. В. Потехина,  
А. С. Разумков, А. Л. Стадник, В. И. Тарасов,  
О. О. Топорова, И. Ю. Турутина, В. М. Шабуров

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

Код ЭГИДА, разработанный в ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», предлагается для выполнения расчетно-теоретических исследований в фундаментальных и прикладных областях науки и для преподавания в ВУЗах страны. Он предназначен для моделирования двумерных и трехмерных задач, прежде всего связанных с ударно-волновыми течениями многокомпонентной среды. Код реализован на высокопараллельных ЭВМ, базируется на передовых научно-методических положениях и методах, разработанных в математическом отделении «РФЯЦ – ВНИИЭФ».

Основные элементы кода ЭГИДА:

- решатель, включающий в себя программы расчета газодинамических течений сжимаемой среды с учетом сопутствующих процессов, таких как упругопластика, детонация и горение ВВ, разрушение и фрагментация материалов, турбулентное перемешивание и др.;
- препроцессор, представляющий собой программы для расчета начальных данных;
- постпроцессор – программы для обработки и визуализации результатов расчетов.

Код обладает особенностями, выделяющими его среди известных аналогов. Это: использование неподвижной адаптивно-встраиваемой счетной сетки; высокоточные оригинальные методы расчета движения контактных границ; замыкающие соотношения, ориентированные на отечественные материалы; широкий набор моделируемых процессов и решаемых задач; русскоязычный интерфейс; наличие возможности программирования дополнительных счетных модулей; почти полная самодостаточность кода, для его работы требуются лишь САД системы; невысокая стоимость программного продукта.

Основные классы решаемых по коду задач:

- формирование компактных элементов;
- формирование кумулятивных струй;
- пробивание и соударение различных конструкций с преградами;
- разрушение и фрагментация элементов конструкций;
- определение поражающего действия взрывов в различных средах;
- турбулентные течения жидкостей и газов, истечение газов из резервуаров;
- лабораторные опыты по исследованию ВВ, моделей разрушения и др.

Классы задач не ограничиваются данным списком, он может быть расширен за счет возможности дополнительного программирования непосредственно пользователями кода.

### CODE EGIDA FOR 2D AND 3D CONTINUUM MECHANICS SIMULATIONS

Yu. V. Yanilkin, S. P. Belyaev, V. Yu. Kolobyanin,  
A. V. Gorodnichev, A. R. Guzhova, L. I. Degtyarenko,  
N. P. Intyapina, V. G. Kudel'kin, S. A. Linyaev,  
D. V. Loginov, A. L. Potekhin, E. V. Potekhina,  
A. S. Razumkov, A. L. Stadnik, V. I. Tarasov,  
O. O. Toporova, I. Yu. Turutina, V. M. Shaburov

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

Code EGIDA developed at FSUE “RFNC – VNIIEF” is suggested for theoretical and computational studies in fundamental and applied sciences, as well as for teaching at higher education schools of Russia. It is intended for the simulation of 2D and 3D problems and, first of all, for those with shock-induced multicomponent fluid flows. The code has been implemented on massively parallel computers and is based on the advanced scientific methodological applica-

tions and methods developed at the RFNC – VNIIEF Department of Mathematics.

The main components of EGIDA are, as follows:

- a solver, which includes programs for compressible gas dynamic flows with regard to the accompanying processes, such as elasto-plasticity, HE detonation and combustion, material fracture and fragmentation, turbulent mixing, etc.;
- a pre-processor, which is a set of programs for the calculation of initial data;
- a post-processor, which is a set of programs for processing and visual representation of results.

The code has some specific features owing to which it differs from the known analogs, namely: an immovable adaptable computational grid, high-precision original schemes for the simulation of moving interfaces; closing relations oriented to our domestic materials; a wide range of processes and problems that can be simulated; a user interface in Russian; a capability of programming additional computational modules; almost absolute self-sufficiency (only CAD systems are required to operate the code); and a low cost of the software product.

The main classes of problems that can be solved using the code:

- generation of small-size components;
- generation of shaped jets;
- impacting and penetrating through various structures with barriers;
- fracture and fragmentation of structural components;
- identification of the destructive effects of explosions in different media;
- turbulent flows of fluids and gases, gas flows out of reservoirs;
- laboratory experiments to study the behavior of HEs, models of fracture, etc.

Problems that can be solved with the code are not limited by the list above and the code users can extend it owing to additional programming.

одиночных вакансий, среднего объема вакансионных кластеров, среднего диаметра междоузельных петель, концентрации петель со средним диаметром и концентрации пор со средним объёмом. Для этих переменных получена система из шести обыкновенных дифференциальных уравнений, которая решается численно с помощью пакета Mathematica. В качестве входных параметров в данной модели используются параметры материалов (такие как коэффициенты диффузии междоузлий и вакансий), полученные ранее рядом авторов в экспериментах и численных расчетах [1–5].

Проведено сопоставление расчетных данных с экспериментами по облучению чистого железа [6–8], чистого молибдена [5] и сплава Fe-Cr (Fe-8at%Cr для тонких плёнок [6, 7] и Fe-12,5at%Cr для объемного образца [9]). Для случая тонких пленок чистого железа и объемного образца Fe-12,5at%Cr получено удовлетворительное согласие расчетов с экспериментами. Также обсуждены возможные причины различий между расчетными и экспериментальными данными.

Проведены расчеты методом кластерной динамики, реализованной средствами кода SPPARKS. При надлежащем выборе входных параметров получено хорошее согласие с экспериментами и с расчетами других авторов. Обсуждаются преимущества и недостатки двух рассмотренных методов: кинетической модели со средними размерами и кластерной динамики. Основным преимуществом кинетической модели является возможность быстро моделировать большие времена или дозы облучения, но основным недостатком является невозможность оперировать с распределением кластеров по размерам и задавать различные коэффициенты диффузии для различных кластеров.

#### A KINETIC MODEL OF ACCUMULATION OF RADIATIONAL DEFECTS IN PURE METALS AND IN FE-CR ALLOY AND COMPARISON WITH CLUSTER DYNAMICS

M. Yu. Romashka, A. V. Yanilkin

FSUE All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA),  
Moscow, Russia

E-mail: michaelromashka@gmail.com

A kinetic model of accumulation of point defects and their clusters in pure Fe and Mo and in Fe-Cr alloy under irradiation is developed. The model operates with mean sizes of interstitial loops and vacancy clusters. The model allows to investigate the dependence on time (or on irradiation dose) of six variables: vacancy and interstitial concentrations, mean sizes of vacancy and interstitial clusters and concentrations of mean-sized vacancy and interstitial clusters. For these variables a system of six ordinary differential equations is obtained, which is solved numerically by Mathematica code. As input data, the material parameters are used that are obtained by several authors in experiments and numerical calculations [1-5].

The results of numerical calculations are compared with experiments on irradiation of pure iron [6–8], molybdenum [5] and Fe-Cr alloy (thin films of Fe-8at%Cr [6, 7] and bulk of Fe-12,5at%Cr [9]). For the cases of thin films of pure iron and bulk of Fe-12,5at%Cr alloy a satisfactory agreement of

---

6-84

#### КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ЧИСТЫХ МЕТАЛЛАХ И СПЛАВЕ FE-CR И СОПОСТАВЛЕНИЕ С КЛАСТЕРНОЙ ДИНАМИКОЙ

М. Ю. Ромашка, А. В. Янилкин

ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт  
автоматики им. Н. Л. Духова (ВНИИА), Москва, Россия

E-mail: michaelromashka@gmail.com

Разработана кинетическая модель накопления точечных дефектов и их кластеров в чистых металлах Fe и Mo и в сплаве Fe-Cr при облучении высокоэнергичными частицами. Данная модель оперирует со средними размерами междоузельных петель и вакансионных кластеров (пор). Модель позволяет изучать зависимость от времени (или от дозы облучения) шести переменных: концентрации одиночных междоузлий, концентрации

calculations and experiments is obtained. Possible reasons of distinctions between calculations and experiments are discussed.

We have also carried out calculations by the method of cluster dynamics by means of SPPARKS code and compared them with the results of calculations by mean-size operating model, with experiments and calculations of other authors. With appropriate values of input parameters, cluster dynamics gives a good agreement with experiments and calculations of other authors, and, in particular cases, with our mean-size operating model. Advantages and disadvantages of the two numerical methods are discussed. The main advantage of our kinetic model is the ability of fast calculations on large time scales, and the main disadvantage is inability of operation with cluster size distribution and setting different diffusion coefficients for clusters of different sizes.

### References

1. Takaki S., Fuss J., Kugler H., Dedek U., Schultz H. The resistivity recovery of high purity and carbon doped iron following low temperature electron irradiation. // *Radiation Effects*. – 1983. – Vol. 79. – P. 87–122.
2. Fu C.-C., Dalla Torre J., Willaime F., Bocquet J.-L., Barbu A. Multiscale modelling of defect kinetics in irradiated iron. // *Nature Materials*, January 2005. – Vol. 4. – P. 68–74.
3. Dalla Torre J., Fu C.-C., Willaime F., Barbu A., Bocquet J.-L. Resistivity recovery simulations of electron-irradiated iron: Kinetic Monte Carlo versus cluster dynamics. // *Journal of Nuclear Materials*, 352 (2006), pp. 42–49.
4. Terentyev D., Castin N., Ortiz C. J. Correlated recombination and annealing of point defects in dilute and concentrated Fe-Cr alloys. // *J. Phys.: Condens. Matter* **24** (2012) 475404 (14 pp).
5. Xu D., Wirth B. D., Li M., Kirk M. A. Combining in situ transmission electron microscopy irradiation experiments with cluster dynamics modeling to study nanoscale defect agglomeration in structural metals. // *Acta Materialia*, 60 (2012), 4286–4302.
6. Yao Z., Hernandez-Mayoral M., Jenkins M. L., Kirk M. A. Heavy-ion irradiations of Fe and Fe-Cr model alloys Part 1: Damage evolution in thin-foils at lower doses. // *Philosophical Magazine*. – 2008. – Vol. 88, No. 21. – P. 2851–2880.
7. Hernandez-Mayoral M., Yao Z., Jenkins M. L., Kirk M. A. Heavy-ion irradiations of Fe and Fe-Cr model alloys Part 2: Damage evolution in thin-foils at higher doses. // *Philosophical Magazine*. – 2008. – Vol. 88, No. 21. – P. 2881–2897.
8. Gokhman A., Bergner F. Cluster dynamics simulation of point defect clusters in neutron irradiated pure iron. // *Radiation Effects & Defects in Solids: Incorporating Plasma Science & Plasma Technology*, March 2010. – Vol. 165, No. 3 – P. 216–226.
9. Gokhman A., Ulbricht A., Birkenheuer U., Bergner F. Cluster dynamics study of neutron irradiation induced defects in Fe-12.5at%Cr alloy. // *Solid State Phenomena*. – 2011. – Vol. 172–174. – P. 449–457.

## МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРАМ КЛАСТЕРОВ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В КАСКАДАХ ПРИ НЕЙТРОННОМ И ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ, И ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ КЛАСТЕРОВ

М. Ю. Ромашка, А. В. Янилкин

ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт  
автоматики им. Н. Л. Духова (ВНИИА), Москва, Россия

E-mail: michaelromashka@gmail.com

Предложена модель распределения по размерам кластеров точечных дефектов, образующихся в каскадах смещений атомов при нейтронном и ионном облучении металлов. Согласно этой модели, доли дефектов, входящих в состав кластеров различного размера, образуют убывающую геометрическую прогрессию (убывают с ростом размера кластеров). Приводится обоснование этой модели и её сопоставление с результатами численного моделирования методами молекулярной динамики и кластерной динамики, полученными в работе [1] и ссылках внутри и в наших расчётах.

Обсуждается проблема выбора коэффициентов диффузии междоузельных кластеров различного размера при моделировании накопления радиационного повреждения в конструкционных материалах методом кластерной динамики. Как показывают наши расчёты и расчёты других авторов (напр. [1]), кластерная динамика чувствительна к скоростям генерации кластеров различного размера в каскадах и коэффициентам диффузии кластеров, поскольку необходим учёт баланса между генерацией кластеров и их уходом на различные стоки. Однако, вычисление коэффициентов диффузии кластеров сопряжено с рядом трудностей. Молекулярно-динамические расчёты (напр. [2]) дают значения коэффициентов диффузии, которые, как показывают дальнейшие расчёты с помощью кластерной динамики, являются завышенными. Обсуждаются причины этого расхождения и возможные пути его устранения. Выдвинуто и обосновано предположение о том, что главной причиной расхождения является многообразие форм кластеров, возникающих при слиянии более мелких кластеров (кластеры с одним и тем же числом междоузлий могут иметь различные конфигурации).

**A MODEL OF SIZE DISTRIBUTION  
OF POINT DEFECT CLUSTERS GENERATING  
IN CASCADES UNDER NEUTRON  
AND ION IRRADIATION AND  
THE PROBLEM OF CALCULATION  
OF CLUSTER DIFFUSION COEFFICIENTS**

M. Yu. Romashka, A. V. Yanilkin

FSUE All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA),  
Moscow, Russia

E-mail: michaelromashka@gmail.com

6-86

**КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ДИФФУЗИИ В СПЛАВАХ  
НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО**

А. Ю. Куксин, В. А. Хлебников, А. В. Янилкин

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

E-mail: breadoff@gmail.com

A model of size distribution of point defect clusters generating in cascades under neutron and ion irradiation of metals is presented. According to this model, parts of defects that are included into clusters of different sizes form a decreasing geometrical progression (decrease with increasing of cluster size). Grounds of this model and comparison with some numerical calculations by means of molecular dynamics and cluster dynamics, that are obtained in our work and in [1] and references therein, are given.

The problem of choice of diffusion coefficients for interstitial clusters of different sizes for modeling of accumulation of radiation damage in structural metals by means of cluster dynamics is discussed. As is shown in our work and by some other authors (e.g. [1]), cluster dynamics is sensitive to the rates of production of defect clusters of various sizes and their diffusion coefficients, because an account of the balance between generation of clusters and their sink to various sinks is necessary. However, calculation of cluster diffusion coefficients meets some difficulties. Molecular dynamical calculations (e.g. [2]) yield some values of diffusion coefficients that appear to be too large according to further calculations by cluster dynamics. Possible reasons of this contradiction and ways of its resolution are discussed. A supposition is put forward that the main reason of the contradiction is variety of forms of clusters originated from confluence of more little clusters (clusters with the same number of interstitials can have different configurations).

**References**

1. D. Xu, B. D. Wirth, M. Li, M. A. Kirk. Combining in situ transmission electron microscopy irradiation experiments with cluster dynamics modeling to study nanoscale defect agglomeration in structural metals. // *Acta Materialia*, 60 (2012), 4286–4302.
2. D. A. Terentyev, L. Malerba, M. Hou. Dimensionality of interstitial cluster motion in bcc-Fe. // *Phys. Rev. B.* – 2007. – 75, 104–108.

Методы компьютерного материаловедения позволяют с некоторой степенью точности предсказывать поведение материалов заданного состава в конкретных внешних условиях. Это дает возможность оптимизировать процесс разработки конструкционных материалов с желаемыми характеристиками. В настоящее время активно развивается так называемый многомасштабный подход. Для моделирования явлений на масштабе много большем межатомных расстояний, но, в то же время, много меньшем размера образца в целом используют метод кинетического Монте-Карло. Он позволяет описывать редкие по сравнению с частотой колебаний атомов решетки процессы, при этом различая формирующуюся микроструктуру. Метод представляет собой последовательность случайных выборов из заранее определенного списка возможных элементарных процессов, причем вероятность выбора пропорциональна темпу процесса. Список существенных процессов вместе с их темпами и составляют суть физической модели явления.

Для описания явлений связанных с диффузией точечных дефектов и примесей в сложных сплавах нами разрабатывается модель, основанная на представлении о парных взаимодействиях атомов на жесткой кристаллической решетке. Модель встраивается в свободно распространяющийся код SPPARKS для параллельных вычислений методом Монте-Карло на жесткой кристаллической решетке. Элементарными процессами являются температурные переходы вакансий на место ближайшего атома либо перемещение межузельного атома. При этом энергии активации (а вместе с ними вероятности/темпы) процессов зависят от локального окружения. Модель позволяет описывать динамику осаждения примесей, процессы образования пор и дислокационных петель. Энергии парных взаимодействий выражаются через такие величины как энергия когезии, энергия растворения, различные энергии связи, которые вычисляются из первых принципов, частично берутся из экспериментов. При численном моделировании является степень влияния различных энергетических параметров, а так же температуры и концентрации примесей на процессы диффузии, роста неоднородностей, изменения локального состава сплава. Работая в параллельном режиме, программа воспроизводит результаты многочасовых экспериментов по отжигу дефектов, описывает накопление радиационной поврежденности вплоть до сотых дра.

## KINETIC MODEL OF DIFFUSION IN ALLOYS ON THE BASIS OF THE MONTE-CARLO METHOD

A. Yu. Kuksin, V. A. Khlebnikov, A. V. Yanilkin

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: breadoff@gmail.com

Numerical methods being used in material science allow one to forecast the behaviour and properties of a specimen of specified composition in concrete environment. These methods give an opportunity to optimize the engineering process of development structural materials with desired properties. To have a step-by-step simulation of rare processes it is convenient to use kinetic Monte-Carlo method which is thus allow to distinguish the emerging structure. The idea is to choose randomly and perform a sequence of events from a predetermined list of elementary processes. The probability of each selection is proportional to corresponding event rate. The list of substantial processes together with their rates represent the essence of a physical model of a phenomenon.

We develop a physical model of point-like defect diffusion in multi-component alloy with pair interactions between atoms and apply it into free distributed parallel kinetic Monte-Carlo simulator on rigid lattice named SPPARKS. Thermal activated transitions of atoms to vacant sites (both for on-lattice and interstitial atoms) as well as spontaneous formation of Frenkel pairs due to external radioactivity are possible classes of elementary events. The activation energy of a particular thermal process (and thus its probability/rate) depends on the atoms neighborhood. The precipitation dynamics, the pores and dislocation loops growth can be described in the framework of our model. The pair interaction energies are expressed through such quantities as the cohesive energy, the mixing energy and different binding energies which are gathered from ab initio calculations or partially are taken from experiments. Numerical simulations allow to reveal the impact of different parameters (energies, temperature, impurities concentration and irradiation intensity) on the diffusion process, the inhomogeneities growth, the variations in the local alloy composition. Working in parallel mode, the program reproduces the results of lengthy (few hours) experiments on the steels annealing, describes the accumulation of radiation damage up to hundredths of dpa.

ти неразрешенных резонансов (URR) можно получить, например, в программе C-007 [1]. Объем этих данных большой и оценивается примерно в  $10^6$  чисел на каждую реакцию. Такие объемы данных могут порождать проблемы при решении задач переноса нейтронов методом Монте-Карло. Существуют различные способы решения проблемы. Например, широко используются метод вероятностных таблиц. В докладе рассматривается подход, который был применен на практике при сокращении сечений в области разрешенных резонансов (RRR) [2]. Метод заключается в использовании функции распределения вероятности сечений  $P(\sigma)$  при преобразовании резонансных сечений  $\sigma(E)$  в эффективные поточечные монотонные сечения  $\sigma'(E)$  на некотором наборе интервалов энергии  $[E_i, E_{i+1}]$ . При этом преобразовании обоим сечениям  $\sigma_i(E)$  и  $\sigma'_i(E)$  соответствует одно и тоже распределение  $P_i(\sigma)$ . Далее монотонные сечения  $\sigma'_i(E)$  сокращаются в пределах допустимой погрешности (например,  $\text{eps} = 0,1\%$ ,  $\text{abs} = 0,1 \text{ mb}$ ). Сохранение  $P_i(\sigma)$  позволяет на каждом интервале  $[E_i, E_{i+1}]$  сохранять такие важные характеристики взаимодействия нейтронов с веществом как среднее сечение, средняя длина пробега и др. На рисунке 1 приведены  $\sigma(E)$  и  $\sigma'(E)$  для Fe.

Для построения поточечных сечений в области URR воспользуемся вероятностными таблицами  $P(\sigma_{tot})$  и средними сечениями  $\bar{\sigma}_{el}(\sigma_{tot})$ ,  $\bar{\sigma}_{cap}(\sigma_{tot})$  и  $\bar{\sigma}_{fis}(\sigma_{tot})$ , которые можно рассчитать по программе PURR из комплекса NJOY. Далее, по аналогии с областью RRR, область URR разбивается на энергетические интервалы  $[E_i, E_{i+1}]$ . На каждом интервале вычисляется  $\sigma'_{tot}(E)$  и сечения  $\bar{\sigma}_{el}(\sigma'_{tot})$ ,  $\bar{\sigma}_{cap}(\sigma'_{tot})$  и  $\bar{\sigma}_{fis}(\sigma'_{tot})$ . На рисунке 2 приведены эффективные сечения для  $^{238}\text{U}$  для областей RRR ( $E < 10 \text{ keV}$ ) и URR ( $10 \text{ keV} < E < 149 \text{ keV}$ ).

6-87

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОТОЧЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРЕШЕННЫХ РЕЗОНАНСОВ

В. М. Шмаков, Е. А. Глазков, Е. И. Черепанова,

Г. В. Орлов, Е. Ф. Гордейчук

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

Поточечные нейтронные сечения упругого рассеяния, поглощения, деления и полного сечения в облас-

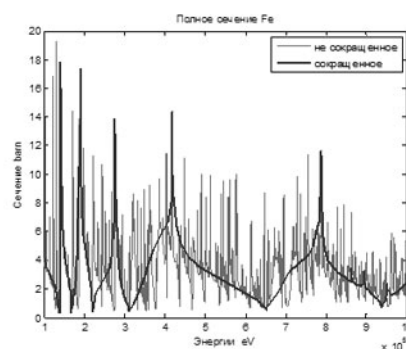


Рис. 1

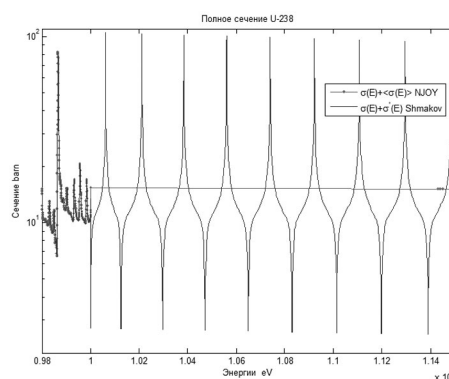


Рис. 2



Расчеты двух задач из [1] показали хорошее согласие результатов с использованием предложенного способа по программе ПРИЗМА и результатов с использованием таблиц вероятностей по программе МСНР.

### Литература

1. А. Г. Малькин, Н. В. Иванов. Учет неразрешенных резонансов в методике С-007. // Сборник докладов межведомственных семинаров «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» («НЕЙТРОНИКА-2012»). Обнинск, 2012, Том 2. С. 343.
2. V. M. Shmakov, E. I. Cherepanova et al. Possibility of Accuracy Conservation in Monte Carlo Calculations Using Thinned Files of Nuclear Data // Proceedings of The Fifth International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, May 9–13, 1994, Gatlinburg, TN, USA. Vol. 2, p. 822.

2. Kanel' G. I., Razorenov A. A., Utkin A. V., Baumung K., Experimental profiles of shock waves, Preprint of Scientific Association IVTAN of RAS. 1996.
3. Barker L. M., Hollenbach R. E. Shock-Wave Studies of PMMA, Fused Silica, and Sapphire // J. Appl. Phys. – 1970. 41, № 10.
4. Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В. // УФН. – 2007. – 177, № 8.
5. Ломоносов И. В., Фортвов В. Е., Хищенко К. В. // Хим. физика. – 1995. – Т. 14, № 1. – С. 47.
6. Khishchenko K. V., Lomonosov I. V., Fortov V. E. // Shock Compression of Condensed Matter – 1995. New York: AIP Press, 1996. – P. 125.

### MODELING OF THE SHOCK WAVES PROPAGATION IN POLYMERIC MATERIALS

T. V. Popova<sup>1</sup>, A. E. Mayer, K. V. Khishchenko

<sup>1</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: tatyana\_maskaeva@mail.ru

6-88

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПО ПОЛИМЕРНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Т. В. Попова<sup>1</sup>, А. Е. Майер, К. В. Хищенко

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Челябинский государственный университет», Челябинск, Россия

E-mail: tatyana\_maskaeva@mail.ru

Полимерные материалы имеют широкое распространение в природе и технике, что обуславливает необходимость исследований их свойств. Многим физическим явлениям, связанным с динамической деформацией полимерных материалов, сопутствует формирование и взаимодействие ударных волн. Техника ударных волн является мощным инструментом изучения свойств материалов при экстремально высоких скоростях деформирования с хорошо контролируемыми условиями нагружения.

Поведение полимерных материалов можно классифицировать как вязкоупругое. К настоящему времени известны модели вязкоупругости, которые были предложены Максвеллом, Фойгтом и Кельвином [1], пригодные для описания полимерных материалов. В докладе на основе моделей Максвелла, Фойгта и Кельвина проводится моделирование высокоскоростного соударения плоских пластин ПММА, а также эпоксидной смолы, представлены результаты сравнения численных расчетов с экспериментальными данными [2–4]. Для расчета зависимости давления от плотности и внутренне энергии используется уравнение состояния [5, 6]. Рассмотрено распространение и затухание ударных волн в тонких пленках полимеров.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации (№ МД-286.2014.1).

### Литература

1. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопrotивление материалов: Учебное пособие. – М.: Наука. 1986. – 560 с.

Polymeric materials are widespread in nature and technology, which makes it necessary to research their properties. Many physical phenomena associated with the dynamic deformation of polymeric materials accompanied by the formation and interaction of shock waves. The shock waves technique is a powerful tool for studying of the material properties at extremely high strain rates with well-controlled loading conditions.

Behavior of polymeric materials can be classified as a viscoelastic. To date, there are several well-known models of viscoelasticity proposed by Maxwell, Voigt and Kelvin [1], which are suitable for the description of polymer materials. Simulation of high-velocity impact of flat plates of PMMA and epoxy resin based on models of Maxwell, Kelvin and Voigt are presented in this report; the calculated results are compared with experimental data [2–4]. Wide-range equations of state [5, 6] are used to calculate the dependence of pressure of the density and internal energy. Propagation and attenuation of shock waves in thin polymer films are analyzed.

This work was supported by grants from the President of the Russian Federation (№ MD-286.2014.1).

### References

1. Birger I. A., Mavlyutov R. R., Resistance of Materials: Textbook [in Russian], Nauka, Moscow. 1986. – 560 c.
2. Kanel' G. I., Razorenov A. A., Utkin A. V., Baumung K., Experimental profiles of shock waves, Preprint of Scientific Association IVTAN of RAS, 1996.
3. Barker L. M., Hollenbach R. E. // J. Appl. Phys. – 1970. – 41, № 10.
4. Kanel G. I., Fortov V. E., Razorenov S. V. // Phys. Usp. – 2007. – 50, 771–791.
5. Lomonosov I. V., Fortov V. E., Khishchenko K. V. Chem Phys. Rep. 1995. – Vol. 14.
6. Khishchenko K. V., Lomonosov I. V., Fortov V. E. // Shock Compression of Condensed Matter – 1995. New York: AIP Press, 1996. – P. 125.

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

Абботт Д. 66  
Абросимов С. А. 208  
Авраменко М. И. 7, 149  
Аганин А. А. 13, 281  
Агафонов Г. Л. 104, 131  
Агранат М. Б. 158  
Адуев Б. П. 73, 83  
Алдошин С. М. 79  
Александров В. В. 161  
Алиев З. Г. 79  
Аминов Ю. А. 93, 125  
Ананьев С. Ю. 180  
Ананьин Д. О. 147  
Андреев А. М. 48, 51  
Андреев Е. С. 149  
Андреевских Л. А. 124  
Андронов И. Н. 264  
Аникин Н. Б. 48, 252, 253  
Анисимов А. Н. 189, 201  
Анисичкин В. Ф. 13, 181  
Анучин Максим Г. 273  
Анучин Михаил Г. 273  
Анчаров А. И. 219  
Ардашева Л. И. 149  
Аринин В. А. 237  
Аристов С. Н. 319  
Артемова Н. А. 327  
Архипов Д. А. 337  
Астафурова М. В. 174  
Астафуров В. И. 174  
Астафьев В. В. 189, 218  
Асташинский В. М. 172  
Атрошкин В. В. 84  
Аульченко В. М. 125  
Аушев А. А. 56  
Афанасьева С. А. 182  
Ахлюстин И. А. 74, 118, 132  
Ахметзянов А. И. 122, 274  
Ахметов А. Р. 50  
Ахметшин Р. Г. 74, 112

### Б

Бадретдинова Л. Х. 75, 76, 119  
Бадюков Д. Д. 21, 53  
Бажулин А. П. 208  
Базаров П. С. 45  
Базотов В. Я. 94, 122, 129  
Байдаков В. Г. 222, 229  
Байшев А. И. 51  
Балабин С. И. 253, 254  
Баландина А. Н. 213  
Баландин В. В. 187  
Банникова И. А. 38  
Банников М. М. 132  
Баранник Д. А. 77  
Барахвостов С. В. 163, 165  
Баренбаум А. А. 14  
Бармин А. В. 78

Батуев С. П. 319, 320  
Баутин К. В. 65  
Баутин С. П. 65, 275  
Башуров В. В. 276, 292  
Баяндин Ю. В. 277, 322  
Беленовский Ю. А. 74, 80  
Белов Н. Н. 182  
Белокрыс-Федотов А. И. 301  
Белоногова Е. А. 244, 255  
Белоногов М. Н. 246  
Бельхеева Р. К. 184  
Беляев В. С. 145  
Беляев С. П. 339, 340  
Беляков В. И. 99  
Березанский И. В. 325  
Березина Н. А. 298  
Бессараб А. В. 147  
Бикеев А. С. 245  
Билалов Д. А. 185, 226  
Бисикало Д. В. 287, 292  
Богданов А. Н. 64  
Бодров А. С. 290  
Бойко М. М. 85  
Большаков А. П. 208  
Бондаренко Г. А. 147  
Бондарчук Г. Г. 206  
Бордзиловский С. А. 116  
Борисевич В. Д. 264  
Борисов Е. С. 173  
Бородин И. Н. 186, 211  
Борщевский А. О. 237  
Борщевский М. А. 264  
Ботов Е. В. 56  
Боярников Д. С. 209  
Брагов А. М. 187  
Бражников М. А. 87  
Брантов А. В. 153, 154  
Брезгина Л. П. 206, 278  
Бричиков С. А. 55, 188, 206, 235  
Бродова И. Г. 189, 218, 226  
Бронина Т. Н. 327  
Брянт Е. 66  
Бугаенко И. Л. 15, 48, 253, 254  
Бураков Б. Е. 263  
Буркин В. В. 182  
Бурученко С. К. 279  
Бурцев В. В. 237  
Бутусов Е. И. 232  
Быченков В. Ю. 153, 154

### В

Вавилова И. Г. 252  
Важенин А. В. 258, 259  
Валеева О. В. 252  
Вальгер С. А. 282  
Ван Г. 63, 179  
Варфоломеев Д. А. 89, 96, 188, 235, 294  
Васильев А. А. 214  
Васильева А. А. 79  
Васильев А. В. 129

Васильев А. Н. 47  
 Ващинкин С. А. 100  
 Вейссьер Б. 131  
 Вен И. С. 71, 72  
 Вершинская А. С. 337  
 Ветчинников М. В. 189, 201  
 Виноградов А. В. 214  
 Виноградова Ю. Ю. 250  
 Вирченко В. А. 274  
 Вихляев Д. А. 156  
 Вихорнова Т. Л. 190  
 Власов А. Н. 45  
 Власов В. В. 298, 299  
 Волкова А. Ю. 193  
 Волкова О. С. 47  
 Волков И. А. 244, 246, 265  
 Волков Н. Б. 163, 165, 191  
 Волошин Н. А. 171  
 Воробьёва М. А. 203  
 Воробьёв Ю. В. 194  
 Воронин Б. Л. 189, 201  
 Вэй С. 8, 52, 137

## Г

Гаан К. В. 26, 218, 234  
 Гаврилов Д. С. 155, 156, 173, 175  
 Гаврилов П. М. 57  
 Гаджиев А. Д. 334  
 Галахов В. Р. 196  
 Галимов Д. М. 47  
 Галиуллин И. Г. 80  
 Гамалий Е. Г. 195  
 Гапонцева Т. М. 219  
 Гаранжа В. А. 280, 301  
 Гарматина А. А. 169  
 Гафаров Б. Р. 190  
 Герасимов А. В. 15  
 Гижевский Б. А. 196  
 Гиззатуллина Р. Ф. 54  
 Гладуш М. Г. 140  
 Глазков Е. А. 344  
 Глазырин В. П. 67  
 Глазырин И. В. 7, 34, 155, 254, 310  
 Глазырин С. И. 17, 23  
 Глущенко А. Г. 84  
 Говрас Е. А. 154  
 Голиков А. Р. 252  
 Голованов А. Н. 47  
 Голубев В. К. 17, 81, 82  
 Голубев М. Б. 18  
 Голубков А. Н. 199  
 Гольшев А. А. 197  
 Гончаров Е. А. 280  
 Гончаров Т. К. 79  
 Горбатенко М. В. 285  
 Гордейчук Е. Ф. 344  
 Гордиенко В. М. 169  
 Горелов А. М. 260  
 Городничев А. В. 340  
 Городничев К. Е. 18  
 Горохов С. А. 156, 171  
 Горшенков М. В. 47

Горькавый Н. Н. 21  
 Горячев Э. Ю. 260  
 Го С. Л. 71  
 Грабовенская С. А. 337  
 Грабовский Е. В. 161  
 Гранский А. А. 218, 233  
 Графутин В. И. 267  
 Грахов Ю. В. 336  
 Гребенкин К. Ф. 89, 96  
 Гречин С. С. 83  
 Грибанов Д. А. 84  
 Григорьев А. Н. 173, 253  
 Григорьев Г. С. 84, 110  
 Гринберг Б. А. 193, 198, 219, 220, 223  
 Гришин А. М. 92  
 Гроховский В. И. 19, 54  
 Грушин С. А. 189, 201  
 Грязнов В. К. 137, 140  
 Грязнов Е. Ф. 85  
 Грязных Д. А. 20  
 Губин А. С. 86, 90, 110  
 Губченко В. М. 144  
 Гударенко Л. Ф. 199  
 Гужова А. Р. 280, 340  
 Гуляева Н. И. 313  
 Гусаков А. В. 147  
 Гусева Т. С. 281  
 Гусев С. А. 190  
 Гуськов С. Ю. 146, 304  
 Гусяков В. К. 66

## Д

Давыдова Л. А. 190  
 Давыдова О. Н. 258  
 Давыдов В. Ю. 86, 90, 110, 236  
 Данилов М. Н. 282  
 Дашко Д. В. 79  
 Дегтярев А. А. 206  
 Дегтярев В. А. 189, 201  
 Дегтяренко Л. И. 340  
 Дегтярь В. Г. 9, 62  
 Дементьев О. Н. 283  
 Демина М. А. 189, 201  
 Демин В. А. 20  
 Демин В. М. 303  
 Демин Д. А. 189  
 Дерябин С. Л. 308  
 Дин Н. 8, 52, 137, 138  
 Дмитриева А. С. 339  
 Дмитриев Н. А. 331  
 Добрецов С. Л. 174  
 Добромыслов А. В. 206, 209, 228, 240  
 Долгих С. М. 26, 120  
 Долгобородов А. Ю. 87, 180  
 Долголева Г. В. 151, 284  
 Долголёва Г. В. 147  
 Доровских И. А. 244  
 Дрёмов В. В. 203, 222, 235  
 Дудкин Г. Н. 160  
 Дудоров А. Е. 21, 22, 36, 49  
 Дунаев В. Н. 80  
 Душенок С. А. 77, 79, 95, 129

Дырда Н. Д. 244, 246, 248  
Дьяков С. С. 285

## Е

Евдокимов Ю.К. 41  
Евсеева Т. П. 122  
Еганов К. В. 132  
Егоров А. П. 274  
Егоров И. Н. 285  
Егорян А. Д. 97  
Егужова М. Ю. 23, 286  
Елсуков В. П. 20, 34  
Елькин В. М. 215  
Еретнова О. В. 21, 22  
Ермолович Е. И. 115  
Ершова А. В. 310  
Ершов А. П. 13, 88

## Ж

Жаховский В. В. 159  
Жвания И. А. 169  
Жгилёв И. Н. 189  
Жгун Д. В. 114  
Жеребцов А. Л. 89, 96  
Жеребцов Д. А. 47  
Жерноклетов М. В. 199  
Жилин А. А. 48  
Жилкин А. Г. 287, 292  
Жиляева Н. С. 45, 188, 324  
Жмайло В. А. 23, 147, 286  
Жуков А. Н. 199, 239  
Жуланов В. В. 124, 125

## З

Забарко Д. А. 301  
Завадский А. О. 288  
Завьялов В. В. 337  
Загрядцкий Ф. С. 86, 90  
Зайковский В. Н. 33  
Зайцев А. В. 24, 25  
Замоздра С. Н. 21  
Заморянская М. В. 263  
Замотаев Д. Н. 213  
Замураев Д. О. 148  
Замыслов В. Е. 275  
Зарко В. Е. 74, 106  
Захаров А. И. 42  
Захаров П. П. 289  
Зверев А. С. 91, 98  
Зеленов А. Н. 39, 40  
Зелепугин А. С. 289, 290  
Зелепугин С. А. 289, 290  
Зельдович В. И. 26, 49, 233, 234  
Земсков Ю. А. 165  
Зецер Ю. И. 25  
Зилевич А. И. 167  
Зима В. П. 92  
Зимаков В. П. 152  
Зорина О. Д. 275  
Зубарева А. Н. 200  
Зубов А. Д. 291  
Зубов М. А. 291

Зуева Л. М. 245, 248, 320  
Зырянов В. В. 46

## И

Иванов М. А. 198  
Иванов М. Я. 27  
Иванов С. Н. 164  
Ивашкин В. В. 61  
Игнаткова М. Г. 201  
Игнатова О. Н. 202, 213  
Ильгамов М. А. 13, 281  
Ильницкий Д. К. 159  
Илюхин В. А. 267  
Илюхин О. В. 267  
Илюшкина Н. Ю. 56  
Имховик Н. А. 78  
Иногамов Н. А. 159  
Иноземцев А. В. 193, 223  
Интяпина Н. П. 340  
Ионов Г. В. 7, 29, 30, 31, 203, 222  
Иосилевский И. Л. 139, 140, 167, 168  
Исакова П. Б. 292  
Исмагилова Н. Ф. 292  
Исхаков Т. Н. 94  
Иткина Н. Б. 293  
Ихсанов Н. Р. 292  
Ищенко А. Н. 182

## К

Кадатский М. А. 204  
Казаков Д. Н. 205  
Казаковская Т. В. 260  
Казанцева Н. В. 204  
Казин К. И. 294  
Какшин А. Г. 155, 156, 173, 175  
Калашников Д. А. 232  
Калинин Ю. Г. 161  
Калмыков П. И. 74, 106  
Калугин М. А. 245  
Кандиев Я. З. 267  
Кандоба И. Н. 294  
Караваев А. В. 222  
Караханов С. М. 116  
Карачинский С. И. 103  
Каргин А. А. 50  
Каримов Ф. Х. 32  
Карлыханов Н. Г. 148, 149  
Карнаухов Е. И. 205  
Карнаухов Е. Н. 173  
Карпеев А. В. 7, 34, 155, 254, 310  
Карташев А. Л. 295  
Карташева М. А. 295  
Касымов Д. П. 92  
Кашаева Е. А. 245, 248  
Кашкаров А. О. 93, 111, 124, 125  
Кашуков С. В. 207  
Каякин А. А. 199  
Келлерман Д. Г. 196  
Кечин А. Г. 189, 201  
Ким В. В. 239  
Ким Д. А. 151  
Кинеловский С. А. 210

- Кириленко В. Г. 87  
 Кирющенко Н. А. 94  
 Киселев А. Б. 296, 311  
 Киселёв А. Н. 117, 132  
 Киселев В. П. 33  
 Киселев С. П. 33  
 Кискин П. Е. 95  
 Клапётке Т. М. 81  
 Клёнов А. И. 237  
 Климов М. И. 297  
 Клиначева Н. Л. 297  
 Ковалев Е. О. 206  
 Ковалев Ю. М. 297, 316  
 Ковальчук Б. М. 160  
 Кожевников В. Г. 78, 115  
 Кожевников Д. Г. 172  
 Козелков О. Е. 205  
 Козлов Е. А. 54, 55, 188, 206, 209, 228, 229, 235, 237, 238, 240, 324  
 Козлов П. А. 275  
 Козманов М. Ю. 149  
 Козьмин И. В. 294  
 Кокшенев В. А. 160  
 Колесников П. А. 50  
 Колобянин В. Ю. 280, 300, 339, 340  
 Колосов В. Ю. 204  
 Колпаков В. И. 84, 85  
 Колхидашвили М. Р. 252  
 Кольчугин С. В. 298  
 Кондрохина И. Н. 213  
 Коновалов А. Б. 298, 299  
 Конов В. И. 208  
 Константинов А. Ю. 187  
 Копаница Д. Г. 320  
 Копкин С. В. 189, 201  
 Косолапова Л. А. 281  
 Костицын О. В. 74, 76, 80, 93, 96, 117, 118, 119, 121, 122, 125  
 Костюченко В. И. 256  
 Котенев В. П. 301  
 Котова О. Г. 34, 155, 254  
 Котов В. Л. 187  
 Котомин А. А. 77, 79, 129  
 Кочетков И. И. 95  
 Кочетова О. М. 25  
 Кочутин Д. В. 96  
 Кошелева Е. В. 224, 230  
 Крайко А. Н. 97  
 Красников В. С. 207, 211  
 Краснослабодцев Д. А. 34  
 Красюк И. К. 146, 208  
 Кратова Ю. В. 330  
 Краюхин А. А. 300  
 Кречетов А. Г. 91, 98  
 Кропотов А. И. 292  
 Круковский А. Ю. 331  
 Крутова И. Ю. 65  
 Крылов И. В. 61  
 Ксенофонтов А. И. 303  
 Куделькин В. Г. 340  
 Кудрявцева Л. Н. 280, 301  
 Кузнецова И. И. 324  
 Кузнецов А. Н. 273  
 Кузнецов В. А. 152  
 Кузьмин С. В. 198  
 Куксин А. Ю. 225, 227, 343  
 Кулешов А. А. 302  
 Куликов В. Н. 98  
 Купер К. Э. 119  
 Куратов С. Е. 18, 36  
 Курбатова Е. И. 303  
 Куриленков Ю. К. 304  
 Курмаев Н. Е. 160  
 Куропатенко В. Ф. 45, 209, 232, 294, 297, 305, 316  
 Куршева Е. А. 288  
 Кутепова А. Н. 119, 128  
 Кухарев А. П. 99, 100  
 Кучко Д. П. 55, 188, 206, 209, 229, 235, 238
- ## Л
- Лабецкий А. Ю. 160  
 Лавренюк И. В. 252  
 Лан А. 61  
 Лапин С. М. 127  
 Лаптев В. И. 214  
 Ларионов В. И. 25  
 Лебедев И. А. 320  
 Лебедев С. Н. 20, 149  
 Левашов П. Р. 141, 158, 161  
 Лейви А. Я. 171, 172  
 Лепаква О. К. 289  
 Лизунов К. В. 56  
 Ли Ку. 179  
 Лин Э. Э. 56  
 Линяев С. А. 340  
 Липин А. В. 156  
 Лисицын В. М. 102  
 Лисков И. Ю. 73, 83  
 Ли Т. 179  
 Литвиненко И. А. 20  
 Ли Х. 8, 52, 137, 138  
 Ло Б. 63  
 Лобода Е. А. 148, 155, 156, 173, 175  
 Лобода Е. Л. 101  
 Лобода П. А. 142, 143, 148  
 Лобойко Б. Г. 74, 80, 122, 125, 128  
 Логинов Д. В. 340  
 Ложков А. А. 259  
 Ложников А. Б. 294  
 Ломоносов И. В. 137  
 Ломунов А. К. 187  
 Лопаткин С. А. 114  
 Лоскутова Д. В. 320  
 Лукин А. А. 113  
 Лун С. П. 71, 72  
 Лупанов В. Г. 34  
 Лыков В. А. 149  
 Лысак В. И. 198  
 Лысенко О. В. 55  
 Лысык В. В. 102, 106  
 Лю З. Дж. 71, 72  
 Лю Ц. 8, 52, 137, 138

**М**

Маевский К. К. 210  
 Мазур А. С. 35  
 Майер А. Е. 21, 36, 186, 207, 211, 212, 306, 345  
 Майер П. Н. 212  
 Майкова Г. В. 234  
 Майлс А. Р. 162  
 Майорова А. С. 205, 235  
 Макарова А. С. 256  
 Макаров А. В. 234  
 Макаров И. А. 169  
 Макеева И. Р. 244, 248, 255  
 Максимова А. И. 47  
 Максимова О. Г. 104  
 Малахов В. Г. 281  
 Малинин С. А. 114  
 Малышев А. Н. 213  
 Малышкин Г. Н. 245, 248  
 Мальгин И. А. 103  
 Малюгина С. Н. 205, 235  
 Марков С. И. 293  
 Мартынова И. А. 168  
 Марченков В. В. 252  
 Массе В. 66  
 Матафонов А. П. 145  
 Матвеев А. А. 98  
 Махутов Н. А. 24, 25  
 Машенко М. А. 96  
 Медведев В. М. 51  
 Медведев И. Н. 307  
 Медведев С. П. 104, 131  
 Мезенцев А. В. 308  
 Мельников В. П. 190  
 Меньшов И. С. 289, 297, 309, 311, 323  
 Мержиевский Л. А. 93, 111, 214  
 Меркулов К. Д. 309  
 Месилов В. В. 196  
 Мигдал К. П. 159  
 Микулин А. Ю. 36  
 Милёхин Ю. М. 79, 98, 114  
 Милявский В. В. 180  
 Минаков Д. В. 158  
 Минин В. Ф. 37  
 Минин И. В. 37  
 Минин О. В. 37  
 Миронова Е. Е. 235  
 Мирошкин К. М. 117, 132  
 Миткалинный С. И. 129  
 Митрофанов А. Ю. 91, 98  
 Михайлова Е. И. 338  
 Михайлов А. Л. 124, 232, 237  
 Михайлова Т. Ю. 215  
 Михайлов В. Н. 215  
 Михайлов Н. А. 155, 254, 310  
 Михайлюкова А. Н. 115  
 Михайлюков К. Л. 215, 310  
 Мицура М. Н. 116  
 Мищенко А. В. 311  
 Могиленских Д. В. 248, 320  
 Модестов Д. Г. 245, 248  
 Моисеев Н. Я. 312  
 Мокрушин С. С. 15, 48, 205

Мокшин С. Ю. 248  
 Молодец А. М. 197  
 Монтгассьер В. 131  
 Морозов В. А. 113  
 Мохова В. В. 230  
 Мочалова В. М. 85, 127  
 Музыря А. К. 38, 49, 84, 93, 111, 119, 125  
 Музюкин И. Л. 165  
 Мурашкина В. А. 149  
 Муханов А. Э. 105

**Н**

Нагаев К. А. 163, 165  
 Надольский А. А. 254, 310  
 Назаров Д. В. 232  
 Назаров К. С. 155  
 Наймарк О. Б. 38, 185, 216, 226, 277, 322  
 Насонов А. П. 218  
 Насонов П. А. 45, 84, 233, 234  
 Наумов С. В. 196  
 Недоспасова Е. В. 45, 313  
 Нелюбина Н. В. 73  
 Нескин А. Г. 39, 40  
 Нецветаев Д. С. 337  
 Нечаев Б. А. 160  
 Нигматулин Р. И. 13, 59  
 Никитин А. Д. 86, 90, 110  
 Никитина Е. В. 85  
 Никитин А. П. 73  
 Никитин В. Г. 129  
 Никитин И. Н. 147  
 Никитин О. А. 50, 206  
 Никифоров М. В. 260  
 Николаев А. Ю. 55  
 Никольшин М. В. 99, 100, 245, 248  
 Ни Ф. Д. 71, 72  
 Новикова Е. А. 147  
 Новиков В. Г. 151, 331  
 Ногин В. Н. 34, 188, 209, 237  
 Нурмухаметов Д. Р. 73

**О**

Оборин В. А. 185, 226  
 Обухов А. Г. 65  
 Овечкин А. А. 142, 143, 148  
 Овчинников А. В. 158  
 Оглезнева Н. Г. 189  
 Олейник Г. М. 161  
 Олешко В. И. 102, 106  
 Ольховская О. Г. 161  
 Ольховский А. В. 55, 188, 206, 235  
 Орлов В. Г. 248, 267  
 Орлов В. Д. 237  
 Орлов Г. В. 313, 344  
 Орлов М. Ю. 67, 217  
 Орлов Ю. Н. 67, 217  
 Осавчук А. Н. 98

**П**

Павленко А. В. 15, 48, 51, 173, 205, 235, 253, 254  
 Падалко В. Н. 160  
 Палымский И. Б. 314

Панкратов Д. Г. 209, 229, 238  
 Панов А. В. 315  
 Пантелеев И. А. 38  
 Пасюков С. Д. 260  
 Паукова А. Е. 255  
 Пахомов С. Н. 156  
 Пацелов А. М. 220  
 Пашинин П. П. 208  
 Пашпекин А. С. 98  
 Петрова А. Н. 189, 218, 226  
 Петров Д. В. 24  
 Петровский В. П. 158  
 Петровцев А. В. 188, 209, 235, 237, 324  
 Петрушевич Ю. В. 137, 140  
 Печенев Ю. Г. 78, 115  
 Пешкичев И. В. 255  
 Пигасов Е. Е. 316  
 Пилюгин В. П. 204, 219  
 Пименова М. М. 258  
 Пинаев А. В. 95, 107, 108  
 Пискунов Ю. А. 48, 51, 253  
 Пластинин А. В. 109, 116  
 Плехов О. А. 226  
 Плотников А. В. 220  
 Плохой В. В. 155  
 Площанский Л. М. 252  
 Поварницын М. Е. 141  
 Пovyшев В. М. 285  
 Погорелко В. В. 157  
 Подурец А. М. 213, 221, 230, 237  
 Позднышева Н. В. 290  
 Позин Г. Б. 9  
 Полеева Н. В. 98  
 Полеев В. Г. 45  
 Пономарёв Л. И. 244  
 Попова В. В. 143  
 Попова О. П. 25  
 Попова Т. В. 345  
 Попов Е. А. 20  
 Попов Н. Н. 56  
 Попцов А. Г. 209, 238  
 Потапкина Л. Ф. 331  
 Потапов А. А. 41, 317  
 Потапов А. В. 148, 155, 156, 173  
 Потапов А. М. 254  
 Потапов И. В. 86, 90, 110  
 Потапов С. В. 215, 310  
 Потехина Е. В. 340  
 Потехин А. Л. 340  
 Починский В. И. 294  
 Празян Т. Л. 110  
 Престон Д. Л. 180  
 Прокопьев Е. П. 267  
 Пронин В. А. 318  
 Просвирин К. М. 111  
 Просвирнин К. В. 125  
 Просвирнин К. М. 118, 120, 132  
 Просвиряков Е. Ю. 319  
 Прохоров М. Е. 42  
 Проценко С. П. 222  
 Прууэл Э. Р. 93, 111, 119, 124, 125  
 Пунин В. Т. 224, 230

Пучков В. А. 24, 25  
 Пушкин М. С. 223  
 Пчелинцев М. В. 292  
 Пьянкозов К. С. 97

## Р

Радченко А. В. 319, 320  
 Радченко П. А. 319, 320  
 Раевский В. А. 202  
 Разин А. В. 74, 112  
 Разумков А. С. 340  
 Ральников М. А. 55, 188, 206, 209, 229, 235, 238  
 Ральченко В. Г. 208  
 Рагахин Н. А. 160  
 Ребенок Е. Н. 320  
 Рейно В. В. 101  
 Рогаев К. С. 182  
 Рогачёва А. И. 199  
 Родиков С. В. 313  
 Романова М. Д. 310  
 Ромашка М. Ю. 341, 342  
 Роузкалп С. Л. 159  
 Рубина Л. И. 321, 326, 332  
 Руднев А. В. 237  
 Рудомёткин К. А. 35  
 Рыжов Н. И. 250  
 Рыкованов Г. Н. 149  
 Рыхлова Л. В. 42

## С

Савельев А. В. 156  
 Савельева Н. В. 277, 322  
 Савельева Т. В. 252  
 Савельев-Трофимов А. Б. 158  
 Савенков Г. Г. 43, 113  
 Савичев В. Ю. 62  
 Садов А. П. 308  
 Садовничий Д. Н. 114  
 Садохин А. Н. 217  
 Садыков И. Ф. 75  
 Сайтгараев С. С. 9  
 Салатов Е. А. 147  
 Самарин С. И. 256  
 Самков И. В. 310  
 Самсонова Н. С. 201  
 Сапожников Ф. А. 203  
 Сасоров П. В. 161  
 Сафронов К. В. 155, 156, 171  
 Сахаров М. Ю. 100  
 Сахарчук Ю. П. 91  
 Светцов В. В. 25  
 Свиридов Е. В. 51  
 Сдобнов В. И. 84  
 Севастьянов А. Б. 115  
 Седова О. В. 55  
 Седов С. Ю. 116  
 Селезнев В. Н. 149  
 Сельченкова Н. И. 224, 230  
 Семашкин Г. В. 95  
 Семенова А. С. 196  
 Семенов А. Ю. 208  
 Сенченков С. А. 264

- Серёжкин А. А. 323  
Сережкин С. А. 18  
Серова Е. В. 267  
Серов С. Б. 323  
Серов Ю. Л. 27  
Сидоров К. С. 237  
Силантьева И. Ю. 245, 248  
Сильвестров В. В. 109, 116  
Сильников М. В. 131  
Симоненко В. А. 20, 24, 25, 34, 59, 61, 243, 248, 254, 255  
Симонов Ар. Ю. 99  
Симонов А. Ю. 49  
Синицын А. В. 258  
Синькова О. Г. 51  
Скачков П. П. 275  
Скибо А. А. 255  
Скобеев А. В. 310  
Скоркин Н. А. 25  
Слесарева А. Н. 155  
Смачная О. В. 55  
Смирнова Д. Е. 225, 227  
Смирнов В. В. 206  
Смирнов В. Н. 45  
Смирнов В. Н. 44, 313  
Смирнов Е. Б. 74, 76, 80, 93, 96, 111, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 125, 132  
Смирнов Н. А. 84, 143, 148, 203  
Смирнов Ю. Г. 55  
Смольский С. Л. 252  
Совык Д. Н. 208  
Соковиков М. А. 185, 226  
Соколова Н. Д. 324  
Соколов В. П. 255  
Соколов Л. В. 149  
Соколов М. А. 120  
Соколов М. Л. 40  
Соловей В. А. 252  
Соловьёва Ю. В. 219  
Соловьёв Н. Г. 152  
Соломянная А. Д. 151  
Сорокин С. А. 161, 170  
Сосиков В. А. 200  
Софронов В. Н. 286  
Стадник А. Л. 340  
Станкевич А. В. 76, 121, 122, 128  
Стариков С. В. 225, 227  
Старостин А. Н. 137, 140  
Старшинов А. В. 84  
Стаценко В. П. 23, 51, 147, 339  
Стегайлов В. В. 225  
Степаненко Е. Н. 325  
Степанов Е. А. 56  
Столбиков М. Ю. 45  
Стринадкин С. Д. 84  
Строев Н. Е. 167  
Стучебрюхов И. А. 208  
Сун Ш. 138  
Сунь Ч. 63  
Суркова И. Ю. 122  
Суров В. С. 325  
Сухих А. С. 333  
Сырова И. В. 334  
Сырунин М. А. 237  
Сыско Д. В. 46  
Сюз Ч. 8, 138  
Сяо Д. 8
- ## Т
- Табаченко А. Н. 182  
Тайбинов Н. П. 121, 122, 128  
Талуц Н. И. 206, 209, 228, 240  
Танаков З. В. 56  
Тан Д. 179  
Тан К. И. 71  
Тан Х. 179  
Тань Ф. 63  
Тараканов В. П. 165, 304  
Таранов А. А. 24, 25  
Тарасов А. Ю. 121  
Тарасов В. И. 334, 340  
Таржанов В. И. 209, 229, 235  
Таскаев С. В. 21, 47  
Телегин С. В. 196  
Теличко И. В. 229  
Тен К. А. 76, 93, 111, 119, 124, 125  
Терентьева А. О. 91  
Терехина А. И. 185  
Терешкина И. А. 237  
Теселкин В. А. 87  
Тилькунов А. В. 230  
Тимакова М. С. 149  
Тимофеев О. А. 103  
Тимошенко В. Ю. 47  
Типеев А. О. 222, 229  
Титов В. М. 111, 125  
Тищенко А. С. 148  
Ткаченко Б. И. 237  
Ткаченко М. И. 213, 221, 237  
Ткаченко С. И. 161, 163  
Толмачёв Т. П. 219  
Толочко Б. П. 76, 119, 124, 125  
Толстоухов П. А. 156  
Топорков Д. Ю. 13  
Топорова О. О. 339, 340  
Трапезников М. А. 246  
Тропин Д. А. 126  
Трунин И. Р. 230, 237  
Тупицын А. В. 91  
Турмышев И. С. 165  
Турутина И. Ю. 339, 340  
Тюменцев В. А. 21  
Тюпанова О. А. 213  
Тяктев А. А. 15, 48, 205
- ## У
- Уваров С. В. 38, 226  
Углов А. С. 256  
Углов В. В. 172  
Ульянов О. Н. 321, 326, 332  
Ульянов С. М. 252  
Уракова А. В. 337  
Уткин А. В. 85, 127, 200, 239  
Учаев А. Я. 224, 230  
Ушакова О. В. 327



**Ф**

Фальков А. Л. 169  
 Фан Д. 179  
 Фёдоров А. В. 48, 126, 130, 232, 282, 330  
 Фёдорова Н. Н. 282  
 Фёдорова Т. Б. 320  
 Фёдоров В. Е. 315  
 Филатов С. Ю. 232  
 Филимонов М. Ю. 292  
 Филин Н. В. 329  
 Филиппов А. Р. 187  
 Филякова В. И. 128  
 Финашин Д. В. 45  
 Финюшин С. А. 232  
 Фирсова Г. С. 51  
 Флегентов В. А. 156, 171  
 Фокин В. Б. 141  
 Фокин Е. Ю. 252  
 Фомин В. П. 189, 201  
 Фортов В. Е. 208  
 Фролова Н. В. 215, 310  
 Фролова Н. Ю. 26, 49, 233, 234  
 Фурсов Ф. И. 160  
 Фу Х. 179

**Х**

Хайбрахманов С. А. 21, 49  
 Хайруллин А. Р. 129  
 Хамидуллин Д. И. 129  
 Хан И. 71, 72  
 Хантулева Т. А. 43  
 Хардина Л. В. 45, 324  
 Харченко В. В. 95, 129  
 Хворов Ф. Т. 115  
 Хворостин В. Н. 56  
 Хейфец А. Э. 26, 49, 233, 234  
 Хисматуллина Н. А. 281  
 Хищенко К. В. 141, 161, 204, 208, 234, 306, 345  
 Хлебников В. А. 343  
 Хлыбов В. И. 336  
 Хмелев А. В. 34  
 Хмелёв А. В. 310  
 Хмель Т. А. 130, 330  
 Ховайло В. В. 47  
 Холин С. А. 331  
 Хомик С. В. 104, 131  
 Хомич А. А. 208  
 Хомская И. В. 233, 234  
 Храмов И. В. 215, 310  
 Хренков С. Д. 50  
 Хуан Ц. 8, 138  
 Ху Х. 179

**Ц, Ч**

Цао Л. 179  
 Целиков И. С. 202  
 Ципилев В. П. 74, 106, 112  
 Цой А. П. 237  
 Цыгвинцев И. П. 331  
 Чарушин В. Н. 128  
 Чащин М. А. 332

Чеботарь С. В. 333  
 Чердизов Р. К. 160  
 Черенда Н. Н. 172  
 Черепанова Е. И. 344  
 Чернетенко Ю. А. 25  
 Чернышев Ю. Д. 339  
 Чернышова О. Н. 51, 286  
 Черняков В. Е. 149  
 Чефонов О. В. 158  
 Чжан С. 63  
 Чжан У. 138  
 Чжан Я. 8  
 Чжао Ц. 63  
 Чжун Т. 63  
 Чижкова Н. Е. 203  
 Чижков М. Н. 149, 310  
 Чингина Е. А. 165, 191  
 Чубарешко И. С. 334  
 Чудаков Е. А. 232  
 Чудинов В. В. 185, 226  
 Чухманов Н. В. 334  
 Чэн Ю. 179

**Ш, Щ**

Шабуров В. М. 340  
 Шадрин А. А. 143, 148  
 Шакиров И. Х. 76  
 Шалковский Д. М. 188, 209, 235, 237, 324  
 Шамин С. Н. 196  
 Шамраев А. Л. 148  
 Шарабура Т. М. 258, 259  
 Шарафутдинов М. Р. 119  
 Шахрай Д. В. 197, 239  
 Швайко В. Н. 98  
 Швалева Р. К. 336  
 Шевченко А. А. 87  
 Шевченко В. Г. 236  
 Шемякин А. Н. 152  
 Шепелев Э. Г. 213  
 Шестаков А. А. 149, 334, 336, 337  
 Шестаковская Е. С. 305  
 Шестаченко О. Е. 51, 253  
 Шехтман Л. И. 124, 125  
 Шиберин И. В. 237  
 Шилов А. О. 152  
 Ширинкина И. Г. 189  
 Ширококов А. Е. 235  
 Шишлов А. В. 160  
 Шишов Н. И. 79, 98  
 Шкаровский Д. А. 245  
 Шкода О. А. 289  
 Шмаков А. Н. 119  
 Шмаков В. М. 344  
 Шматов М. Л. 166  
 Шор В. А. 25  
 Шорохов Е. В. 26, 189, 218, 233, 234  
 Штабель Н. В. 338  
 Шубин О. Н. 24  
 Шувалов В. В. 25  
 Шуйкин А. Н. 199  
 Шульц О. В. 254, 255, 264  
 Шурина Э. П. 337, 338

Шушлебин А. Н. 149  
 Щербакова С. Н. 310  
 Щербаков В. И. 118  
 Щербаков В. М. 260  
 Щербаков В. Н. 74, 96, 132

## Э, Ю, Я

Эпов М. И. 338  
 Югов Н. Т. 182  
 Юй Ц. 179  
 Юношев А. С. 109  
 Юркевич А. А. 158  
 Юрченко О. С. 55  
 Юсупов Д. Т. 55, 237  
 Яблонских Т. И. 189  
 Язова Е. Ю. 248  
 Якимова М. Н. 235  
 Якимов М. Ю. 152  
 Яковлев Г. А. 54  
 Якунин А. К. 238  
 Якушев В. В. 199, 239  
 Яловец А. П. 157, 171, 172, 207  
 Янг Яо 73  
 Янилкин А. В. 105, 341, 342, 343  
 Янилкин Ю. В. 51, 280, 286, 300, 339, 340  
 Янковский Б. Д. 180

## INDEX

### A

Abbott D. H. 67  
 Abrosimov S. A. 208  
 Aduv B. P. 74, 83  
 Afanasyeva S. A. 183  
 Agafonov G. L. 104, 132  
 Aganin A. A. 13, 281  
 Agranat M. B. 158  
 Ahlyustin I. A. 132  
 Akhlyustin I. A. 74, 119  
 Akhmetov A. R. 51  
 Akhmetshin R. G. 75, 113  
 Akhmetzyanov A. I. 274  
 Aldoshin S. M. 80  
 Aleksandrov V. V. 162  
 Aliev Z. G. 80  
 Aminov Yu. A. 94, 125  
 Ananev S. Yu. 181  
 Ananyin D. O. 148  
 Ancharov A. I. 219  
 Andreev A. M. 48, 51  
 Andreev E. C. 150  
 Andreevskikh L. A. 124  
 Andronov I. 264  
 Anikin N. B. 48, 253  
 Anisichkin V. F. 14, 182  
 Anisimov A. N. 190, 201  
 Anuchin Maxim G. 273  
 Anuchin Mikhail G. 273  
 Ardasheva L. I. 150  
 Arhipov D. A. 338  
 Arinin V. A. 237  
 Aristov S. N. 319

Artemova N. A. 328  
 Astafiev V. V. 189, 218  
 Astafurova M. V. 174  
 Astafurov V. I. 174  
 Astashynski V. M. 172  
 Atroshkin V. V. 84  
 Aulchenko V. M. 125  
 Aushev A. A. 56  
 Avramenko M. I. 7, 150

### B

Badretdinova L. Ch. 120  
 Badretdinova L. Kh. 76  
 Badykov D. D. 54  
 Badyukov D. 22  
 Baidakov V. G. 222, 230  
 Baishev A. I. 51  
 Balabin S. I. 253, 254  
 Balandina A. N. 214  
 Balandin V. V. 188  
 Bannikova I. A. 184  
 Bannikov I. A. 39  
 Bannikov M. M. 132  
 Barakhvostov S. V. 164, 165  
 Barannik D. A. 77  
 Barenbaum A. A. 15  
 Barmin A. V. 79  
 Baschinkin S. A. 100  
 Bashurov V. V. 276, 293  
 Batuev S. P. 319, 320  
 Bautin K. V. 66  
 Bautin S. P. 66, 275  
 Bayandin Yu. V. 277, 322  
 Bazarov P. S. 46  
 Bazhulin A. P. 208  
 Bazotov V. Ya. 94, 123, 129  
 Belenovskiy Yu. A. 74, 81  
 Belkheeva R. K. 185  
 Belokrysov Fedotov A. I. 302  
 Belonogova E. A. 245  
 Belonogova E. A. 255  
 Belonogov M. N. 247  
 Belov N. N. 183  
 Belyaev S. P. 339, 340  
 Belyaev V. S. 146  
 Belyakov V. I. 100  
 Berezanskiy I. V. 325  
 Berezina N. A. 299  
 Bessarab A. V. 148  
 Bikeyev A. S. 246  
 Bilalov D. A. 186, 227  
 Bisikalo D. V. 287, 292  
 Bodrov A. S. 291  
 Bogdanov A. N. 64  
 Boiko M. M. 86  
 Bolshakov A. P. 208  
 Bondarchuk G. G. 206  
 Bondarenko G. A. 148  
 Bordzilovskii S. A. 117  
 Borisevich V. 264  
 Borisov E. S. 173  
 Borodin E. N. 212

Borodin I. N. 187  
 Borschevsky A. O. 237  
 Borshchevskiy M. 264  
 Botov E. V. 56  
 Boyarnikov D. S. 210  
 Bragov A. M. 188  
 Brantov A. V. 153, 154  
 Brazhnikov M. A. 88  
 Brezgina L. P. 206, 278  
 Brichikov S. A. 55, 188, 206, 235  
 Brodova I. G. 189, 218, 227  
 Bronina T. N. 328  
 Bryant E. 67  
 Bugaenko I. L. 15, 48, 253, 254  
 Burakov B. E. 263  
 Burkin V. V. 183  
 Burtsev V. V. 237  
 Buruchenko S. K. 279  
 Butusov E. I. 232  
 Bychenkov V. Yu. 153, 154

## C

Cao L. 179  
 Charuchin V. N. 128  
 Chaschin M. A. 333  
 Chebotar S. V. 334  
 Chefonov O. V. 158  
 Chen Y. 179  
 Cherdizov R. K. 160  
 Cherenda N. N. 172  
 Chernetenko Yu. A. 26  
 Chernyakov V. E. 150  
 Chernysheva O. N. 52, 287  
 Chernyshev Yu. D. 339  
 Chingina E. A. 165, 192  
 Chizhkova N. E. 204  
 Chizhkov M. N. 150, 310  
 Chubareshko I. S. 334  
 Chudakov E. A. 232  
 Chudinov V. V. 186, 227  
 Chukhmanov N. V. 335  
 Chuprunov A. M. 306  
 Cikhardt J. 160

## D

Danilov M. N. 283  
 Dashko D. V. 80  
 Davidov V. Yu. 91, 236  
 Davydova L. A. 191  
 Davydova O. N. 258  
 Davydov V. Yu. 87, 110  
 Degterev A. A. 206  
 Degtiarev V. A. 190  
 Degtyagev V. A. 201  
 Degtyarenko L. I. 340  
 Degtyar V. G. 63  
 Degtya V. G. 9  
 Dementyev O. N. 284  
 Demina M. A. 190, 201  
 Demin D. A. 190  
 Deryabin S. L. 308  
 Devaux X. 180, 181

Ding N. 8, 53, 138, 139  
 Dmitrieva A. S. 339  
 Dmitriev N. A. 331  
 Dobretsov S. L. 174  
 Dobromyslov A. V. 206, 210, 228, 240  
 Dolgikh S. M. 27, 121  
 Dolgoborodov A. Yu. 88, 181  
 Dolgoleva G. V. 148, 151, 284  
 Dorosev A. S. 262  
 Dorovskikh I. A. 245  
 Dossot M. 180, 181  
 Dremov V. V. 204, 222, 235  
 Dudkin G. N. 160  
 Dudorov A. 22, 49  
 Dudorov A. E. 23, 36  
 Dunaev V. N. 81  
 Dushenok S. A. 130  
 Dushenok S. A. 77, 80, 95  
 Dyakov S. S. 285  
 Dyomin V. M. 303  
 Dyrda N. D. 245, 247, 248

## E

Eganov K. V. 132  
 Egorov A. P. 274  
 Egorov I. N. 286  
 Egoryan A. D. 97  
 Elkin V. M. 215  
 Elsukov V. P. 20, 34  
 Epov M. I. 339  
 Eretnova O. 22  
 Eretnova O. V. 23  
 Ermolovich E. I. 115  
 Ershova A. V. 310  
 Ershov A. P. 14, 88  
 Evdokimov Yu. K. 41  
 Evseeva T. P. 123

## F

Falkov A. L. 169  
 Fan D. 179  
 Fedorova N. N. 283  
 Fedorova T. B. 321  
 Fedorov A. V. 48, 126, 131, 232, 283, 330  
 Fedorov V. E. 315  
 Filatov S. Yu. 232  
 Filimonov M. Yu. 293  
 Filin N. V. 329  
 Filippov A. R. 188  
 Filyakova V. I. 128  
 Finashin D. V. 46  
 Finyushin S. A. 232  
 Firsova G. S. 52  
 Flegentov V. A. 171  
 Fokin E. Yu. 252  
 Fokin V. B. 142  
 Fomin V. P. 190, 201  
 Fortov V. E. 208  
 Frolova N. V. 215, 311  
 Frolova N. Yu. 27, 50, 233, 234  
 Fu H. 179  
 Fursov F. I. 160

**G**

Gaan K. V. 27, 218, 234  
 Gadzhiev A. D. 334  
 Gafarov B. R. 191  
 Galakhov V. R. 196  
 Galimov D. M. 47  
 Galiullin I. G. 81  
 Gamaly E. G. 195  
 Gapontseva T. M. 219  
 Garanzha V. A. 280, 302  
 Garmatina A. A. 170  
 Gavrilov D. S. 156, 157, 173, 175  
 Gavrilov P. M. 58  
 Gerasimov A. V. 16  
 Gizhevskii B. A. 196  
 Gladush M. G. 141  
 Glazyrin I. V. 7, 34, 155, 156, 254, 310  
 Glazyrin S. I. 17, 24  
 Glazyrin V. P. 68  
 Gluschenko A. G. 84  
 Golikov A. D. 252  
 Golovanov A. N. 47  
 Golubev M. B. 18  
 Golubev V. K. 18, 81, 82  
 Golubkov A. N. 199  
 Golyshev A. A. 197  
 Goncharov E. A. 281  
 Goncharov T. K. 80  
 Gorbatenko M. V. 285  
 Gordienko V. M. 170  
 Gorelov A. M. 261  
 Gorkavyi N. 22  
 Gorodnichev A. V. 340  
 Gorodnichev K. E. 19  
 Gorokhov S. A. 157, 171  
 Gorshenkov M. V. 47  
 Goryachev E. Yu. 261  
 Goubin A. S. 87, 91, 110  
 Govras E. A. 154  
 Grabovenskaya S. A. 337  
 Grabovskii E. V. 162  
 Grafutin V. I. 268  
 Grakhov Yu. V. 336  
 Granskii A. A. 233  
 Granskiy A. A. 218  
 Grebyonkin K. F. 90, 97  
 Grechin S. S. 83  
 Greenberg B. A. 194, 198, 220, 223  
 Gribanov D. A. 84  
 Grigoriev A. N. 173, 253  
 Grigoriev G. S. 85  
 Grinberg B. A. 219  
 Grishin A. M. 93  
 Grokhovsky V. I. 19  
 Grushin S. A. 190, 201  
 Gryaznov E. F. 86  
 Gryaznov V. K. 137, 140  
 Gryaznykh D. A. 20  
 Grygoryev G. S. 110  
 Gubchenko V. M. 145  
 Gudarenko L. F. 199  
 Gulyaeva N. I. 313

Guo X. L. 71  
 Gusakov A. V. 148  
 Guseva T. S. 281  
 Gusev S. A. 191  
 Gusiakov V. K. 67  
 Gus'kov S. Yu. 304  
 Guzhova A. R. 281, 340

**H**

Han Y. 71, 72  
 Han Y. 72  
 Huang J. 8, 139  
 Hu H. 179  
 Hvorostin V. N. 56

**I**

Iakunin A. K. 238  
 Ignatkova M. G. 201  
 Ignatova O. N. 202, 214, 221  
 Igonin V. V. 221  
 Iionov G. V. 29  
 Ikhsanov N. R. 292  
 Ilgamov M. A. 13, 281  
 Ilnitskiy D. K. 159  
 Ilyushkina N. Yu. 56  
 Imkhovik N. A. 79  
 Inogamov N. A. 159  
 Inozemtsev A. V. 194, 223  
 Intyapina N. P. 340  
 Ionov G. V. 7, 30, 32, 204, 222  
 Iosilevskiy I. 139, 167  
 Iosilevskiy I. L. 140, 168  
 Isakova P. B. 292  
 Ishchenko A. N. 183  
 Iskhakov T. N. 94  
 Ismagilova N. F. 293  
 Itkina N. B. 293  
 Ivanov M. A. 198  
 Ivanov M. Ja. 28  
 Ivanov S. N. 165  
 Ivashkin V. V. 62

**K**

Kadatsky M. A. 204  
 Kakshin A. G. 156, 157, 173, 175  
 Kalashnikov D. A. 232  
 Kalinin Yu. G. 162  
 Kalmykov P. I. 75, 106  
 Kalugin M. A. 246  
 Kandiev Y. Z. 267  
 Kandoba I. N. 295  
 Karachinskiy S. I. 103  
 Karakhanov S. M. 117  
 Karavaev A. V. 222  
 Kargin A. A. 51  
 Karimov F. H. 32  
 Karlykhanov N. G. 149, 150  
 Karnauhov E. I. 206  
 Karnaukhov E. I. 173  
 Karpeev A. V. 7, 34, 155, 156, 254, 310  
 Kartashev A. L. 296  
 Kartasheva M. A. 296

- Kashaeva E. A. 246, 249  
Kashkarov A. O. 94, 112, 124, 125  
Kashutov S. V. 208  
Kasymov D. P. 93  
Kayakin A. A. 199  
Kazakov D. N. 206  
Kazakovskaya T. V. 261  
Kazantseva N. V. 205  
Kazin K. I. 294  
Kechin A. G. 190, 201  
Kellerman D. G. 196  
Khaibrakhmanov S. 22, 49  
Khamidullin D. I. 129  
Khantuleva T. A. 44  
Kharchenko V. V. 95, 130  
Khardina L. V. 45, 325  
Khayrullin A. R. 129  
Kheifets A. E. 27, 50, 234  
Kheifetz A. E. 233  
Khischenko K. V. 162  
Khishchenko K. V. 142, 204, 208, 234, 307, 345  
Khismatullina N. A. 281  
Khlebnikov V. A. 344  
Khlybov V. I. 336  
Khmel T. A. 131, 330  
Khmelyov A. V. 34, 310  
Kholin S. A. 331  
Khomich A. A. 208  
Khomik S. V. 104, 132  
Khomskaya I. V. 233, 234  
Khovaylo V. V. 47  
Khramov I. V. 215, 311  
Khrenkov S. D. 51  
Khvorov F. T. 115  
Kim D. A. 151  
Kim V. V. 239  
Kinelovskii S. A. 211  
Kirilenko V. G. 88  
Kiryushchenkova N. A. 94  
Kiselev A. B. 297  
Kiselev A. N. 132  
Kiselev S. P. 33  
Kiselev V. P. 33  
Kisilyov A. N. 118  
Kiskin P. E. 95  
Klapyotke T. M. 81  
Klenov A. I. 237  
Klimov M. I. 297  
Klinacheva N. L. 298  
Klir D. 160  
Kochetkov I. I. 96  
Kochetova O. M. 26  
Kochutin D. V. 97  
Kogevnikov D. G. 172  
Kokshenev V. A. 160  
Kolchugin S. V. 299  
Kolesnikov P. A. 51  
Kolhidashvili M. R. 252  
Kolobianin V. Yu. 281  
Kolobyanin V. Yu. 301, 339, 340  
Kolosov V. Yu. 205  
Kolpakov V. I. 85, 86  
Kondrokhina I. N. 214  
Konovalov A. B. 299, 300  
Konov V. I. 208  
Konstantinov A. Yu. 188  
Kopanitsa D. G. 320  
Kopkin S. V. 190, 201  
Kosheleva E. V. 224, 231  
Kosolapova L. A. 281  
Kostistyn O. V. 94, 125  
Kostitsyn O. V. 74, 76, 81, 97, 118, 119, 120, 121  
Kostjuchenko V. I. 257  
Kostyuchenko V. I. 256, 262  
Kotenev V. P. 302  
Kotomin A. A. 77, 80, 130  
Kotova O. G. 34, 155, 156, 254  
Kotov V. L. 188  
Kovalchuk B. M. 160  
Kovalev E. O. 206  
Kovalev Yu. M. 298, 316  
Kozelkov O. E. 206  
Kozhevnikov V. G. 79, 115  
Kozlov E. A. 55, 188, 206, 210, 228, 229, 235, 237, 238, 240, 325  
Kozlov P. A. 275  
Kozmanov M. Yu. 150  
Kozmin I. V. 295  
Kraiko A. N. 97  
Krasnikov V. S. 207, 208, 212  
Krasnoslobodtsev D. A. 34  
Krasyuk I. K. 208  
Kratova Yu. V. 330  
Kravarik J. 160  
Krayukhin A. A. 301  
Krechetov A. G. 92, 98  
Kropotov A. I. 293  
Krukovskiy A. Yu. 331  
Krutova I. Yu. 66  
Krylov I. V. 62  
Ksenofontov A. I. 303  
Kubes P. 160  
Kuchko D. P. 55, 188, 206, 210, 229, 235, 238  
Kudel'kin V. G. 340  
Kudravytseva L. N. 280  
Kudryavytseva L. N. 302  
Kukharev A. P. 100  
Kuksin A. Yu. 226, 228, 344  
Kuleshov A. A. 302  
Kulikov V. N. 99  
Kuper K. E. 120  
Kurapatenko V. F. 294  
Kuratov S. E. 19, 37  
Kurbatova E. I. 303  
Kurilenkov Yu. K. 304  
Kurmaev N. E. 160  
Kuropatenko V. F. 45, 232, 298, 305, 316  
Kursheva E. A. 288  
Kutepova A. N. 120, 128  
Kuz'min S. V. 198  
Kuznetsova I. I. 325  
Kuznetsov A. N. 273

**L**

Labetsky A. Yu. 160  
 Lang A. 62  
 Lapin S. M. 127  
 Laptev V. I. 214  
 Larionov V. I. 26  
 Lavie A. J. 172  
 Lavrenyuk I. V. 253  
 Lebedev A. I. 221  
 Lebedev I. A. 320  
 Lebedev S. N. 20, 150  
 Lepakova O. K. 290  
 Levashov P. R. 142, 159, 162  
 Leyvy A. Ya. 172  
 Li H. 8, 53, 138, 139  
 Lin E. E. 56  
 Linyaev S. A. 340  
 Lipin A. V. 157  
 Li Q. 179  
 Lisitsyn V. M. 102  
 Liskov I. Yu. 74, 83  
 Lisykh V. K. 306  
 Li T. 179  
 Litvinenko I. A. 20  
 Liu J. 8, 53, 138, 139  
 Lizunov K. V. 56  
 Loboda E. A. 149, 156, 157, 173, 175  
 Loboda E. L. 101  
 Loboda P. A. 142, 143, 149  
 Loboiko B. G. 74, 81, 125  
 Loboyko B. G. 128  
 Loginov D. V. 340  
 Lomonosov I. V. 137  
 Lomunov A. K. 188  
 Long X. P. 71, 72  
 Lopatkin S. A. 115  
 Loskutova D. V. 320  
 Lozhkov A. A. 259  
 Lozhnikov A. V. 295  
 Lukin A. A. 114  
 Luo B. 63  
 Lupanov V. G. 34  
 Lv Z. J. 72  
 Lykov V. A. 150  
 Lysak V. I. 198  
 Lysenko O. V. 55  
 Lysyk V. V. 102, 106

**M**

Maevskii K. K. 211  
 Maikova G. V. 234  
 Makarova A. S. 257  
 Makarov A. V. 234  
 Makarov I. A. 170  
 Makeeva I. R. 255  
 Makeyeva I. R. 245, 248  
 Makhutov N. A. 25, 26  
 Malakhov V. G. 281  
 Malguin I. A. 103  
 Malinin S. A. 115  
 Malugina S. N. 206

Malyshev A. N. 214  
 Malyshkin G. N. 246, 249  
 Malyugina S. N. 235  
 Marchenkov V. V. 252  
 Markov S. I. 293  
 Martynova I. A. 168  
 Mases M. 180, 181  
 Mashchenko M. A. 97  
 Masse W. B. 67  
 Matafonov A. P. 146  
 Matveev A. A. 99  
 Maximova A. I. 47  
 Maximova O. G. 104  
 Mayer A. 22  
 Mayer A. E. 36, 187, 207, 212, 213, 307, 345  
 Mayer P. N. 213  
 Mayorova A. S. 206, 235  
 Mazur A. S. 35  
 McRae E. 180, 181  
 Medvedev I. N. 307  
 Medvedev S. P. 104, 132  
 Medvedev V. M. 51  
 Melnikov V. P. 191  
 Menshov I. S. 289, 297, 309, 323  
 Merkulov K. D. 309  
 Merzhievsky L. A. 94, 112  
 Merzhiyevsky L. A. 214  
 Mesilov V. V. 196  
 Mezentsev A. V. 308  
 Migdal K. P. 159  
 Mikhailova E. I. 339  
 Mikhailov A. L. 124, 232, 237  
 Mikhailukov K. L. 215, 311  
 Mikhailyukova A. N. 115  
 Mikhaylova T. Yu. 215  
 Mikhaylov N. A. 156, 254, 310  
 Mikhaylov V. N. 215  
 Mikulin A. Yu. 37  
 Milehin Yu. M. 80  
 Milekhin Yu. M. 99, 115  
 Miles A. R. 162  
 Milyavskiy V. V. 181  
 Minakov D. V. 159  
 Minin I. V. 37  
 Minin O. V. 37  
 Minin V. F. 37  
 Mironova E. E. 235  
 Miroshkin K. M. 118, 132  
 Mitkalinniy S. I. 130  
 Mitrofanov A. Yu. 92, 98  
 Mitsura M. N. 116  
 Mochalova V. M. 86, 127  
 Modestov D. G. 246, 249  
 Mogilenskikh D. V. 249, 321  
 Moiseev N. Ya. 312  
 Mokhova V. V. 231  
 Mokrushin S. S. 15, 48, 206  
 Mokshin S. Yu. 249  
 Molodets A. M. 197  
 Montassier V. 132  
 Morozov V. A. 114  
 Mukhanov A. E. 105

Murashkina V. A. 150  
 Musyria A. K. 50  
 Muzyrya A. K. 38, 84, 94, 112, 120, 125  
 Muzyukin I. L. 165

## N

Nadolskii A. A. 254  
 Nadolskyy A. A. 310  
 Nagayev K. A. 164, 165  
 Naimark O. B. 39, 184, 186, 216, 227, 277, 322  
 Nasonov A. P. 218  
 Nasonov P. A. 46, 84, 233, 234  
 Naumov S. V. 196  
 Nazarov D. V. 232  
 Nazarov K. S. 155  
 Nechaev B. A. 160  
 Nedospasova E. V. 45, 313  
 Neljubina N. V. 74  
 Neskin A. G. 40  
 Netsvetayev D. S. 337  
 Nie F. D. 71, 72  
 Nigmatulin R. I. 13, 60  
 Nikiforo M. V. 260  
 Nikitin A. D. 87, 91, 110  
 Nikitina E. V. 86  
 Nikitin A. P. 74  
 Nikitin I. N. 148  
 Nikitin O. A. 51, 206  
 Nikitin V. G. 129  
 Nikolaev A. Yu. 55  
 Nikulshin M. V. 100, 246, 249  
 Nogin V. N. 34, 188, 210, 237  
 Novikova E. A. 148  
 Novikov V. G. 151, 331  
 Nurmukhametov D. R. 74

## O

Oborin V. A. 186, 227  
 Obuhov A. G. 66  
 Oglezneva N. G. 189  
 Olejnik G. M. 162  
 Oleshko V. I. 102, 106  
 Olhovskaya O. G. 162  
 Olkhovsky A. V. 55, 188, 206, 235  
 Orcikova H. 160  
 Orlov G. V. 314  
 Orlov M. Yu. 68, 217  
 Orlov V. D. 237  
 Orlov V. G. 249, 267  
 Orlov Yu. N. 68, 217  
 Osavfchuk A. N. 99  
 Ovchinnikov A. V. 158  
 Ovechkin A. A. 142, 143, 149

## P

Padalko V. N. 160  
 Pakhomov S. N. 157  
 Palymskiy I. B. 314  
 Pankratov D. G. 210, 229, 238  
 Panov A. V. 315  
 Panteleev I. A. 39  
 Pashinin P. P. 208

Pashpekin A. S. 98  
 Pasyukov S. D. 260  
 Patselov A. M. 220  
 Paukova A. E. 255  
 Pavlenko A. V. 15, 48, 51, 173, 206, 235, 253, 254  
 Pchelintsev M. V. 293  
 Pechenev Yu. G. 79, 115  
 Peshkichev I. V. 255  
 Petrova A. N. 189, 218, 227  
 Petrov D. V. 25  
 Petrovsky V. P. 158  
 Petrovstev A. V. 188, 237  
 Petrovtsev A. V. 210, 235, 325  
 Petrushevich Yu. V. 137, 141  
 Phlegentov V. A. 157  
 Piankov K. S. 97  
 Pigasov E. E. 316  
 Pilyugin V. P. 205, 219  
 Pimenova M. M. 258  
 Pinaev A. V. 96, 107, 108  
 Piskunov Yu. A. 48, 51, 253  
 Plastinin A. V. 109, 117  
 Plekhov O. A. 227  
 Plokhoy V. V. 155  
 Ploshyansky L. M. 252  
 Plotnikov A. V. 220  
 Pochinskii V. I. 295  
 Poduretc A. M. 237  
 Podurets A. M. 214, 221, 231  
 Pogorelko V. V. 157  
 Poleeva N. V. 98  
 Poleyev V. G. 45  
 Ponapov A. V. 156  
 Ponomarev L. I. 244  
 Popova O. P. 26  
 Popova T. V. 345  
 Popova V. V. 143  
 Popov N. N. 56  
 Poptsov A. G. 210, 238  
 Potapkina L. F. 331  
 Potapov A. A. 317  
 Potapov A. M. 254  
 Potapov A. V. 149, 155, 157, 173  
 Potapov I. V. 87, 91, 110  
 Potapov S. V. 215, 311  
 Potapov A. A. 41  
 Potekhina E. V. 340  
 Potekhin A. L. 340  
 Povarnitsyn M. E. 142  
 Povyshev V. M. 285  
 Pozdnysheva N. V. 291  
 Pozin G. B. 9  
 Prazyan T. L. 111  
 Preston D. L. 180  
 Prokhorov M. E. 42  
 Prokopev E. P. 268  
 Pronin V. A. 318  
 Prosvirin K. M. 112  
 Prosvirnin K. M. 119, 121, 132  
 Prosvirnin K. V. 125  
 Prosviryakov E. Yu. 319  
 Protsenko S. P. 222

Pruel E. R. 94, 112, 120, 124, 125  
Puchkov V. A. 25, 26  
Punin V. T. 224, 231  
Pushkin M. S. 223

## R

Radchenko A. V. 319, 320  
Radchenko P. A. 319, 320  
Raevsky V. A. 202, 221  
Ralchenko V. G. 208  
Ralnikov M. A. 55, 188, 206, 210, 229, 235, 238  
Ratakhin N. A. 160  
Razin A. V. 75, 113  
Razumkov A. S. 340  
Rebenok E. N. 321  
Reyno V. V. 101  
Rezac K. 160  
Rodikov S. V. 313  
Rogacheva A. I. 200  
Rogaev K. S. 183  
Romanova M. D. 311  
Romashka M. Yu. 341, 343  
Rousculp C. L. 160  
Rubina L. I. 321, 327, 333  
Rudnev A. V. 237  
Rudometkin K. A. 35  
Rykovanov G. N. 150

## S

Sadikov I. F. 76  
Sadokhin A. N. 217  
Sadov A. P. 308  
Sadovnichii D. N. 115  
Safronov K. V. 155, 156, 157, 171  
Saitgaev S. S. 9  
Sakharchuk Yu. P. 92  
Sakharov M. Yu. 100  
Salatov E. A. 148  
Samarin S. I. 256, 257, 262  
Samkov I. V. 310  
Samsonova N. S. 201  
Sapozhnikov F. A. 204  
Sasorov P. V. 162  
Saveleva N. V. 322  
Savel'eva T. V. 252  
Savel'ev-Trofimov A. B. 158  
Savelieva N. V. 277  
Saveliev A. V. 157  
Savenkov G. G. 44, 114  
Savichev V. Yu. 63  
Scherbakov V. I. 119  
Scherbakov V. N. 74  
Sdobnov V. I. 84  
Sedova O. V. 55  
Sedov S. Yu. 116  
Selchenkova N. I. 224, 231  
Seleznev V. N. 150  
Semashkin G. V. 95  
Semenova A. S. 196  
Semenov A. Yu. 208  
Senchenkov S. 264  
Serezhkin A. A. 323

Serezhkin S. A. 19  
Serova E. V. 267  
Serov S. B. 324  
Serov Yu. L. 28  
Sevastianov A. B. 115  
Shaburov V. M. 340  
Shadrin A. A. 143, 149  
Shakhray D. V. 197, 239  
Shakirov I. Kh. 76  
Shalkovsky D. M. 188, 210, 235, 237, 325  
Shamin S. N. 196  
Shamraev A. L. 149  
Sharabura N. M. 258  
Sharabura T. M. 259  
Sharafutdinov M. R. 120  
Shcherbakova S. N. 310  
Shcherbakov V. M. 261  
Shcherbakov V. N. 97, 132  
Shekhtman L. I. 124, 125  
Shepelev E. G. 214  
Shestachenko O. E. 51, 253  
Shestakov A. A. 150, 334, 337  
Shestakovskaya E. C. 305  
Shevchenko A. A. 88  
Shevchenko V. G. 236  
Shiberin I. V. 237  
Shirinkina I. G. 189  
Shirobokov A. E. 235  
Shishlov A. V. 160  
Shishov N. I. 80, 99  
Shkarovsky D. A. 246  
Shkoda O. A. 290  
Shmakov A. N. 120  
Shmatov M. L. 166  
Shorohov E. V. 27  
Shorokhov E. V. 189, 218, 233, 234  
Shor V. A. 26  
Shtabel N. V. 339  
Shubin O. N. 25  
Shuikin A. N. 199  
Shults O. V. 254, 255, 265  
Shurina E. P. 338, 339  
Shushlebin A. N. 150  
Shuvalov V. V. 26  
Shvaiko V. N. 98  
Shvaleva R. K. 336  
Sidorov K. S. 237  
Silantieva I. Yu. 246, 249  
Sila O. 160  
Silnikov M. V. 132  
Sil'vestrov V. V. 109  
Silvestrov V. V. 117  
Simonenko V. A. 20, 25, 26, 34, 61, 243, 248, 254  
Simonenko V. F. 59  
Simonenko V. A. 255  
Simonov Ar. Yu. 100  
Simonov A. Yu. 50  
Sinitsyn A. V. 258  
Sin'kova O. G. 52  
Skachkov P. P. 275  
Skibo A. A. 255  
Skobeev A. V. 311



- Skorkin N. A. 26  
 Slesareva A. N. 155  
 Smachnaya O. V. 55  
 Smirnova D. E. 226  
 Smirnova D. E. 228  
 Smirnov E. B. 74, 76, 81, 94, 97, 112, 118, 119, 120, 121, 125, 132  
 Smirnov N. A. 84, 143, 149, 204  
 Smirnov V. N. 45, 313  
 Smirnov V. V. 206  
 Smirnov Yu. G. 55  
 Smol'sky S. L. 252  
 Sofronov V. N. 287  
 Sokolova N. D. 325  
 Sokolov L. V. 150  
 Sokolov M. A. 121  
 Sokolov M. L. 40  
 Sokolov V. P. 255  
 Sokovikov M. A. 186, 227  
 Soldatov A. V. 180, 181  
 Solomyannaya A. D. 151  
 Solovei V. A. 252  
 Solovieva J. V. 219  
 Sorokin S. A. 161, 170  
 Sosikov V. A. 201  
 Sovyk D. N. 208  
 Stadnik A. L. 340  
 Stankevich A. V. 76, 121, 123, 128  
 Starikov S. V. 226, 228  
 Starostin A. N. 137, 141  
 Starshinov A. V. 85  
 Statsenko V. P. 24, 52, 148, 339  
 Stegailov V. V. 226  
 Stepanenko E. N. 325  
 Stepanov E. A. 56  
 Stolbikov M. Yu. 46  
 Strinadkin S. D. 84  
 Stroev N. 167  
 Stuchebryukhov I. A. 208  
 Sukhikh A. S. 334  
 Sun C. 63  
 Sun S. 139  
 Surkov I. Yu. 123  
 Surov V. S. 325  
 Svetsov V. V. 26  
 Sviridov E. V. 51  
 Syrova I. V. 335  
 Syrunin M. A. 237  
 Syskov D. V. 46
- T**
- Tabachenko A. N. 183  
 Taibinov N. P. 121, 128  
 Taluts N. I. 206, 210, 228, 240  
 Tanakov Z. V. 56  
 Tan D. 179  
 Tan F. 63  
 Tan K. Y. 71  
 Tan X. 179  
 Tarakanov V. P. 165, 304  
 Taranov A. A. 25, 26  
 Tarasov A. Yu. 121  
 Tarasov V. I. 335, 340  
 Tarzhanov V. I. 210, 229, 235  
 Taskaev S. 22  
 Taskaev S. V. 47  
 Tayktev A. A. 48  
 Tcoi A. P. 237  
 Telegin S. V. 196  
 Telichko I. V. 229  
 Ten K. A. 76, 94, 112, 120, 124, 125  
 Terehina A. I. 186  
 Terentyeva A. O. 92  
 Tereshkina I. A. 237  
 Teselkin V. A. 88  
 Tiaktev A. A. 206  
 Til'kunov A. B. 231  
 Timakova M. C. 150  
 Timofeyev O. A. 103  
 Timoshenkov S. P. 268  
 Timoshenko V. U. 47  
 Tipeev A. O. 222, 230  
 Tischenko A. S. 149  
 Titov V. M. 112, 125  
 Tkachenko B. I. 237  
 Tkachenko M. I. 214, 221  
 Tkachenko S. I. 162, 164  
 Tolmachev T. P. 219  
 Tolochko B. P. 76, 120, 124, 125  
 Tolstoukhov P. A. 157  
 Toporkov D. Yu. 13  
 Toporova O. O. 339, 340  
 Trapeznikov M. A. 247  
 Tropin D. A. 126  
 Trunin I. R. 231, 237  
 Tselikov I. S. 202  
 Tshipilev V. P. 75, 106, 113  
 Tsygvintsev I. P. 331  
 Tupitsyn A. V. 92  
 Turek K. 160  
 Turmyshev I. S. 165  
 Turutina I. Yu. 339, 340  
 Tyaktev A. A. 15  
 Tyumentsev V. 22
- U**
- Uchaev A. Ya. 224, 231  
 Uglov A. S. 257  
 Uglov V. V. 172  
 Ulyanov O. N. 321, 327, 333  
 Ulyanov S. M. 253  
 Urakova A. V. 337  
 Ushakova O. V. 328  
 Utkin A. V. 86, 127, 201, 239  
 Uvarov S. V. 39, 184, 227
- V**
- Valeeva O. V. 253  
 Valger S. A. 283  
 Varfolomeev D. A. 90, 97, 188, 294  
 Varfolomeyev D. A. 235  
 Vasileva A. A. 80  
 Vasilev A. V. 130  
 Vasiliev A. N. 47

Vasilyev A. A. 214  
 Vavilova I. G. 252  
 Vazhenin A. V. 258, 259  
 Vershinskaya A. S. 337  
 Vetchinnikov M. V. 190, 201  
 Veysiye B. 132  
 Vikhlyaev D. A. 157  
 Vikhornova T. L. 191  
 Vinogradov A. V. 214  
 Virchenko V. A. 274  
 Vlasov A. N. 46  
 Vlasov V. V. 299, 300  
 Volkova A. Yu. 194  
 Volkova O. S. 47  
 Volkov I. A. 245  
 Volkov I. A. 247, 266  
 Volkov N. B. 164, 165, 192  
 Voloshin N. A. 172  
 Vorobyova M. A. 204  
 Vorobyov Yu. V. 195  
 Voronin B. L. 190, 201

## W

Waldbock J. 180, 181  
 Wang G. 63, 179  
 Wei S. 8, 53, 138, 139  
 Wen Y. S. 71, 72

## X

Xiao D. 8  
 Xue C. 8, 139

## Y

Yablonskikh T. I. 189  
 Yakimova M. N. 235  
 Yakushev V. V. 200, 239  
 Yalovets A. P. 157, 172, 208  
 Yang Yao 73  
 Yanilkin A. V. 105, 133, 341, 343, 344  
 Yanilkin Yu. V. 52, 281, 287, 301, 339, 340  
 Yankovsky B. D. 181  
 Yazova E. Yu. 249  
 Yeguzhova M. Yu. 24, 287  
 Yugov N. T. 183  
 Yu J. 179  
 Yunoshev A. S. 109  
 Yurchenko O. S. 55  
 Yurkevich A. A. 158  
 Yusupov D. T. 55, 237

## Z

Zabarko D. A. 302  
 Zagryadtskiy F. S. 87, 91  
 Zaikovskii V. N. 33  
 Zaitsev A. V. 25  
 Zaitsev A. V. 26  
 Zakharov P. P. 289  
 Zakhrov A. I. 42  
 Zamoranskaya M. V. 263  
 Zamotaev D. N. 214  
 Zamozdra S. 22  
 Zamurae D. O. 149  
 Zamyslov V. E. 275  
 Zarko V. E. 75, 106  
 Zavadskii A. O. 288  
 Zaviyalov V. V. 337  
 Zel'dovich V. I. 27, 50, 233, 234  
 Zelenov A. N. 40  
 Zelepugin A. S. 290, 291  
 Zelepugin S. A. 290, 291  
 Zemskov U. A. 165  
 Zetser Yu. I. 26  
 Zhakhovsky V. V. 159  
 Zhang X. 63  
 Zhang Y. 8, 139  
 Zhao J. 63  
 Zherebtsov A. L. 90, 97  
 Zherebtsov D. A. 47  
 Zhernokletov M. V. 199  
 Zhgilev I. N. 189  
 Zhgun D. V. 115  
 Zhilin A. A. 48  
 Zhilkin A. G. 287, 292  
 Zhilyaeva N. S. 45, 188, 325  
 Zhmailo V. A. 24, 148, 287  
 Zhong T. 63  
 Zhukov A. N. 200, 239  
 Zhulanov V. V. 124, 125  
 Zhvaniya I. A. 170  
 Zilevich A. 167  
 Zima V. P. 93  
 Zorina O. D. 275  
 Zubareva A. N. 201  
 Zueva L. M. 246, 249, 321  
 Zverev A. S. 92, 98  
 Zyryanov V. V. 46

# СОДЕРЖАНИЕ

## ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ PLENARY SESSION

РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ, ВЫЗВАННОЙ ЧЕЛЯБИНСКИМ БОЛИДОМ. . . . .	7
<i>М. И. Авраменко, И. В. Глазырин, Г. В. Ионов, А. В. Карпеев</i>	
SIMULATION OF THE AIRWAVE CAUSED BY CHELYABINSK SUPERBOLIDE . . . . .	7
<i>М. I. Avramenko, I. V. Glazyrin, G. V. Ionov, A. V. Karpeev</i>	
ПОСЛЕДНИЕ УСПЕХИ В ТЕОРЕТИЧЕСКОМ И ЧИСЛЕННОМ ИЗУЧЕНИИ Z-ПИНЧА В ИНСТИТУТЕ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКЕ . . . . .	8
<i>Х. Ли, Ц. Лю, Н. Дин, С. Вэй, Ц. Хуан, Я. Чжан, Д. Сяо, Ч. Сюэ</i>	
RECENT ADVANCES IN THEORETICAL AND NUMERICAL STUDIES OF WIRE ARRAY Z-PINCH IN THE IAPCM . . . . .	8
<i>H. Li, J. Liu, N. Ding, S. Wei, J. Huang, Y. Zhang, D. Xiao, C.g Xue</i>	
ВОЗМОЖНОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БЛИЖНЕГО ЭШЕЛОНА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ЗЕМЛИ . . . . .	9
<i>В. Г. Дегтярь, Г. Б. Позин, С. С. Саитгареев</i>	
POSSIBILITIES OF THE ROCKET-SPACE COMPLEXES FOR BUILDING THE NEAR ECHELON OF THE EARTH PROTECTION SYSTEM. . . . .	9
<i>V. G. Degtyar, G. B. Pozin, S. S. Saitgaev</i>	

## Секция 1

### КОСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЗЕМЛИ, ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

#### Section 1

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

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И НЕСФЕРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КОЛЛАПСЕ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ . . . . .	13
<i>Р. И. Нигматулин, А. А. Аганин, М. А. Ильгамов, Д. Ю. Топорков</i>	
SHOCK WAVES AND NON-SPHERICAL EFFECTS AT COLLAPSE OF VAPOUR BUBBLES . . . . .	13
<i>R. I. Nigmatulin, A. A. Aganin, M. A. Ilgamov, D. Yu. Toporkov</i>	
О ВЗРЫВНЫХ И ЭВОЛЮЦИОННЫХ ГИПОТЕЗАХ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЛУНЫ . . . . .	13
<i>В. Ф. Анисичкин, А. П. Еришов</i>	
EXPLOSION AND EVOLUTIONAL HYPOTHESES OF THE MOON ORIGIN. . . . .	14
<i>V. F. Anisichkin, A. P. Ershov</i>	
ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, СОЗДАВАЕМЫЕ ПАДЕНИЯМИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМЕТ НА ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ . . . . .	14
<i>А. А. Баренбаум</i>	
GEOLOGICAL STRUCTURES CREATED BY DOWNS GALACTIC COMETSON THE TERRESTRIAL PLANETS . . . . .	15
<i>A. A. Barenbaum</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ, ВЫЗВАННОЙ ДЕЙСТВИЕМ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ – ТЭЙЛОРА, ПРИ НАРАСТАЮЩЕМ УСКОРЕНИИ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ . . . . .	15
<i>И. Л. Бугаенко, А. В. Павленко, А. А. Тяктев, С. С. Мокрушин</i>	
EXPERIMENTAL STUDY OF THE TURBULENT MIXING ZONE DEVELOPMENT DUE TO RAYLEIGH–TAYLOR INSTABILITY AT PROGRESSIVE ACCELERATION OF THE CONTACT BOUNDARY . . . . .	15
<i>I. L. Bugaenko, A. V. Pavlenko, A. A. Tyaktev, S. S. Mokrushin</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРЕГРАДОЙ. . . . .	15
<i>А. В. Герасимов</i>	
MODELING INTERACTION OF GROUPS OF ELEMENTS WITH TARGET . . . . .	16
<i>A. V. Gerasimov</i>	
МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В СВЕРХНОВЫХ ТИПА IA . . . . .	17
<i>С. И. Глазырин</i>	
TURBULENCE MODEL FOR FLAME PROPAGATION IN SUPERNOVAE IA. . . . .	17
<i>S. I. Glazyrin</i>	
ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПРОЧНОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КУБИЧЕСКОГО УДАРНИКА НА ПРОЦЕСС ЕГО ПРОНИКАНИЯ В НИЗКОПРОЧНУЮ ПРЕГРАДУ . . . . .	17
<i>В. К. Голубев</i>	
INFLUENCE OF SPATIAL ORIENTATION OF SOLID HIGH-SPEED CUBIC STRIKER ON ITS PENETRATION INTO LOW-STRENGTH BARRIER . . . . .	18
<i>V. K. Golubev</i>	

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА. НЕКОТОРЫЕ ИНТЕРЕСНЫЕ ДЕТАЛИ . . . . .	18
<i>М. Б. Голубев</i>	
INSTABILITY OF TANGENTIAL DISCONTINUITY. SOME INTERESTING DETAILS. . . . .	18
<i>M. B. Golubev</i>	
ЭВОЛЮЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В СЛОИСТЫХ СИСТЕМАХ . . . . .	18
<i>К. Е. Городничев, С. Е. Куратов, С. А. Серезжин</i>	
EVOLUTION OF DISTURBANCES IN LAYERED SYSTEMS . . . . .	19
<i>K. E. Gorodnichev, S. E. Kuratov, S. A. Serezhkin</i>	
РАЗРУШЕНИЕ МЕТЕОРОИДОВ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ . . . . .	19
<i>В. И. Гроховский</i>	
THE FAILURE OF METEORIODS WITH DIFFERENT COMPOSITION AND STRUCTURE . . . . .	19
<i>V. I. Grokhovsky</i>	
СПОСОБЫ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОПАСНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ . . . . .	20
<i>Д. А. Грязных, В. А. Симоненко, В. П. Елсуков, С. Н. Лебедев, И. А. Литвиненко</i>	
METHODS OF SHOCK IMPACT ON HAZARDOUS NEAR-EARTH OBJECTS . . . . .	20
<i>D. A. Gryaznykh, V. A. Simonenko, V. P. Elsuikov, S. N. Lebedev, I. A. Litvinenko</i>	
ЛАМИНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ПРОСТЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ . . . . .	20
<i>В. А. Демин, Е. А. Попов</i>	
LAMINAR MODES OF MIXING IN SIMPLE CONVECTIVE SCHEMES . . . . .	21
<i>В. А. Демин, Е. А. Попов</i>	
ЧЕЛЯБИНСКИЙ БОЛИД И МЕТЕОРИТ «ЧЕЛЯБИНСК» . . . . .	21
<i>А. Е. Дудоров, Д. Д. Бадюков, Н. Н. Горькавый, О. В. Еретнова, С. Н. Замоздра, А. Е. Майер, С. В. Таскаев, В. А. Тюменцев, С. А. Хайбрахманов</i>	
CHELYABINSK BOLIDE AND METEORITE «CHELYABINSK» . . . . .	22
<i>A. Dudorov, D. Badyukov, N. Gorkavyi, O. Eretnova, S. Zamozdra, A. Mayer, S. Taskaev, V. Tyumentsev, S. Khaibrakhmanov</i>	
ЧАСТОТА ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ . . . . .	22
<i>А. Е. Дудоров, О. В. Еретнова</i>	
FREQUENCY OF METEORITE FALLING . . . . .	23
<i>А. Е. Dudorov, O. V. Eretnova</i>	
ПРЯМОЕ 3D ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ТЕЧЕНИИ СО СДВИГОМ СКОРОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ . . . . .	23
<i>С. И. Глазырин, М. Ю. Егужова, В. А. Жмайло, В. П. Стаценко</i>	
DIRECT 3D NUMERICAL SIMULATION OF INSTABILITY DEVELOPMENT AND TURBULENT MIXING IN SHEAR FLOWS IN MAGNETIC FIELD . . . . .	24
<i>S. I. Glazyrin, M. Yu. Yeguzhova, V. A. Zhmailo, V. P. Statsenko</i>	
ПРОБЛЕМЫ И ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНЕТАРНОЙ ЗАЩИТЫ . . . . .	24
<i>А. В. Зайцев, Н. А. Махутов, Д. В. Петров, В. А. Пучков, В. А. Симоненко, А. А. Таранов, О. Н. Шубин</i>	
PROBLEMS AND FUNDAMENTALS OF THE INTERNATIONAL PLANETARY DEFENCE SYSTEM DEVELOPMENT . . . . .	25
<i>A. V. Zaitsev, N. A. Makhutov, D. V. Petrov, V. A. Puchkov, V. A. Simonenko, A. A. Taranov, O. N. Shubin</i>	
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЙОНОВ И ПОСЛЕДСТВИЙ ПАДЕНИЙ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ . . . . .	25
<i>А. В. Зайцев, Ю. И. Зецер, О. М. Кочетова, В. И. Ларионов, Н. А. Махутов, О. П. Попова, В. А. Пучков, В. В. Светцов, В. А. Симоненко, Н. А. Скоркин, А. А. Таранов, Ю. А. Чернетенко, В. А. Шор, В. В. Шувалов</i>	
FORECASTING AREAS AND CONSEQUENCES OF CELESTIAL BODIES' FALLS . . . . .	26
<i>A. V. Zaitsev, Yu. I. Zetser, O. M. Kochetova, V. I. Larionov, N. A. Makhutov, O. P. Popova, V. A. Puchkov, V. V. Svetsov, V. A. Simonenko, N. A. Skorkin, A. A. Taranov, Yu. A. Chernetenko, V. A. Shor, V. V. Shuvalov</i>	
МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ . . . . .	26
<i>В. И. Зельдович, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец, С. М. Долгих, К. В. Гаан, Е. В. Шорохов</i>	
METALLOGRAPHIC INVESTIGATIONS OF THE DEFORMATION PHENOMENA AT COLLAPSE OF A CYLINDRICAL STEEL SHELL . . . . .	27
<i>V. I. Zel'dovich, N. Yu. Frolova, A. E. Kheifets, S. M. Dolgikh, K. V. Gaan, E. V. Shorohov</i>	
ДЕТОНАЦИОННАЯ СМЕРТЬ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРА . . . . .	27
<i>М. Я. Иванов, Ю. Л. Серов</i>	
DETONATION DEATH OF THE CHELYABINSK METEOR . . . . .	28
<i>M. Ya. Ivanov, Yu. L. Serov</i>	

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ФРАГМЕНТОВОТ АФЕЛИЯ ДО ПАДЕНИЯ НА СНЕГ . . . . .	29
<i>Г. В. Ионов</i>	
MODELING OF HEATING AND COOLING OF THE BOLIDE FRAGMENTS FROM THE APHELION TO FALL ON SNOW . . . . .	29
<i>G. V. Ionov</i>	
РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ. . . . .	30
<i>Г. В. Ионов</i>	
THE SIMULATION OF FRAGMENTS MOTION IN THE EARTH ATMOSPHERE ACCORDING TO THE OBSERVATIONAL DATA. . . . .	30
<i>G. V. Ionov</i>	
АНАЛИЗ ЗВУКОВЫХ ЗАПИСЕЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ. . . . .	31
<i>Г. В. Ионов</i>	
THE BOLIDE SOUND RECORDS ANALYSIS AND RECOVERING OF DETAILS OF THE FRAGMENTS MOVEMENT THE ATMOSPHERE . . . . .	32
<i>G. V. Ionov</i>	
ПОЛНОТА И ТОЧНОСТЬ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА . . . . .	32
<i>Ф. Х. Каримов</i>	
COMPLETENESS AND ACCURACY OF SEISMIC RISK ASSESSMENTS. . . . .	32
<i>F. H. Karimov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ, ВЫТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ПЛОСКОГО РАДИАЛЬНОГО СОПЛА. . . . .	33
<i>С. П. Киселев, В. П. Киселев, В. Н. Зайковский</i>	
INVESTIGATION OF UNSTEADY SUPERSONIC JET FLOWING FROM A FLAT RADIAL NOZZLE . . . . .	33
<i>S. P. Kiselev, V. P. Kiselev, V. N. Zaikovskii</i>	
ПАДЕНИЕ КРУПНОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ВО ВНУТРЕННИЙ ВОДОЕМ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ИМПАКТНОГО ЦУНАМИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИБРЕЖНУЮ ТЕРРИТОРИЮ . . . . .	34
<i>О. Г. Котова, И. В. Глазырин, В. П. Елсуков, А. В. Карпеев, Д. А. Краснослободцев, В. Н. Ногин, В. А. Симоненко, А. В. Хмелев</i>	
LARGE COSMIC BODY INCIDENT INTO INLAND WATER: MODELING OF IMPACT TSUNAMI FORMATION AND ITS INFLUENCE ON THE NEARSHORE ZONE . . . . .	34
<i>O. G. Kotova, I. V. Glazyrin, V. P. Elsuikov, A. V. Karpeev, D. A. Krasnoslobodtsev, V. N. Nogin, V. A. Simonenko, A. V. Khmelyov</i>	
ОСОБЕННОСТИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ. . . . .	34
<i>В. Г. Лупанов</i>	
HYPERSONIC PECULIARITIES OF THE BODY MOVEMENT IN THE EARTH'S ATMOSPHERE . . . . .	34
<i>V. G. Lupanov</i>	
ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕГРАД НА ГЛУБИНУ ВНЕДРЕНИЯ УДАРНОГО ЯДРА . . . . .	35
<i>А. С. Мазур, К. А. Рудомёткин</i>	
INFLUENCE OF METALL BARRIER MECHANICAL PROPERTIES AT A PENETRATION DEPTH OF STRIKING BALL . . . . .	35
<i>A. S. Mazur, K. A. Rudometkin</i>	
ДВИЖЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА В АТМОСФЕРЕ. . . . .	36
<i>А. Е. Дудоров, А. Е. Майер</i>	
MOTION AND FRACTURE OF CHELYABINSK METEOROID IN ATMOSPHERE. . . . .	36
<i>A. E. Dudorov, A. E. Mayer</i>	
ОБ ОДНОЙ НОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КОНТАКТНОГО РАЗРЫВА . . . . .	36
<i>А. Ю. Микулин, С. Е. Куратов</i>	
ABOUT ONE INSTABILITY OF CONTACT DISCONTINUITY . . . . .	37
<i>A. Yu. Mikulin, S. E. Kuratov</i>	
ФИЗИКА КУМУЛЯЦИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ГИПЕРКУМУЛЯТИВНОГО РЕЖИМА СТРУЕОБРАЗОВАНИЯ . . . . .	37
<i>В. Ф. Минин, О. В. Минин, И. В. Минин</i>	
PHYSICS OF CUMULATION: THE FUTURE OF HYPERCUMULATIVE REGIME OF JET FORMATION . . . . .	37
<i>V. F. Minin, O. V. Minin, I. V. Minin</i>	
ГИДРОДИНАМИКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЗАСЛОНКИ . . . . .	38
<i>А. К. Музыря</i>	
HYDRODYNAMICS OF QUICK VALVE . . . . .	38
<i>A. K. Muzrya</i>	

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ИНДУЦИРОВАННАЯ ДЕФЕКТАМИ, В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ . . . . .	38
<i>О. Б. Наймарк, С. В. Уваров, И. А. Банникова, И. А. Пантелеев</i>	
DEFECTS-INDUCED TURBULENCE IN CONDENSED MATTER UNDER INTENSE IMPACTS . . . . .	39
<i>O. B. Naimark, S. V. Uvarov, I. A. Bannikov, I. A. Pantelev</i>	
ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ПРОНИКАНИЯ КС В ГОРНЫЕ ПОРОДЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОНИКАНИЯ . . . . .	39
<i>А. Г. Нескин, А. Н. Зеленов</i>	
ESTIMATED MAXIMUM SPEED OF SHAPED-CHARGE JET PENETRATION INTO THE ROCK AND OPTIMIZATION OF SPEED DISTRIBUTION TO INCREASE PENETRATION DEPTH. . . . .	40
<i>A. G. Neskin, A. N. Zelenov</i>	
ПОРОХОВОЙ ГЕНЕРАТОР ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА С ЦЕЛЬЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРИТОКА ФЛЮИДОВ В СКВАЖИНУ . . . . .	40
<i>А. Г. Нескин, А. Н. Зеленов, М. Л. Соколов</i>	
POWDER PRESSURE GENERATOR FOR PULSED-WAVE IMPACT ON THE WELLBORE AREA OF A PRODUCING FORMATION TO STIMULATE FLUID INFLOW . . . . .	40
<i>A. G. Neskin, A. N. Zelenov, M. L. Sokolov</i>	
О ПРИРОДЕ ВЗРЫВОВ ЧЕЛЯБИНСКОГО И ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТОВ . . . . .	41
<i>А. А. Потанов, Ю. К. Евдокимов</i>	
ABOUT THE NATURE OF CHELYABINSK AND TUNGUSKA METEORITE . . . . .	41
<i>A. A. Potanov, Yu. K. Evdokimov</i>	
О ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИБЛИЖАЮЩИХСЯ К ЗЕМЛЕ СО СТОРОНЫ СОЛНЦА. . . . .	42
<i>М. Е. Прохоров, А. И. Захаров</i>	
POSSIBILITY OF DETECTION FOR HAZARD COSMIC BODIES APPROACHING THE EARTH FROM THE SUN SIDE . . . . .	42
<i>M. E. Prokhorov, A. I. Zakhsrov</i>	
АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ – ВЫЗОВ ЧЕЛОВЕЧЕСТВУ XXI ВЕКА . . . . .	42
<i>Л. В. Рыклова</i>	
ASTEROID-COMET HAZARD – THE MANKIND,S CHALLENGE IN THE 21-CENTURY . . . . .	43
<i>L. V. Rykhlova</i>	
НЕЛОКАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ В МЕТАЛЛЫ . . . . .	43
<i>Г. Г. Савенков, Т. А. Хантулева</i>	
NONLOCAL MODEL FOR SUPERDEEP PENETRATION OF MICROPARTICLES INTO METALS . . . . .	44
<i>G. G. Savenkov, T. A. Khantuleva</i>	
ИНЬ И ЯНЬ В ЖИВОМ И НЕЖИВОМ МИРЕ . . . . .	44
<i>В. Н. Смирнов</i>	
YIN AND YANG IN LIVING AND NONLIVING WORLD . . . . .	45
<i>V. N. Smirnov</i>	
ДВУХСТАДИЙНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ УДЛИНЕННЫХ УДАРНИКОВ . . . . .	45
<i>Н. С. Жильяева, В. Ф. Куропатенко, Е. В. Недоспасова, В. Г. Полеев, В. Н. Смирнов, Л. В. Хардина</i>	
TWO-STEP DEFORMATION OF EXTENDED IMPACTORS . . . . .	45
<i>N. S. Zhilyaeva, V. F. Kuropatenko, E. V. Nedospasova, V. G. Poleev, V. N. Smirnov, L. V. Khardina</i>	
ДВУХИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСКОРИТЕЛЕ ИГУР-3,5 ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ. . . . .	45
<i>П. С. Базаров, А. Н. Власов, П. А. Насонов, М. Ю. Столбиков, Д. В. Финашин</i>	
TWO-PULSE MODE OF BREMSSTRAHLUNG GENERATION BY IGUR-3.5 ACCELERATOR FOR FAST PROCESSES RECORDING . . . . .	46
<i>P. S. Bazarov, A. N. Vlasov, P. A. Nasonov, M. Yu Stolbikov, D. V. Finashin</i>	
АЛГОРИТМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ ДЕТЕКТОРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА. . . . .	46
<i>В. В. Зырянов, Д. В. Сысков</i>	
ALGORITHM OF THE PRELIMINARY DATA HANDLING, GAINED FROM THE DETECTOR GAMMA – RADIATIONS ON THE BASIS OF THE MATRIX SCINTILLATOR . . . . .	46
<i>V. V. Zyryanov, D. V. Syskov</i>	

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФРАГМЕНТОВ МЕТЕОРИТА «ЧЕЛЯБИНСК» . . . . .	47
<i>С. В. Таскаев, Д. М. Галимов, Д. А. Жеребцов, В. В. Ховайло, М. В. Горшенков, А. Н. Васильев, А. Н. Голованов, О. С. Волкова, В. Ю. Тимошенко, А. И. Максимова</i>	
MULTISPECTRAL ANALYSYS OF THE CHELYABINSK METEORITE SAMPLES. . . . .	47
<i>S. V. Taskaev, D. M. Galimov, D. A. Zherebtsov, V. V. Khovaylo, M. V. Gorshenkov, A. N. Vasiliev, A. N. Golovanov, O. S. Volkova, V. U. Timoshenko, A. I. Maximova</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОВЫХ СРЕД, ВЫЗВАННОЙ ДЕЙСТВИЕМ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ – ТЭЙЛОРА, ПРИ ЧИСЛАХ АТВУДА 0,2 И 0,8 . . . . .	48
<i>А. А. Тактев, А. В. Павленко, Н. Б. Аникин, Ю. А. Пискунов, И. Л. Бугаенко, А. М. Андреев, С. С. Мокрушин</i>	
EXPERIMENTAL STUDY OF CHARACTERISTICS OF GAS-MEDIA TURBULENT MIXING ZONE INDUCED BY RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY AT ATWOOD NUMBERS 0.2 AND 0.8 . . . . .	48
<i>A. A. Tayktev, A. V. Pavlenko, N. B. Anikin, Yu. A. Piskunov, I. L. Bugaenko, A. M. Andreev, S. S. Mokrushin</i>	
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО АКУСТО-КОНВЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИНАМИКУ ЭКСТРАКЦИИ ВЛАГИ ИЗ ЗЕРЕН КЕДРА . . . . .	48
<i>А. В. Федоров, А. А. Жилин</i>	
INVESTIGATION INTO THE INFLUENCE OF HIGH INTENSIVE ACOUSTO- CONVECTIVE IMPACT ON THE DYNAMICS OF MOISTURE EXTRACTION FROM CEDAR KERNELS . . . . .	48
<i>A. V. Fedorov, A. A. Zhilin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАДЕНИЯ ФРАГМЕНТА МЕТЕОРИТА «ЧЕЛЯБИНСК» В ОЗЕРО ЧЕБАРКУЛЬ. . . . .	49
<i>С. А. Хайбрахманов, А. Е. Дудоров</i>	
INVESTIGATION OF THE FALLING OF THE «CHELYABINSK» METEORITE FRAGMENT ON THE CHEBARKUL LAKE . . . . .	49
<i>S. Khaibrakhmanov, A. Dudorov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННЫХ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ШАРОВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ МАГНИТНЫХ ПОРОШКОВЫХ ФИГУР . . . . .	49
<i>В. И. Зельдович, А. Э. Хейфец, Н. Ю. Фролова, А. К. Музыря, А. Ю. Симонов</i>	
INVESTIGATION OF THE 12KH18N10T STEEL SPHERICAL SAMPLES, LOADED BY CONVERGING SHOCK WAVES, BY MEANS OF MAGNETIC POWDER FIGURES . . . . .	50
<i>V. I. Zel'dovich, A. E. Kheifets, N. Yu. Frolova, A. K. Musyria, A. Yu. Simonov</i>	
УСТАНОВКИ БИМ 234.3000М И ЛИУ-2 В СОСТАВЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РГК Б1 . . . . .	50
<i>А. Р. Ахметов, А. А. Каргин, П. А. Колесников, О. А. Никитин, С. Д. Хренков</i>	
BIM234.3000M AND LIA-2 INSTALLATIONS AS PART OF X-RAYING COMPLEX RGK B1 . . . . .	51
<i>A. R. Akhmetov, A. A. Kargin, P. A. Kolesnikov, O. A. Nikitin, S. D. Khrenkov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОСТИ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА УДАРНОЙ ТРУБЕ . . . . .	51
<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 HETEROGENEITY OF TURBULENT MIXING ZONE ON THE SHOCK TUBE . . . . .	51
<i>A. V. Pavlenko, O. E. Shestachenko, Yu. A. Piskunov, E. V. Sviridov, A. M. Andreev, V. M. Medvedev, A. I. Baishev</i>	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОГО СПЕКТРА ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ. . . . .	51
<i>Ю. В. Янилкин, В. П. Стаценко, О. Г. Синькова, О. Н. Чернышова, Г. С. Фирсова</i>	
NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF INITIAL PERTURBATION SPECTRUM ON THE EVOLUTION OF GRAVITATIONALLY INDUCED TURBULENT MIXING . . . . .	52
<i>Yu. V. Yanilkin, V. P. Statsenko, O. G. Sin'kova, O. N. Chernysheva, G. S. Firsova</i>	
ПОДХОД РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АБЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ОДНОЙ РЕНТГЕНОГРАММЫ . . . . .	52
<i>С. Вэй, Х. Ли, Ц. Лю, Н. Дин</i>	
REGULARIZATION APPROACH FOR ABEL TRANSFORM BASED IMAGE RECONSTRUCTION BY A SINGLE RADIOGRAPH . . . . .	53
<i>S. Wei, H. Li, J. Liu, N. Ding</i>	
УДАРНО-ВОЛНОВАЯ ИСТОРИЯ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА . . . . .	53
<i>Д. Д. Бадюков</i>	
SHOCK HISTORY OF THE CHELYABINSK METEORITE . . . . .	54
<i>D. D. Vadykov</i>	
СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВЕЩЕСТВЕ ВНЕЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ. . . . .	54
<i>Р. Ф. Гиззатуллина, В. И. Гроховский, Е. А. Козлов, Г. А. Яковлев</i>	

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS OF THE MATTER IN SOME METEORITES BEFORE AND AFTER SHOCK-ISENTROPIC LOADING . . . . .	55
<i>R. F. Gizzatullina, V. I. Grokhovsky, G. A. Yakovlev, E. A. Kozlov</i>	
ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ХОНДРИТА «ЧЕЛЯБИНСК», ОБЪЕМНАЯ ПЛОТНОСТЬ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ЕГО УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ . . . . .	55
<i>Е. А. Козлов, А. Ю. Николаев, Д. Т. Юсупов, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, С. А. Бричиков, А. В. Ольховский, Ю. Г. Смирнов, О. С. Юрченко, О. В. Смачная, О. В. Лысенко, О. В. Седова</i>	
CHEMICAL AND MINERAL COMPOSITION OF «CHELYABINSK» CHONDRITE, VOLUME DENSITY AND PRELIMINARY RESULTS ON SHOCK COMPRESSION . . . . .	55
<i>E. A. Kozlov, A. Yu. Nikolaev, D. T. Yusupov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, S. A. Brichikov, A. V. Olkhovsky, Yu. G. Smirnov, O. S. Yurchenko, O. V. Smachnaya, O. V. Lysenko, O. V. Sedova</i>	
ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ МИШЕНЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ МНОЖЕСТВЕННОМ УДАРЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ СКОРОСТЯХ ДО 1300 м/с . . . . .	56
<i>З. В. Танаков, Е. В. Ботов, К. В. Лизунов, Э. Э. Лин, Е. А. Степанов, В. Н. Хворостин, А. А. Аушев, Н. Ю. Илюшкина, Н. Н. Попов</i>	
FRACTURE MODE OF ALUMINUM ALLOYS TARGET BY MULTIPLE SOLIDS IMPACT BY VELOCITIES TO 1300 m/s . . . . .	56
<i>Z. V. Tanakov, E. V. Botov, K. V. Lizunov, E. E. Lin, E. A. Stepanov, V. N. Hvorostin, A. A. Aushev, N. Yu. Ilyushkina, N. N. Popov</i>	
ИНЕРЦИОННОЕ ДВИЖЕНИЕ И ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ ВО ВСЕЛЕННОЙ . . . . .	57
<i>П. М. Гаврилов</i>	
INERTIAL MOVEMENT AND GRAVITATIONAL INTERACTION OF OBJECTS IN THE UNIVERSE . . . . .	58
<i>P. M. Gavrilov</i>	
ОПАСНОСТЬ СТОЛКНОВЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ С ЗЕМЛЕЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ТАКИХ СОБЫТИЙ . . . . .	59
<i>В. А. Симоненко</i>	
HAZARDS DUE TO SPACE OBJECT IMPACTS THE EARTH AND OPPORTUNITIES TO PREVENT THEM . . . . .	59
<i>V. F. Simonenko</i>	
ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ КУМУЛЯЦИИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ . . . . .	59
<i>Р. И. Нигматулин</i>	
PHYSICAL MECHANISMS AND CUMULATIVE LIMITATIONS IN THE CAVITATION BUBBLES COLLAPSE . . . . .	60
<i>R. I. Nigmatulin</i>	
ЯВЛЕНИЯ С КУМУЛЯЦИЕЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ . . . . .	61
<i>В. А. Симоненко</i>	
PHENOMENA OF ENERGY DENSITY CUMULATION . . . . .	61
<i>V. A. Simonenko</i>	
АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ ЭКСПЕДИЦИИ КА К АСТЕРОИДУ АПОФИС С ВОЗВРАЩЕНИЕМ К ЗЕМЛЕ . . . . .	61
<i>В. В. Ивашкин, И. В. Крылов, А. Лан</i>	
AN ANALYSIS OF TRAJECTORY CHARACTERISTICS FOR SPACE MISSION TO ASTEROID APOPHIS WITH RETURN TO EARTH . . . . .	62
<i>V. V. Ivashkin, I. V. Krylov, A. Lang</i>	
КРИТИЧЕСКИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ ГИПЕРЗВУКОВЫХ КОНИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ . . . . .	62
<i>В. Г. Дегтярь, В. Ю. Савичев</i>	
CRITICAL REYNOLDS NUMBERS FOR HYPERSONIC CONIC FLYING VEHICLES . . . . .	63
<i>V. G. Degtyar, V. Yu. Savichev</i>	
КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ НА УСТАНОВКЕ CQ-4 . . . . .	63
<i>Б. Ло, Г. Ван, Ф. Тань, Т. Чжун, С. Чжан, Ц. Чжао, Ч. Сунь</i>	
QUASI-ISENTROPIC COMPRESSION OF POLYCRYSTALLINE METALS ON CQ-4 DEVICE . . . . .	63
<i>B. Luo, G. Wang, F. Tan, T. Zhong, X. Zhang, J. Zhao, C. Sun</i>	
О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БАФТИНГА . . . . .	64
<i>А. Н. Богданов</i>	
ON POSSIBLE MECHANISM OF BUFFETING OCCURRENCE . . . . .	64
<i>A. N. Bogdanov</i>	
РАЗРУШИТЕЛЬНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ВИХРИ: ТЕОРЕМЫ, РАСЧЕТЫ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ . . . . .	65
<i>С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов, К. В. Баутин</i>	
THE DESTRUCTIVE ATMOSPHERIC VORTICES: THEOREMS, CALCULATIONS, EXPERIMENTS . . . . .	66
<i>S. P. Bautin, I. Yu. Krutova, A. G. Obuhov, K. V. Bautin</i>	



КРУПНЕЙШИЕ ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ В ГОЛОЦЕНЕ И ИХ СВЯЗЬ С КОМЕТНО-АСТЕРОИДНЫМИ УДАРАМИ . . . . .	66
<i>Д. Абботт, Е. Брянт, В. К. Гусьяков, В. Массе</i>	
LARGEST NATURAL CATASTROPHES IN HOLOCENE AND THEIR POSSIBLE CONNECTION WITH COMET-ASTEROID IMPACTS ON THE EARTH . . . . .	67
<i>Д. Н. Abbott, Е. Bryant, V. K. Gusiakov, W. B. Masse</i>	
АНАЛИЗ ПРОБИТИЯ ПРЕГРАД УДАРНИКАМИ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ. . . . .	67
<i>В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлов, М. Ю. Орлов</i>	
ANALYSIS PERFORATION BARIERS STRIKERS FROM NATURAL MATERIALS . . . . .	68
<i>V. P. Glazyrin, Yu. N. Orlov, M. Yu. Orlov</i>	
<b>Секция 2</b>	
<b>ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ</b>	
<b>Section 2</b>	
<b>EXPLOSION AND DETONATION PHENOMENA</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ РЕАКЦИИ ДЕТОНАЦИИ ВВ . . . . .	71
<i>И. Хан, С. П. Лун, И. С. Вен Ф. Д. Ни, С. Л. Го, К. И. Тан</i>	
STUDY ON THE DETONATION REACTION ZONE OF EXPLOSIVES . . . . .	71
<i>Y. Han, X. P. Long, Y. S. Wen, F. D. Nie, X. L. Guo, K. Y. Tan</i>	
МЕТОД КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ УДАРА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ПОРОШКУ: КОМБИНИРОВАННОЕ ИСПЫТАНИЕ НА ТРЕНИЕ И УДАР . . . . .	71
<i>З. Дж. Лю, Ф. Д. Ни, И. С. Вен, С. П. Лун, И. Хан</i>	
SAFETY METHOD OF TILTED IMPACT ON ENERGETIC POWDER: A TEST COMBINING FRICTION AND IMPACT . . . . .	72
<i>Z. J. Lv, F. D. Nie, Y. S. Wen, X. P. Long, Y. Han</i>	
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА И ТЭН К ВОЗДЕЙСТВИЮ УЛЬТРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА . . . . .	72
<i>И. С. Вен, С. П. Лун, Ф. Д. Ни, З. Дж. Лю, И. Хан</i>	
RESPONSE CHARACTERISTICS OF HMX-BASED AND PETN-BASED PBX UNDER ULTRA-HIGH VOLTAGE ELECTROSTATIC DISCHARGE . . . . .	72
<i>Y. S. Wen, X. P. Long, F. D. Nie, Z. J. Lv, Y. Han</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕЖАТЫХ СОСТОЯНИЙ В СИСТЕМЕ ВВ/МЕТАЕМАЯ ПЛАСТИНА . . . . .	73
<i>Янг Яо</i>	
MODELING TWO STAGES EXPLOSIVE/FLYER SYSTEM ON OVERDRIVEN STATES. . . . .	73
<i>Yang Yao</i>	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЭНА И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ МЕТАЛЛОВ . . . . .	73
<i>Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Н. В. Нелюбина, И. Ю. Лисков, А. П. Никитин</i>	
REGULARITIES OF LASER INITIATION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON PETN AND ULTRAFINE METAL INCLUSIONS . . . . .	74
<i>B. P. Aduev, D. R. Nurmukhametov, N. V. Neljubina, I. Yu. Liskov, A. P. Nikitin</i>	
АНАЛИЗ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ВО ВЗРЫВ В БРИЗАНТНЫХ ВВ. . . . .	74
<i>И. А. Ахлюстин, Е. Б. Смирнов, В. Н. Щербаков, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Ю. А. Беленовский</i>	
ANALYSIS OF DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION IN HIGH EXPLOSIVES . . . . .	74
<i>I. A. Akhlyustin, E. B. Smirnov, V. N. Scherbakov, B. G. Loboiko, O. V. Kostitsyn, Yu. A. Belenovskiy</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ФТДО И СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ. . . . .	74
<i>Р. Г. Ахметшин, А. В. Разин, В. Е. Зарко, В. П. Ципилев, П. И. Калмыков</i>	
BEAM SIZE EFFECT AT LASER INITIATION OF FTDO AND ITS MIXTURES. . . . .	75
<i>R. G. Akhmetshin, A. V. Razin, V. E. Zarko, V. P. Tsipilev, P. I. Kalmykov</i>	
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ГОРЮЧЕ-ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ . . . . .	75
<i>Л. Х. Бадретдинова, И. Ф. Садыков</i>	
IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY USE COMBUSTIBLE-OXIDATION SYSTEMS . . . . .	76
<i>L. Kh. Badretdinova, I. F. Sadikov</i>	
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ 1,3,5-ТРИАМИНО-2,4,6-ТРИНИТРОБЕНЗОЛА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СТАТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ . . . . .	76
<i>Е. Б. Смирнов, О. В. Костицын, А. В. Станкевич, Л. Х. Бадретдинова, К. А. Тен, Б. П. Толочко, И. Х. Шакиров</i>	

EQUATION OF STATE FOR 1,3,5-TRIAMINO-2,4,6-TRINITROBENZOL BASED ON THE RESULTS OF STATIC EXPERIMENTS . . . . .	76
<i>E. B. Smirnov, O. V. Kostitsyn, A. V. Stankevich, L. Kh. Badretdinova, K. A. Ten, B. P. Tolochko, I. Kh. Shakirov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ. . . . .	77
<i>Д. А. Баранник, С. А. Душенюк, А. А. Котомин</i>	
STUDY SHOCK WAVE SENSITIVITY MODEL EXPLOSIVE COMPOSITION . . . . .	77
<i>D. A. Barannik, S. A. Dushenok, A. A. Kotomin</i>	
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОСКОЛОЧНЫХ СПЕКТРОВ RSFC С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОДИНЦОВА-ГРЭДИ . . . . .	78
<i>А. В. Бармин, В. Г. Кожевников, Ю. Г. Печенев, Н. А. Имховик</i>	
STATISTICAL TREATMENT OF RSFC FRAGMENTATION RANGES USING ODINTSOV-GRADY DISTRIBUTION. . . . .	79
<i>A. V. Barmin, V. G. Kozhevnikov, Yu. G. Pechenev, N. A. Imkhovik</i>	
ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СОКРИСТАЛЛИЗАТА CL-20 И DNP. . . . .	79
<i>А. А. Васильева, Д. В. Дашко, С. А. Душенюк, А. А. Котомин, С. М. Алдошин, З. Г. Алиев, Т. К. Гончаров, Ю. М. Милехин, Н. И. Шушов</i>	
ОBTAINING, STRUCTURE AND PROPERTIES OF CL-20 AND DNP ENERGETIC COCRYSTAL . . . . .	80
<i>А. А. Vasileva, D. V. Dashko, S. A. Dushenok, A. A. Kotomin, S. M. Aldoshin, Z. G. Aliev, T. K. Goncharov, Yu. M. Milehin, N. I. Shishov</i>	
СВЯЗЬ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С КРИВИЗНОЙ ФРОНТА НА УЧАСТКЕ РАЗВИТИЯ ДЕТОНАЦИИ . . . . .	80
<i>И. Г. Галиуллин, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Ю. А. Беленовский, Е. Б. Смирнов, В. Н. Дунаев</i>	
DETONATION WAVE VELOCITY VERSUS CURVATURE AT DETONATION DEVELOPMENT AREA. . . . .	81
<i>I. G. Galiullin, B. G. Loboiko, O. V. Kostitsyn, Yu. A. Belenovskiy, E. B. Smirnov, V. N. Dunaev</i>	
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ВЗРЫВНОЕ ДЕЙСТВИЕ НОВЫХ МОЩНЫХ ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ТКХ-50, MAD-X1 И APX . . . . .	81
<i>В. К. Голубев, Т. М. Кларпётке</i>	
PHYSICAL, CHEMICAL AND DETONATION PROPERTIES AND EXPLOSIVE ACTION OF NEW POWERFUL HIGH-NITROGEN EXPLOSIVES TKX-50, MAD-X1 AND APX. . . . .	81
<i>V. K. Golubev, T. M. Klarpyotke</i>	
МЕХАНИЗМЫ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ РЕАКЦИИ РАЗЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЫ ТРИАМИНОТРИНИТРОБЕНЗОЛА В РАЗЛИЧНЫХ ИСХОДНЫХ СОСТОЯНИЯХ . . . . .	82
<i>В. К. Голубев</i>	
MECHANISMS AND ENERGETIC BARRIERS OF DECOMPOSITION REACTION OF TATB MOLECULE IN VARIOUS INITIAL STATES . . . . .	82
<i>V. K. Golubev</i>	
РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ СВЕЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕКСОГЕНА В ДОВЗРЫВНОМ РЕЖИМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ . . . . .	83
<i>Б. П. Адуев, С. С. Гречин, И. Ю. Лусков</i>	
RADIATION-INDUCED LUMINESCENCE OF HEXOGEN MONOCRYSTALS IN THE PRE-EXPLOSIVE REGIM UNDER THE INFLUENCE OF PULSED ELECTRON BEAMS. . . . .	83
<i>B. P. Aduev, S. S. Grechin, I. Yu. Liskov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ДЕТОНАЦИИ В НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ВВ ТАТБ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ЕГО ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ СТОЛБИКОМ ИЗ БРИЗАНТНОГО ВВ . . . . .	84
<i>В. В. Атрошкин, А. Г. Глуценко, Д. А. Грибанов, А. К. Музыря, П. А. Насонов, В. И. Сдобнов, Н. А. Смирнов, С. Д. Стринадкин</i>	
STUDYING THE DETONATION DEVELOPMENT IN LOW-SENSITIVE TATB-BASED EXPLOSIVE LOADED BY CYLINDER-SHAPED HE. . . . .	84
<i>V. V. Atroshkin, A. G. Gluschenko, D. A. Gribanov, A. K. Muzyrya, P. A. Nasonov, V. I. Sdobnov, N. A. Smirnov, S. D. Strinadkin</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ С БОЛЬШИМ КРИТИЧЕСКИМ ДИАМЕТРОМ . . . . .	84
<i>Г. С. Григорьев, В. И. Колпаков, А. В. Старишинов</i>	
INDUSTRIAL EXPLOSIVES EFFICIENCY DETERMINATION DEMAND ON CHANGE OF THE SIZES OF THE LEAD COLUMN THROUGH THE AIR INTERVAL. . . . .	85
<i>G. S. Grigoriev, V. I. Kolpakov, A. V. Starshinov</i>	
ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ ДОЗВУКОВОМ И СВЕРХЗВУКОВОМ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ . . . . .	85
<i>Е. Ф. Грязнов, М. М. Бойко, В. И. Колпаков, Е. В. Никитина, А. В. Уткин, В. М. Мочалова</i>	
WAVE EFFECTS IN A STEEL CYLINDRICAL SHELLS BY SUPERSONIC AND SUBSONIC LOADING MODES . . . . .	86
<i>Е. Ф. Gryaznov, M. M. Boiko, V. I. Kolpakov, E. V. Nikitina, A. V. Utkin, V. M. Mochalova</i>	

«ЭФФЕКТ ДОГОРАНИЯ» ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ В ЗАВИСИМОСТЯХ МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА . . . . .	86
<i>В. Ю. Давыдов, А. С. Губин, Ф. С. Загрядцкий, А. Д. Никитин, И. В. Потапов</i>	
DETONATION PRODUCTS “AFTERBURNING EFFECT” IN DEPENDENCIES OF ACCELERATION ABILITY ON CHARGE DENSITY . . . . .	87
<i>V. Yu. Davydov, A. S. Goubin, F. S. Zagryadtskiy, A. D. Nikitin, I. V. Potapov</i>	
ДЕТОНАЦИЯ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ АЛЮМИНИЯ С ПЕРХЛОРАТОМ АММОНИЯ . . . . .	87
<i>А. Ю. Долгобородов, В. Г. Кириленко, М. А. Бражников, А. А. Шевченко, В. А. Теселкин</i>	
DETONATION OF MECHANOACTIVATED MIXTURES OF ALUMINIUM AND AMMONIUM PERCHLORATE . . . . .	88
<i>A. Yu. Dolgoborodov, V. G. Kirilenko, M. A. Brazhnikov, A. A. Shevchenko, V. A. Teselkin</i>	
ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ . . . . .	88
<i>А. П. Еришов</i>	
PHYSICAL MECHANISMS OF THE HIGH-ENTHALPY INITIATION . . . . .	88
<i>A. P. Ershov</i>	
МОДЕЛЬ МЕДЛЕННОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ВВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КИСЛОРОДНЫМ БАЛАНСОМ . . . . .	89
<i>Д. А. Варфоломеев, К. Ф. Гребенкин, А. Л. Жеребцов</i>	
SLOW ENERGY RELEASE MODEL FOR HE WITH NEGATIVE OXYGEN BALANCE . . . . .	90
<i>D. A. Varfolomeev, K. F. Grebyonkin, A. L. Zherebtsov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛЕТА ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ И МЕТАНИЯ ПЛАСТИН ДЛЯ ФЛЕГМАТИЗИРОВАННЫХ ГЕКСОГЕНА И ОКТОГЕНА . . . . .	90
<i>В. Ю. Давыдов, Ф. С. Загрядцкий, А. Д. Никитин, И. В. Потапов, А. С. Губин</i>	
NUMERICAL MODELING OF DETONATION PRODUCT’S EXPANSION AND PLATE’S ACCELERATION BY PHLEGMATIZED HMX AND RDX . . . . .	91
<i>V. Yu. Davidov, F. S. Zagryadtskiy, A. D. Nikitin, I. V. Potapov, A. S. Goubin</i>	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООВОГО ФОТОИНИЦИИРОВАНИЯ ТЭНА ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ МИЛЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ . . . . .	91
<i>А. С. Зверев, А. Г. Кречетов, А. Ю. Митрофанов, А. О. Терентьева, А. В. Тупицын, Ю. П. Сахарчук</i>	
EFFICIENCY OF THERMAL PHOTOINITIATION OF PETN WITH MILLISECOND LASER PULSE . . . . .	92
<i>A. S. Zverev, A. G. Krechetov, A. Yu. Mitrofanov, A. O. Terentyeva, A. V. Tupitsyn, Yu. P. Sakharchuk</i>	
ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ И ТУШЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ . . . . .	92
<i>А. М. Гришин, В. П. Зима, Д. П. Касымов</i>	
EXPLOSIVE AND DETONATION REGIMES AND EXTINGUISHING OF WILDLAND FIRES . . . . .	93
<i>A. M. Grishin, V. P. Zima, D. P. Kasymov</i>	
УДАРНАЯ АДИАБАТА ОДНО- И ДВУКРАТНОГО СЖАТИЯ ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ ПО ДАННЫМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ . . . . .	93
<i>А. О. Кашкаров, Л. А. Мерзиевский, Э. Р. Пруэл, К. А. Тен, Ю. А. Аминов, О. В. Костицын, А. К. Музыря, Е. Б. Смирнов</i>	
HUGONIOT ADIABAT FOR ONE-, AND TWO-FOLD COMPRESSION OF TATB-BASED EXPLOSIVES PLOTTED BY THE DATA OF SYNCHROTRON DIAGNOSTICS OF EXPLOSIVE PROCESSES . . . . .	94
<i>A. O. Kashkarov, L. A. Merzhievsky, E. R. Prueel, K. A. Ten, Yu. A. Aminov, O. V. Kostistyn, A. K. Muzyrya, E. B. Smirnov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ БВВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ С ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОМ . . . . .	94
<i>Н. А. Кирющенко, Т. Н. Исхаков, В. Я. Базотов</i>	
RESEARCH OF FEATURES OF INITIATION OF BVV AT DYNAMIC TESTS WITH PIEZOELEMENT . . . . .	94
<i>N. A. Kiryushchenkova, T. N. Iskhakov, V. Ya. Bazotov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЫ, МЕТАЕМОЙ ВЗРЫВОМ . . . . .	95
<i>С. А. Душенок, Г. В. Семашкин, В. В. Харченко, П. Е. Кискин</i>	
RESEARCH INTO FLIGHT DYNAMICS OF AN EXPLOSION-ACCELERATED SHAPED PLATE . . . . .	95
<i>S. A. Dushenok, G. V. Semashkin, V. V. Kharchenko, P. E. Kiskin</i>	
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВА ПРОВОЛОЧКИ В ХИМИЧЕСКИ ИНЕРТНЫХ И АКТИВНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ . . . . .	95
<i>И. И. Кочетков, А. В. Пинаев</i>	
THE RESULTS OF INVESTIGATION OF THE WIRE’S EXPLOSION IN CHEMICALLY INERT AND ACTIVE BUBBLE MEDIA . . . . .	96
<i>I. I. Kochetkov, A. V. Pinaev</i>	

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ТЭНА . . . . .	96
<i>Д. А. Варфоломеев, К. Ф. Гребенкин, А. Л. Жеребцов, О. В. Костицын, Д. В. Кочутин, М. А. Мащенко, Е. Б. Смирнов, В. Н. Щербakov</i>	
DETONATION WAVE PROFILES OF PHLEGMATIZED PETN EXAMINATION . . . . .	97
<i>D. A. Varfolomeev, K. F. Grebyonkin, A. L. Zherebtsov, O. V. Kostitsyn, D. V. Kochutin, M. A. Mashchenko, E. B. Smirnov, V. N. Shcherbakov</i>	
РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЯЧЕЙСТОЙ СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ И СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ . . . . .	97
<i>А. Д. Егорян, А. Н. Крайко, К. С. Пьянко</i>	
CALCULATION OF NONSTATIONARY CELLULAR STRUCTURE OF DETONATION WAVE AND SPINNING DETONATION . . . . .	97
<i>A. D. Egoryan, A. N. Kraiko, K. S. Piankov</i>	
ОСОБЕННОСТИ МИКРООЧАГОВОГО ХАРАКТЕРА РЕАКЦИИ ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ТЭНА . . . . .	98
<i>А. Г. Кречетов, А. С. Зверев, А. Ю. Митрофанов, А. С. Папешкин, Н. В. Полева, В. Н. Швайко</i>	
FEATURES OF MICRO-CENTER CHARACTER OF EXPLOSIVE DECOMPOSITION REACTION OF LASER INITIATION OF PETN . . . . .	98
<i>A. G. Krechetov, A. S. Zverev, A. Yu. Mitrofanov, A. S. Pashpekin, N. V. Poleeva, V. N. Shvaiko</i>	
ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БОЕПРИПАСАХ ПОНИЖЕННОГО РИСКА ЛИТЬЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ КОМПОНЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИИ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ . . . . .	98
<i>Ю. М. Милехин, А. А. Матвеев, В. Н. Куликов, А. Н. Осавчук, Н. И. Шишов</i>	
PERSPEKTIVE OF USING INSENSITIVE AMMUNITION OF MOLDING EXPLOSIVE COMPOSITIONS BASED ON COMPONENTS AND TECHNOLOGY OF SOLID ROCKET FUELS . . . . .	99
<i>Yu. M. Milekhin, A. A. Matveev, V. N. Kulikov, A. N. Osavfchuk, N. I. Shishov</i>	
ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И МЕХСВОЙСТВ НАРУЖНЫХ СЛОЕВ БЕТОНА НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТАЛЬНОЙ КАМЕРЫ НАГРУЖАЕМОЙ ВЗРЫВОМ . . . . .	99
<i>А. П. Кухарев, В. И. Беляков, М. В. Никульшин, Ар. Ю. Симонов</i>	
EFFECT OF THICKNESS AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF OUTER CONCRETE LAYERS ON THE DISPLACEMENT OF THE EXPLOSIVELY LOADED CYLINDRICAL STEEL CHAMBER . . . . .	100
<i>A. P. Kukharev, V. I. Belyakov, M. V. Nikulshin, Ar. Yu. Simonov</i>	
О ВЛИЯНИИ НА ВЕЛИЧИНЫ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК ОТНОШЕНИЙ РАДИУСА И ДЛИНЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СОСУДА К РАДИУСУ ЗАРЯДА ВВ . . . . .	100
<i>А. П. Кухарев, С. А. Ващинкин, М. Ю. Сахаров, М. В. Никульшин</i>	
DEPENDENCE OF EXPLOSIVE LOADS ON THE RADIUS AND LENGTH OF A CYLINDRICAL VESSEL VERSUS EXPLOSIVE CHARGE RADIUS RELATIONSHIP . . . . .	100
<i>A. P. Kukharev, S. A. Baschinkin, M. Yu. Sakharov, M. V. Nikulshin</i>	
ОБ ОБЩИХ ПАРАМЕТРАХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ ВВ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРАХ НА ГРАНИЦЕ «ВЗРЫВ – НЕВЗРЫВ» . . . . .	100
<i>А. П. Кухарев, О. С. Путилин, М. В. Никульшин</i>	
GENERAL PARAMETERS FOR STRESSED-DEFORMED STATES OF EXPLOSIVES UNDER LOW-VELOCITY IMPACTS AT THE «EXPLOSION – MALFUNCTION» BOUNDARY. . . . .	100
<i>A. P. Kukharev, O. S. Putilin, M. V. Nikulshin</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИК-ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ И РЕГИСТРАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ, ЭКРАНИРОВАННЫХ СЛОЕМ ПЛАМЕНИ . . . . .	101
<i>Е. Л. Лобода, В. В. Рейно</i>	
APPLICATION OF IR-DIAGNOSTICS FOR RESEARCH FIELDS FLAME TEMPERATURE AND REGISTRATION OF HIGH OBJECTS SCREENED BY FLAME. . . . .	101
<i>E. L. Loboda, V. V. Reyno</i>	
ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ ВЗРЫВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ . . . . .	102
<i>В. И. Олешко, В. М. Лисицын, В. В. Лысык</i>	
EMISSION SPECTROSCOPY OF EXPLOSION PLASMA OF ENERGETIC MATERIALS INITIATED BY ELECTRON BEAM . . . . .	102
<i>V. I. Oleshko, V. M. Lisitsyn, V. V. Lysyk</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ДАВЛЕНИЯ С ВЗРЫВНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ . . . . .	103
<i>С. И. Карачинский, И. А. Мальгин, О. А. Тимофеев</i>	
INVESTIGATION INTO OPERATION PARAMETERS OF EXPLOSIVELY-INITIATED GAS-DYNAMIC PRESSURE SOURCE . . . . .	103
<i>S. I. Karachinskiy, I. A. Malguin, O. A. Timofeyev</i>	

ЭФФЕКТЫ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ И ИХ ОПИСАНИЕ РЕАКЦИОННЫМ МЕХАНИЗМОМ С КВАНТОВЫМИ ПОПРАВКАМИ . . . . .	104
<i>С. П. Медведев, С. В. Хомик, Г. Л. Агафонов, О. Г. Максимова</i>	
SELF-IGNITION EFFECTS OF HYDROGENOUS MIXTURES AT HIGH PRESSURE AND ITS INTERPRETATION VIA REACTION MECHANISM WITH QUANTUM CORRECTIONS . . . . .	104
<i>S. P. Medvedev, S. V. Khomik, G. L. Agafonov, O. G. Maximova</i>	
ТЭН, ГЕКСОГЕН, ОКТОГЕН И ТАТБ: ЗАВИСИМОСТЬ ШИРИНЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ОТ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ ПО ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ С ПОПРАВКАМИ НА ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И КВАЗИЧАСТИЧНЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ. . . . .	105
<i>А. Э. Муханов, А. В. Янилкин</i>	
PETN, RDX, HMX, AND TATB: BAND GAP DEPENDENCE ON PRESSURE UNDER HYDROSTATIC COMPRESSION FROM DFT WITH GW AND VDW CORRECTIONS . . . . .	105
<i>А. Е. Муханов, А. В. Янилкин</i>	
ИНИЦИИРОВАНИЕ ФУРАЗАНОТЕТРАЗИНДИОКСИДА И СМЕСЕЙ НА ЕГО ОСНОВЕ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ . . . . .	106
<i>В. И. Олешко, В. Е. Зарко, В. В. Лысык, В. П. Ципилев, П. И. Калмыков</i>	
INITIATION OF FURAZANOTETRAZINEDIOXIDE AND MIXES ON ITS BASIS BY HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM. . . . .	106
<i>V. I. Oleshko, V. E. Zarko, V. V. Lysyk, V. P. Tsipilev, P. I. Kalmykov</i>	
ЗАТУХАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ОБЛАКЕ ПЫЛИ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ НАЧАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЯХ СМЕСИ . . . . .	107
<i>А. В. Пинаев</i>	
THE SUPPRESSION OF A GAS DETONATION IN DUST CLOUD AT LOW INITIAL MIXTURE PRESSURES . . . . .	107
<i>А. В. Pinaev</i>	
ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА И СРЕДНЕОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ ВЗВЕСЕЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ . . . . .	108
<i>А. В. Пинаев</i>	
EFFECT OF AIR PRESSURE AND AVERAGE SUSPENSION DENSITY OF THE EXPLOSIVES ON THE DETONATION WAVE PARAMETERS . . . . .	108
<i>А. В. Pinaev</i>	
ВЛИЯНИЕ ТИПА ИСКУССТВЕННЫХ ПОР НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА . . . . .	109
<i>А. В. Пластинин, А. С. Юношев, В. В. Сильвестров</i>	
EFFECT OF ARTIFICIAL PORE FORM ON DETONATION PARAMETERS OF EMULSION EXPLOSIVES . . . . .	109
<i>А. В. Plastinin, A. S. Yunoshev, and V. V. Sil'vestrov</i>	
ВЛИЯНИЕ «ЭФФЕКТА ДОГОРАНИЯ» ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ИНИЦИИРОВАНИИ ЗАРЯДОВ В СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКЕ . . . . .	110
<i>В. Ю. Давыдов, А. С. Губин, А. Д. Никитин, И. В. Потапов, Г. С. Григорьев</i>	
“AFTERBURNING EFFECT” AT TWO-SIDED INITIATION OF CHARGES IN STEEL COVER . . . . .	110
<i>V. Yu. Davydov, A. S. Goubin, A. D. Nikitin, I. V. Potapov, G. S. Grygoryev</i>	
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ . . . . .	110
<i>Т. Л. Празян</i>	
COMPUTER MODELLING OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF ENERGETIC MATERIALS . . . . .	111
<i>Т. L. Prazyan</i>	
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПЛОТНЫХ ГАЗОВ С УЧЕТОМ РАВНОВЕСНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА . . . . .	111
<i>Э. Р. Прууэл, К. А. Тен, В. М. Титов, А. О. Кашкарров, Л. А. Мерзиевский, А. К. Музыря, Е. Б. Смирнов, К. М. Просвирин</i>	
EQUATION OF STATE OF DENSE GASES WITH REGARD TO EQUILIBRIUM CHEMICAL COMPOSITION . . . . .	112
<i>E. R. Prueuel, K. A. Ten, V. M. Titov, A. O. Kashkarov, L. A. Merzhievsky, A. K. Muzyrya, E. B. Smirnov, K. M. Prosvirin</i>	
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФРОНТА ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В НИТЕВИДНЫХ ОБРАЗЦАХ АТМ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИМПУЛЬСНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА. . . . .	112
<i>Р. Г. Ахметшин, А. В. Разин, В. П. Ципилев</i>	
PROPAGATION OF EXPLOSIVE DECOMPOSITION FRONT IN FILAMENTARY ANM SAMPLES AT LASER PULSE INITIATION IN VARIOUS SPECTRAL REGIONS . . . . .	113
<i>R. G. Akhmetshin, A. V. Razin, V. P. Tsipilev</i>	
ИНИЦИИРОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ (ОБЗОР И НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ) . . . . .	113
<i>Г. Г. Савенков, В. А. Морозов, А. А. Лукин</i>	

INITIATION OF EXPLOSIVE TRANSFORMATIONS IN ENERGY SATURATED MATERIALS BY HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM OF NANOSECOND DURATION (REVIEW AND NEW RESULTS) . . . . .	114
<i>G. G. Savenkov, V. A. Morozov, A. A. Lukin</i>	
МИКРОСЕКУНДНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ И РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ЭНЕРГОЕМКИХ СИСТЕМ . . . . .	114
<i>Д. Н. Садовничий, Ю. М. Милехин, С. А. Лопаткин, Д. В. Жгун, С. А. Малинин</i>	
MICROSECOND ELECTRICAL BREAKDOWN AND DESTRUCTION OF POLYMERIC ENERGY-INTENSIVE SYSTEMS . . . . .	115
<i>D. N. Sadovnichii, Yu. M. Milekhin, S. A. Lopatkin, D. V. Zhgun, S. A. Malinin</i>	
ИНИЦИИРОВАНИЕ РЯДА ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ НЕБОЛЬШИМИ ЗАРЯДАМИ ПВВ-85 . . . . .	115
<i>Е. И. Ермолович, Ю. Г. Печенев, В. Г. Кожевников, А. Н. Михайлюкова, А. Б. Севастьянов, Ф. Т. Хворов</i>	
INITIATION OF EXPLOSIVE COMPOSITIONS USING SMALL CHARGES OF PVV-85 . . . . .	115
<i>E. I. Ermolovich, Yu. G. Pechenev, V. G. Kozhevnikov, A. N. Mikhailuykova, A. B. Sevastianov, F. T. Khvorov</i>	
КРИТЕРИЙ НАЧАЛА ВЗРЫВА ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ВЗРЫВЧАТЫЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА . . . . .	116
<i>С. Ю. Седов, М. Н. Мишуря</i>	
CRITERION OF DETONATION INITIATION UNDER LOW-VELOCITY IMPACT ON OCTOGEN-BASED EXPLOSIVE COMPOUNDS . . . . .	116
<i>S. Yu. Sedov, M. N. Mitsura</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ . . . . .	116
<i>В. В. Сильвестров, С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, А. В. Пластинин</i>	
DETONATION TEMPERATURE MEASUREMENT OF EMULSION EXPLOSIVES . . . . .	117
<i>V. V. Silvestrov, S. A. Bordzilovskii, S. M. Karakhanov, and A. V. Platinin</i>	
МОДЕЛЬ ДЕТОНАЦИИ НЕИДЕАЛЬНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ . . . . .	117
<i>Е. Б. Смирнов, О. В. Костицын, К. М. Мирошкин, А. Н. Киселёв</i>	
DETONATION MODEL FOR NON-IDEAL CONDENSED EXPLOSIVES . . . . .	118
<i>E. B. Smirnov, O. V. Kostitsyn, K. M. Miroshkin, A. N. Kisilyov</i>	
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖАЮЩЕГО ИМПУЛЬСА И ПОРИСТОСТИ ВВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕХОДА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДЕТОНАЦИОННУЮ . . . . .	118
<i>Е. Б. Смирнов, О. В. Костицын, В. И. Щербakov, К. М. Просвирнин, И. А. Ахлюстин</i>	
EFFECT OF LOADING PULSE PARAMETERS AND HE POROSITY ON SHOCK-TO-DETONATION WAVE TRANSITION . . . . .	119
<i>Е. В. Смирнов, О. В. Костицын, В. И. Щербakov, К. М. Просвирнин, И. А. Ахлюстин</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТВЕРДЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВВ . . . . .	119
<i>Е. Б. Смирнов, К. А. Тен, Э. Р. Пруэл, Б. П. Толочко, М. Р. Шарафудинов, А. Н. Шмаков, А. К. Музыря, О. В. Костицын, А. Н. Кутепова, Л. Х. Бадретдинова, К. Э. Купер</i>	
STUDYING THE STRUCTURE OF HETEROGENEOUS SOLID EXPLOSIVES . . . . .	120
<i>Е. В. Смирнов, К. А. Тен, Э. Р. Pruuel, B. P. Tolochko, M. R. Sharafuidinov, A. N. Shmakov, A. K. Muzyrya, O. V. Kostitsyn, A. N. Kuteпова, L. Ch. Badretdinova, K. E. Kuper</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ОБОЛОЧКИ НА ВЕЛИЧИНУ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ДЕТОНАЦИИ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ . . . . .	120
<i>С. М. Долгих, Е. Б. Смирнов, М. А. Соколов, К. М. Просвирнин</i>	
STUDYING THE INFLUENCE OF DYNAMIC RIGIDITY OF SHELL ON LOW-SENSITIVE HE DETONATION. . . . .	121
<i>S. M. Dolgikh, E. B. Smirnov, M. A. Sokolov, K. M. Prosvirnin</i>	
АНИЗОТРОПИЯ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ 1,3,5-ТРИАМИНО 2,4,6-ТРИНИТРОБЕНЗОЛА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В КВАЗИИЗОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ . . . . .	121
<i>А. В. Станкевич, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Тарасов</i>	
ANISOTROPY OF CRYSTAL STRUTURE PARAMETERS FOR 1,3,5-TRIAMINO 2,4,6-TRINITROBENZOL UNDER TEMPERATURE IMPACT IN QUASIBARIC CONDITIONS. . . . .	121
<i>A. V. Stankevich, O. V. Kostitsyn, E. B. Smirnov, N. P. Taibinov, A. Yu. Tarasov</i>	
КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ НА ПОРОШКООБРАЗНОМ ТАТБ . . . . .	122
<i>А. В. Станкевич, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов, Е. Б. Смирнов, А. И. Ахметзянов</i>	
CRYSTALLOGRAPHIC AND MATHEMATICAL MODEL OF X-RAY DIFFRACTION ON POWDER TATB . . . . .	122
<i>A.V. Stankevich, B.G. Loboiko, O.V.Kostitsyn, N.P.Taibinov, E.B. Smirnov, A.I. Akhmetzyanov</i>	
СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОЙ ЗАГРУЗКИ ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА ПОРОШКООБРАЗНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ . . . . .	122
<i>А. В. Станкевич, Т. П. Евсеева, И. Ю. Суркова, В. Я. Базотов</i>	

STRUCTURAL–MECHANICAL MODEL FOR COMBINED LOADING OF POWDER MATERIALS INTO THE PRESSING TOOL . . . . .	123
<i>A. V. Stankevich, T. P. Evseeva, I. Yu. Surkov, V. Ya. Bazotov</i>	
ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ НИЗКОПЛОТНОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТЭНА . . . . .	124
<i>К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, А. О. Кашкаров, Л. А. Андреевских, А. Л. Михайлов, Л. И. Шехтман, В. В. Жуланов, Б. П. Толочко</i>	
DETONATION PARAMETERS OF A LOW-DENSITY PETN-BASED EXPLOSIVE . . . . .	124
<i>К. А. Тен, Е. Р. Pruuuel, А. О. Kashkarov, L. A. Andreevskikh, A. L. Mikhailov, L. I. Shekhtman, V. V. Zhulanov, B. P. Tolochko</i>	
ДИНАМИКА РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ УГЛЕРОДА ПРИ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ. . . . .	125
<i>К. А. Тен, Ю. А. Аминов, В. М. Аульченко, В. В. Жуланов, А. О. Кашкаров, О. В. Костицын, Б. Г. Лобойко, А. К. Музыря, К. В. Просвирнин, Э. Р. Прууэл, В. М. Титов, Б. П. Толочко, Е. Б. Смирнов, Л. И. Шехтман</i>	
DYNAMICS OF CARBON NANOPARTICLE SIZES UNDER DETONATION OF CONDENSED EXPLOSIVES . . . . .	125
<i>К. А. Тен, Ю. А. Aminov, V. M. Aulchenko, V. V. Zhulanov, A. O. Kashkarov, O. V. Kostistyn, B. G. Loboiko, A. K. Muzyrya, K. V. Prosvirnin, E. R. Pruuuel, V. M. Titov, B. P. Tolochko, E. B. Smirnov, L. I. Shekhtman</i>	
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ СИЛАНА В ПРОХОДЯЩИХ И ОТРАЖЕННЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ. . . . .	126
<i>Д. А. Тропин, А. В. Федоров</i>	
PHYSICO-MATHEMATICAL MODELLING OF SILANE IGNITION AND COMBUSTION IN TRANSMITTED AND REFLECTED SHOCK WAVES . . . . .	126
<i>D. A. Tropin, A. V. Fedorov</i>	
ВЛИЯНИЕ ДИЭТИЛЕНТРИАМИНА НА ВРЕМЯ РЕАКЦИИ НИТРОМЕТАНА ПРИ ДЕТОНАЦИИ . . . . .	127
<i>А. В. Уткин, В. М. Мочалова, С. М. Лапин</i>	
THE INFLUENCE OF DIETHYLENETRIAMINE ON THE REACTION TIME OF NITROMETHANE IN DETONATION WAVES . . . . .	127
<i>A. V. Utkin, V. M. Mochalova, S. M. Lapin</i>	
ХЕЛАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ 1,3-ДИКЕТОНОВ И ЕНАМИНОКЕТОНОВ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ МЕТАЛЛОВ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ. . . . .	128
<i>В. И. Филякова, А. Н. Кутепова, А. В. Станкевич, Н. П. Тайбинов, Б. Г. Лобойко, В. Н. Чарушин</i>	
CHELATE COMPLEXES OF FLUORINE-CONTAINING 1,3-DIKETONES AND ENAMINOKETONES – PERSPECTIVE METAL SOURCES IN NANOCRYSTALLINE STATE . . . . .	128
<i>V. I. Filyakova, A. N. Kuterova, A. V. Stankevich, N. P. Taibinov, B. G. Loboiko, V. N. Charuchin</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТАКТНОГО МЕТОДА ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПЛАВКИХ СИСТЕМАХ. . . . .	129
<i>А. Р. Хайруллин, В. Я. Базотов, В. Г. Никитин, Д. И. Хамидуллин</i>	
USING A CONTACT METHOD FOR DETERMINE NATURE OF THE INTERACTION IN A FUSE SYSTEMS . . . . .	129
<i>A. R. Khayrullin, V. Ya. Bazotov, V. G. Nikitin, D. I. Khamidullin</i>	
АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ НЕРАЗРУШАЕМЫХ ТРАНСЛЯТОРОВ ДЕТОНАЦИИ . . . . .	129
<i>А. В. Васильев, С. А. Душенок, А. А. Котомин, С. И. Миткалинный, В. В. Харченко</i>	
OPTIMIZATION OF THE SHELL THICKNESS OF «TRANER». . . . .	130
<i>А. В. Васильев, С. А. Duschenok, A. A. Kotomin, S. I. Mitkalinniy, V. V. Kharchenko</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В РАМКАХ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ . . . . .	130
<i>Т. А. Хмель, А. В. Федоров</i>	
INVESTIGATION OF SHOCK-WAVE DISPERSION PROCESSES WITHIN MOLECULAR-KINETIC MODEL OF COLLISIONAL DYNAMICS OF PARTICLES. . . . .	131
<i>T. A. Khmel, A. V. Fedorov</i>	
СОЗДАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ВЗРЫВНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЯХ . . . . .	131
<i>С. В. Хомик, Б. Вейссьер, С. П. Медведев, В. Монтассьер, Г. Л. Агафонов, М. В. Сильников</i>	
GENERATION OF THE TRANSITIONAL EXPLOSIVE MODES IN HYDROGENOUS MIXTURES . . . . .	132
<i>S. V. Khotik, B. Veyssiere, S. P. Medvedev, V. Montassier, G. L. Agafonov, M. V. Silnikov</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ К008 ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ФОТОХРОНОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ . . . . .	132
<i>И. А. Ахлюстин, М. М. Банников, К. В. Еганов, А. Н. Киселёв, К. М. Мирошкин, К. М. Просвирнин, Е. Б. Смирнов, В. Н. Щербakov</i>	

APPLICATION OF THE ELECTRO-OPTICAL CAMERA K008 FOR THE REGISTRATION SHOCK WAVE AND DETONATION'S PROCESS USING PHOTOCRONOGRAPHIC METHODS . . . . .	132
<i>I. A. Ahlyustin, M. M. Bannikov, K. V. Eganov, A. N. Kiselev, K. M. Miroshkin, K. M. Prosvirnin, E. B. Smirnov, V. N. Shcherbakov</i>	
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ В ТЭНЕ . . . . .	133
<i>A. B. Yanilkin</i>	
ATOMISTIC SIMULATION OF DISLOCATIONS IN PETN . . . . .	133
<i>A.V. Yanilkin</i>	
<b>СЕКЦИЯ 3</b>	
<b>ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ</b>	
<b>Section 3</b>	
<b>DENSE PLASMA PHENOMENA</b>	
РОСТ СКОРОСТИ РЕАКЦИЙ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ ЗА СЧЕТ КВАНТОВЫХ ПОПРАВOK . . . . .	137
<i>B. K. Gryaznov, I. V. Lomonosov, Yu. V. Petrushevich, A. N. Starostin</i>	
INCREASING THE RATE OF NUCLEAR FUSION REACTIONS IN NONIDEAL PLASMA BY QUANTUM CORRECTIONS . . . . .	137
<i>V. K. Gryaznov, I. V. Lomonosov, Yu. V. Petrushevich, A. N. Starostin</i>	
ДИНАМИКА НЕПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ДВОЙНОЙ ИОНИЗАЦИИ (NSDI) АТОМОВ В МОЩНОМ ЛАЗЕРНОМ ИМПУЛЬСЕ . . . . .	137
<i>Ц. Лю, Х. Ли, С. Вэй, Н. Дин</i>	
DYNAMICS OF THE NONSEQUENTIAL DOUBLE IONIZATION (NSDI) OF ATOMS IN AN INTENSE LASER PULSE . . . . .	138
<i>J. Liu, H. Li, S. Wei, N. Ding</i>	
ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОЙ ИМПЛОЗИИ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ . . . . .	138
<i>Н. Дин, Х. Ли, У. Чжан, Ч. Сюэ, Ц. Хуан, Ш. Сун, С. Вэй, Ц. Лю</i>	
NUMERICAL RESEARCHES OF QUASI-SPHERICAL WIRE-ARRAY IMPLOSIONS . . . . .	139
<i>N. Ding, H. Li, Y. Zhang, C. Xue, J. Huang, S. Sun, S. Wei, J. Liu</i>	
ЭНТАЛЬПИЙНЫЕ И ЭНТРОПИЙНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ВЕЩЕСТВЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ . . . . .	139
<i>И. Иосилевский</i>	
ENTHALPIC AND ENTROPIC PHASE TRANSITIONS IN HIGH ENERGY DENSITY NUCLEAR MATTER . . . . .	139
<i>I. Iosilevskiy</i>	
ТЕРМОДИНАМИКА ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ ПРИ МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЯХ . . . . .	140
<i>В. К. Грязнов, И. Л. Иосилевский</i>	
THERMODYNAMICS OF HYDROGEN AND HELIUM AT MEGABAR PRESSURES . . . . .	140
<i>V. K. Gryaznov, I. L. Iosilevskiy</i>	
КВАНТОВЫЕ ПОПРАВКИ К КОНСТАНТАМ СКОРОСТЕЙ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ СОЛНЦА . . . . .	140
<i>A. N. Starostin, M. G. Gladush, Yu. V. Petrushevich</i>	
QUANTUM CORRECTIONS TO FUSION RATES AND THEIR EFFECT IN ENERGY RELEASE PATHS FOR A DENSE PLASMA OF THE SUN . . . . .	141
<i>A. N. Starostin, M. G. Gladush, Yu. V. Petrushevich</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ . . . . .	141
<i>В. Б. Фокин, П. Р. Левашов, М. Е. Поварницын, К. В. Хищенко</i>	
SIMULATION OF PROPERTIES OF METALS UNDER THE ACTION OF INTENSE FEMTOSECOND LASER PULSES . . . . .	142
<i>V. B. Fokin, P. R. Levashov, M. E. Povarnitsyn, K. V. Khishchenko</i>	
ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СРЕДНЕГО АТОМА . . . . .	142
<i>А. А. Овечкин, П. А. Лобода</i>	
TRANSPORT PROPERTIES OF DENSE PLASMAS BASED ON AVERAGE-ATOM MODELS . . . . .	142
<i>A. A. Ovechkin, P. A. Loboda</i>	
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ УПРУГИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ НАГРЕВЕ И РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ СЖАТИЯ ВЕЩЕСТВА . . . . .	143
<i>Н. А. Смирнов</i>	
AB INITIO CALCULATIONS OF THE ELASTIC AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF ALUMINUM CRYSTAL UNDER NON-EQUILIBRIUM HEATING AND DIFFERENT COMPRESSIONS . . . . .	143
<i>N. A. Smirnov</i>	



О ВЛИЯНИИ УЧЕТА ПОПРАВКИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА К ЭНЕРГИЯМ ЭЛЕКТРОННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ НА ИОНИЗАЦИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ ПЛАЗМЫ МНОГОЭЛЕКТРОННЫХ ИОНОВ В СУПЕРКОНФИГУРАЦИОННОМ ПРИБЛИЖЕНИИ . . . . .	143
<i>П. А. Лобода, А. А. Овечкин, В. В. Попова, А. А. Шадрин</i>	
THE EFFECT OF THE FIRST-ORDER CORRECTIONS TO ELECTRON CONFIGURATION ENERGIES ON THE IONIZATION EQUILIBRIUM OF DENSE MULTIELECTRON-ION PLASMAS USING THE MODIFIED SUPERCONFIGURATION APPROACH . . . . .	143
<i>P. A. Loboda, A. A. Ovechkin, V. V. Popova, A. A. Shadrin</i>	
К КИНЕТИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ ФОРМИРОВАНИЯ 3D МАГНИТОСФЕРОПОДОБНЫХ СТРУКТУР ЗАМАГНИЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ . . . . .	144
<i>В. М. Губченко</i>	
TO KINETIC DESCRIPTION OF THE 3D MAGNETOSPHERE-LIKE STRUCTURES FORMATIONS BY MAGNETIZED FLOWS OF DENSE PLASMA . . . . .	145
<i>V. M. Gubchenko</i>	
МАГНИТОАКТИВНЫЕ ЛАЗЕРНАЯ И АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ПЛАЗМЫ . . . . .	145
<i>В. С. Беляев, А. П. Матафонов</i>	
MAGNETO-ACTIVE LASER AND ASTROPHYSICAL PLASMAS . . . . .	146
<i>V. S. Belyaev, A. P. Matafonov</i>	
КОНИЧЕСКИЕ МИШЕНИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО ИНЕРЦИАЛЬНОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ (ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ) . . . . .	146
<i>С. Ю. Гуськов, И. К. Красюк</i>	
CONICAL TARGETS IN RESEARCH ON INERTIAL CONFINEMENT FUSION (HISTORY AND CURRENT STATUS) . . . . .	147
<i>S. Y. Guskov, I. K. Krasnyuk</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЛАКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ОПЫТАХ НА СТЕНДЕ «МКВ-4» И ИХ РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ . . . . .	147
<i>Д. О. Ананьин, А. В. Бессараб, Г. А. Бондаренко, А. В. Гусаков, Г. В. Долголёва, В. А. Жмайло, И. Н. Никитин, Е. А. Новикова, Е. А. Салатов, В. П. Стаценко</i>	
RESEARCH ON INTERACTION OF A LASER PLASMA CLOUD AND MAGNETIC FIELD IN THE EXPERIMENTS ON “MKV-4” TEST BENCH AND THEIR INTERPRETATION IN THEORY AND CALCULATIONS. . . . .	148
<i>D. O. Ananyin, A. V. Bessarab, G. A. Bondarenko, A. V. Gusakov, G. V. Dolgoleva, V. A. Zhmailo, I. N. Nikitin, E. A. Novikova, E. A. Salato, V. P. Statsenko</i>	
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МЕДНОЙ МИШЕНЬЮ . . . . .	148
<i>П. А. Лобода, Д. О. Замураев, Н. Г. Карлыханов, Е. А. Лобода, А. А. Овечкин, А. В. Потанов, Н. А. Смирнов, А. С. Тищенко, А. А. Шадрин, А. Л. Шамраев</i>	
THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF ABSORPTION OF FEMTOSECOND LASER PULSES IN SOLID-DENSITY COPPER . . . . .	149
<i>P. A. Loboda, N. G. Karlykhanov, E. A. Loboda, A. A. Ovechkin, A. V. Potapov, A. A. Shadrin, A. L. Shamraev, N. A. Smirnov, A. S. Tischenko, D. O. Zamuraev</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИШЕНЕЙ С НЕПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ НА МЕГАДЖОУЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВКАХ . . . . .	149
<i>В. А. Лыков, М. И. Авраменко, Е. С. Андреев, Л. И. Ардашева, Н. Г. Карлыханов, М. Ю. Козманов, С. Н. Лебедев, В. А. Мурашкина, Г. Н. Рыкованов, В. Н. Селезнев, Л. В. Соколов, М. С. Тимакова, В. Е. Черняков, М. Н. Чижков, А. А. Шестаков, А. Н. Шушлебин</i>	
THE NUMERICAL SIMULATIONS OF INDIRECT – DRIVE TARGETS FOR THERMONUCLEAR IGNITION ON MEGAJOULE LASERS . . . . .	150
<i>V. A. Lykov, M. I. Avramenko, E. S. Andreev, L. I. Ardasheva, N. G. Karlykhanov, M. Yu. Kozmanov, S. N. Lebedev, V. A. Murashkina, G. N. Rykovanov, V. N. Seleznev, L. V. Sokolov, M. S. Timakova, V. E. Chernyakov, M. N. Chizhkov, A. A. Shestakov, A. N. Shushlebin</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯРКИХ ИСТОЧНИКОВ EUV-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЫ ОЛОВА И ЛИТИЯ . . . . .	151
<i>Д. А. Ким, В. Г. Новиков, Г. В. Долголева, А. Д. Соломянная</i>	
MODELING OF BRIGHT EUV SOURCE BASED ON TIN AND LITHIUM PLASMAS . . . . .	151
<i>D. A. Kim, V. G. Novikov, G. V. Dolgoleva, A. D. Solomyannaya</i>	
НЕПРЕРЫВНОЕ ПОДДЕРЖАНИЕ ПРОТЯЖЕННОЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРОВ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА . . . . .	152
<i>В. П. Зимаков, В. А. Кузнецов, Н. Г. Соловьев, А. Н. Шемякин, А. О. Шилов, М. Ю. Якимов</i>	
CONTINUOUS SUSTAINING OF ELONGATED DENSE PLASMAS IN HIGH PRESSURE RARE GASES BY MEANS OF NEAR-IR LASER RADIATION . . . . .	152
<i>V. P. Zimakov, V. A. Kuznetsov, N. G. Solovuyov, A. N. Shemyakin, A. O. Shilov, M. Yu. Yakimov</i>	

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МИШЕНЕЙ: ОТ УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНОК ДО ТОЛСТЫХ НИЗКОПЛОТНЫХ МИШЕНЕЙ . . . . .	153
<i>А. В. Брантов, В. Ю. Быченко</i>	
OPTIMIZATION OF LASER PROTON ACCELERATION FROM DIFFERENT TARGETS: THIN FOILS AND LOW-DENSE TARGETS. . . . .	153
<i>A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov</i>	
УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ТОНКИХ МИШЕНЕЙ . . . . .	154
<i>Е. А. Говрас, В. Ю. Быченко, А. В. Брантов</i>	
ION ACCELERATION FROM LASER-IRRADIATED THIN TARGETS. . . . .	154
<i>E. A. Govras, V. Yu. Bychenkov, A. V. Brantov</i>	
УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕННОЙ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЕ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ МОЩНОСТЬЮ 200 ТВт . . . . .	155
<i>И. В. Глазырин, А. В. Карпеев, О. Г. Котова, К. С. Назаров, В. В. Плохой, А. В. Потанов, К. В. Сафронов, А. Н. Слесарева</i>	
ELECTRON ACCELERATION IN PLASMA WAKEFIELD USING 200 TW LASER FACILITY. . . . .	155
<i>I. V. Glazyrin, A. V. Karpeev, O. G. Kotova, K. S. Nazarov, V. V. Plokhoy, A. V. Potanov, K. V. Safronov, A. N. Slesareva</i>	
РАСЧЕТЫ РАЗЛЕТА ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ, НАГРЕТОЙ ПРЕДИМПУЛЬСОМ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ . . . . .	155
<i>А. В. Карпеев, Д. С. Гаврилов, И. В. Глазырин, А. Г. Какишин, О. Г. Котова, Е. А. Лобода, Н. А. Михайлов, А. В. Потанов, К. В. Сафронов</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF SOLID TARGET EXPANSION HEATED BY LASER PREPULSE . . . . .	156
<i>А. В. Карпеев, Д. С. Гаврилов, И. В. Глазырин, А. Г. Какишин, О. Г. Котова, Е. А. Лобода, Н. А. Михайлов, А. В. Потанов, К. В. Сафронов</i>	
ГЕНЕРАЦИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ В (P,N)- И (D,N)-РЕАКЦИЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УСКОРЕННЫХ ЛАЗЕРОМ ЧАСТИЦ . . . . .	156
<i>К. В. Сафронов, Д. А. Вихляев, Д. С. Гаврилов, С. А. Горохов, А. Г. Какишин, А. В. Липин, Е. А. Лобода, С. Н. Пахомов, А. В. Потанов, А. В. Савельев, П. А. Толстоухов, В. А. Флегентов</i>	
FAST NEUTRON PRODUCTION FROM (P,N) AND (D,N) REACTIONS DRIVEN BY LASER-ACCELERATED PROTONS AND DEUTERONS . . . . .	157
<i>К. В. Сафронов, Д. А. Вихляев, Д. С. Гаврилов, С. А. Горохов, А. Г. Какишин, А. В. Липин, Е. А. Лобода, С. Н. Пахомов, А. В. Потанов, А. В. Савельев, П. А. Толстоухов, В. А. Флегентов</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПОРОШКОВОЙ СРЕДЫ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ . . . . .	157
<i>В. В. Погорелко, А. П. Яловец</i>	
MODELING OF POWDER MEDIUM EVOLUTION DURING LASER SYNTERING . . . . .	157
<i>V. V. Pogorelko, A. P. Yalovets</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРНЫХ ЯДЕР ИЗЛУЧЕНИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ . . . . .	158
<i>М. Б. Агранат, А. В. Овчинников, В. П. Петровский, А. Б. Савельев-Трофимов, А. А. Юркевич, О. В. Чефонов</i>	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ISOMERIC NUCLEI EXCITATION BY FEMTOSECOND LASER-PRODUCED PLASMA RADIATION. . . . .	158
<i>O. V. Chefonov, M. B. Agranat, A. V. Ovchinnikov, V. P. Petrovsky, A. B. Savel'ev-Trofimov, A. A. Yurkevich</i>	
КРИВЫЕ ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ НА ОСНОВЕ ПЕРВОПРИНЦИПНЫХ РАСЧЕТОВ . . . . .	158
<i>Д. В. Минаков*, П. Р. Левашов</i>	
MELTING CURVES OF METALS IN QUASI-HARMONIC APPROXIMATION BY AB INITIO CALCULATIONS . . . . .	159
<i>D. V. Minakov*, P. R. Levashov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ . . . . .	159
<i>Д. К. Ильницкий, Н. А. Иногамов, В. В. Жаховский, К. П. Мигдал</i>	
MODELING OF PLASTO-ELASTIC DEFORMATION OF METALS UNDER FEMTOSECOND LASER IMPACT . . . . .	159
<i>D. K. Ilitskiy, N. A. Inogamov, V. V. Zhakhovskiy, K. P. Migdal</i>	
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С УСКОРЕНИЕМ ИМПУЛЬСНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ . . . . .	159
<i>С. Л. Роузкэлл</i>	
COMPUTER MODELING OF PULSED POWER EXPERIMENTS. . . . .	160
<i>C. L. Rousculp</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ В ПЛАЗМЕ Z-ПИНЧА ПРИ ТОКАХ СВЫШЕ 2 МА . . . . .	160
<i>А. В. Шишилов, Б. М. Ковальчук, В. А. Кокишенев, Н. Е. Курмаев, А. Ю. Лабецкий, Н. А. Ратахин, Ф. И. Фурсов, Р. К. Чердизов, Д. Клир, J. Siskhard, J. Kravarik, P. Kubes, K. Rezac, O. Sila, H. Orcikova, K. Turek, Г. Н. Дудкин, Б. А. Нечаев, В. Н. Падалко</i>	

EXPERIMENTAL STUDIES OF NEUTRON GENERATION IN Z-PINCH PLASMA AT CURRENTS ABOVE 2 MA . . . . .	160
<i>A. V. Shishlov, B. M. Kovalchuk, V. A. Kokshenev, N. E. Kurmaev, A. Yu. Labetsky, N. A. Ratakhin, F. I. Fursov, R. K. Cherdizov, D. Klir, J. Cikhardt, J. Kravarik, P. Kubes, K. Rezac, O. Sila, H. Orcikova, K. Turek, G. N. Dudkin, B. A. Nechaev, V. N. Padalko</i>	
СЖАТИЕ ДЕЙТЕРИЕВЫХ ЛАЙНЕРОВ НА ГЕНЕРАТОРЕ МИГ . . . . .	161
<i>С. А. Сорокин</i>	
DEUTERIUM GAS-PUFF LINER IMPLOSIONS ON THE MIG GENERATOR. . . . .	161
<i>S. A. Sorokin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ПО НИМ СУБМИКРОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА ТОКА С ЛИНЕЙНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ БОЛЬШЕ 1 МА/СМ . . . . .	161
<i>С. И. Ткаченко, Е. В. Грабовский, П. В. Сасоров, Г. М. Олейник, В. В. Александров, Ю. Г. Калинин, О. Г. Ольховская, К. В. Хищенко, П. Р. Левашов</i>	
STUDY OF ELECTRODE PARAMETERS DURING POWER TRANSMISSION BY SUBMICROSECOND CURRENT PULSE WITH LINEAR DENSITY ABOVE 1 MA/CM VIA MAGNETICALLY INSULATED TRANSMISSION LINES . . . . .	162
<i>S. I. Tkachenko, E. V. Grabovskii, P. V. Sasorov, G. M. Olejnik, V. V. Aleksandrov, Yu. G. Kalinin, O. G. Olhovskaya, K. V. Khischenko, P. R. Levashov</i>	
КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ/СИСТЕМ НАГРУЖЕНИЯ, И НОВАЯ МОДЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА ИЗУЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЛАЙНЕРА . . . . .	162
<i>Аарон Р. Майлс</i>	
INTEGRATED MODELING OF EMG/LOAD SYSTEMS, AND NEW TEST PROBLEM FOR STUDYING LINER INTEGRITY . . . . .	162
<i>Aaron R. Miles</i>	
РОЛЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА С ПИКОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ ПО КОАКСИАЛУ С ПРОМЕЖУТКОМ, РАЗОМКНУТЫМ ИЛИ ЗАМКНУТЫМ МИКРОПРОВОДНИКОМ . . . . .	163
<i>Н. Б. Волков, С. В. Барахвостов, К. А. Нагаев, С. И. Ткаченко</i>	
THE ELECTRODYNAMIC PROCESSES ROLE IN PLASMA CHANNEL FORMATION DURING THE ELECTROMAGNETIC PULSE WITH PICOSECOND FRONT PROPAGATION ALONG THE COAXIAL LINE CONTAINING AN OPEN-ENDED OR MICROWIRE-ENCLOSED GAP . . . . .	164
<i>N. B. Volkov, S. V. Barakhvostov, K. A. Nagayev, S. I. Tkachenko</i>	
НЕПРЕРЫВНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ В АЗОТЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ . . . . .	164
<i>С. Н. Иванов</i>	
RUNAWAY ELECTRONS IN SPARK DISCHARGE IN HIGH-PRESSURE NITROGEN . . . . .	165
<i>S. N. Ivanov</i>	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ СУБНАНОСЕКУНДНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОБРАЗЦАМИ . . . . .	165
<i>К. А. Нагаев, С. В. Барахвостов, И. Л. Музюкин, И. С. Турмышев, В. П. Тараканов, Ю. А. Земсков, Е. А. Чингина, Н. Б. Волков</i>	
ELECTRON BEAM CHARACTERISTICS FOR SUB-NANOSECOND PULSE INTERACTION WITH METALLIC SAMPLES . . . . .	165
<i>K. A. Nagayev, S. V. Barakhvostov, I. L. Muzyukin, I. S. Turmyshev, V. P. Tarakanov, U. A. Zemskov, E. A. Chingina, N. B. Volkov</i>	
ШАРОВАЯ МОЛНИЯ И ЗЕМНЫЕ ГАММА-ВСПЛЕСКИ С ЖЕСТКИМ СПЕКТРОМ . . . . .	166
<i>М. Л. Шматов</i>	
BALL LIGHTNING AND TERRESTRIAL GAMMA-RAY FLASHES WITH HARD SPECTRUM. . . . .	166
<i>M. L. Shmatov</i>	
ГРАНИЦЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛНОСТЬЮ ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ . . . . .	167
<i>А. И. Зилевич, Н. Е. Строев, И. Л. Иосилевский</i>	
BOUNDARIES OF THERMODYNAMIC STABILITY FOR WIDE-RANGE EOS OF FULLY IONIZED ELECTRON-IONIC PLASMAS . . . . .	167
<i>A. Zilevich, N. Stroeve, I. Iosilevskiy</i>	
О НЕКОНГРУЭНТНОСТИ, СКАЧКЕ ПЛОТНОСТИ И ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЕ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ . . . . .	168
<i>И. А. Мартынова, И. Л. Иосилевский</i>	
ABOUT NON-CONGRUENCE, DENSITY GAP AND A PHASE DIAGRAM OF DUSTY PLASMAS . . . . .	168
<i>I. A. Martynova, I. L. Iosilevskiy</i>	
РАСЧЕТ ПОПРАВКИ К УРАВНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОГО ПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ В ИОННОЙ ПОДСИСТЕМЕ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ . . . . .	169
<i>А. Л. Фальков</i>	

CALCULATION OF CORRECTION TO EQUATION OF STATE OF WARM DENSE MATTER DETERMINED BY SPATIAL CORRELATIONS IN IONIC SUBSYSTEM OF SINGLE COMPONENT PLASMA . . . . .	169
<i>A. L. Falkov</i>	
УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МИКРОКАНАЛА В ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ . . . . .	169
<i>И. А. Жвания, В. М. Гордиенко, И. А. Макаров, А. А. Гарматина</i>	
ENHANCEMENT OF X-RAY LINE YIELD UNDER MICROCHANNEL FORMATION IN A SOLID TARGET BY A SEQUENCE OF FEMTOSECOND LASER PULSES . . . . .	170
<i>I. A. Zhvaniya, V. M. Gordienko, I. A. Makarov, A. A. Garmatina</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЗАКОРОЧЕННЫМ РАДИАЛЬНОЙ ФОЛЬГОЙ СТЕРЖНЕВЫМ ПИНЧ-ДИОДОМ НА ГЕНЕРАТОРЕ МИГ . . . . .	170
<i>С. А. Сорокин</i>	
EXPERIMENTS WITH A FOIL-SHORTED ROD-PINCH DIODE ON THE MIG GENERATOR . . . . .	170
<i>S. A. Sorokin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПЛАСТИН FUJI MS И SR . . . . .	171
<i>В. А. Флегентов, С. А. Горохов, К. В. Сафронов</i>	
FUJI MS AND SR IMAGING PLATE CHARACTERISTICS INVESTIGATION. . . . .	171
<i>V. A. Flegentov, S. A. Gorokhov, K. V. Safronov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НА КОНДЕНСИРОВАННЫЕ СРЕДЫ . . . . .	171
<i>Н. А. Волошин, А. Я. Лейви, А. П. Яловец</i>	
EXPERIMENTAL STUDY ON THE IMPACT OF ELECTRIC POWER NANOSECOND PULSES ON CONDENSED MEDIA . . . . .	172
<i>N. A. Voloshin, A. J. Lavie, A. P. Yalovets</i>	
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПРЕССИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА НА РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ . . . . .	172
<i>А. Я. Лейви, А. П. Яловец, Д. Г. Кожевников, В. М. Асташинский, Н. Н. Черенда, В. В. Углов</i>	
INFLUENCE OF PARAMETERS OF COMPRESSION PLASMA FLOW ON THE SURFACE RELIEF OF A METAL TARGET . . . . .	172
<i>А. Я. Лейви, А. П. Яловец, Д. Г. Кожевников, В. М. Асташинский, Н. Н. Черенда, В. В. Углов</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ФОЛЬГИ НА ОДНОРОДНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА . . . . .	173
<i>А. В. Павленко, А. Н. Григорьев, Е. И. Карнаухов</i>	
INVESTIGATION OF FOIL MATERIAL INFLUENCE ON UNIFORMITY OF ELECTRICAL EXPLOSION . . . . .	173
<i>А. В. Павленко, А. Н. Григорьев, Е. И. Карнаухов</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИЗОХОРИЧЕСКОМУ НАГРЕВУ ТОНКИХ ФОЛЬГ УЛЬТРАКОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ . . . . .	173
<i>Е. С. Борисов, Д. С. Гаврилов, А. Г. Какшин, Е. А. Лобода, А. В. Потапов</i>	
APPLICATION OF SPECTRAL INTERFEROMETRY IN EXPERIMENTS ON ISOCHORIC HEATING OF THIN FOILS BY ULTRASHORT LASER PULSES . . . . .	173
<i>E. S. Borisov, D. S. Gavrilov, A. G. Kakshin, E. A. Loboda, A. V. Potapov</i>	
ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОГО ВАКУУМА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ . . . . .	174
<i>М. В. Астафурова, С. Л. Добрецов, В. И. Астафуров</i>	
THE SPATIAL-ELECTROMAGNETIC MODEL OF PHYSICAL VACUUM AND ITS APPLICATIONS . . . . .	174
<i>M. V. Astafurova, S. L. Dobretsov, V. I. Astafurov</i>	
КОНТРАСТ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСАМУЛЬТИ-ТЕРАВАТТНОЙ ПИКОСЕКУНДНОЙ УСТАНОВКИ НА ФОСФАТНОМ НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ . . . . .	175
<i>Д. С. Гаврилов, А. Г. Какшин, Е. А. Лобода</i>	
THE PULSE CONTRAST OF THE MULTI-TW PHOSPHATE ND: GLASS LASER FACILITY. . . . .	175
<i>D. S. Gavrilov, A. G. Kakshin, E. A. Loboda</i>	

#### Секция 4

#### СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССАХ

#### Section 4

#### PROPERTIES OF MATTER AT HIGH-INTENSITY PROCESSES

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ . . . . .	179
<i>Х. Ху, Л. Цао, Ю Чэн, Г. Ван, Ц. Юй</i>	

INTERACTION BETWEEN SHOCK FRONT AND FREE SURFACE FROM EXPERIMENTAL VIEW . . . . .	179
<i>H. Hu, L. Cao, Y. Chen, G. Wangji, J. Yu</i>	
ДИНАМИЧЕСКИЙ РАЗЛОМ ОБЪЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПРИ ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ . . . . .	179
<i>Т. Ли, Д. Тан, Ку. Ли, Д. Фан, Х. Тан, Х. Фу</i>	
DYNAMIC FRACTURE OF BULK METALLIC GLASSES AT HIGH STRAIN RATE . . . . .	179
<i>T. Li, D. Tan, Q. Li, D. Fan, X. Tan, H. Fu</i>	
КИНЕТИКА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА «ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО-ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО» В УДАРНЫХ ВОЛНАХ . . . . .	180
<i>Дин Л. Престон</i>	
SOLID-SOLID PHASE TRANSFORMATION KINETICS IN SHOCK WAVES . . . . .	180
<i>Dean L. Preston</i>	
УДАРНО-ВОЛНОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК . . . . .	180
<i>С. Ю. Ананьев, Б. Д. Янковский, М. Mases, J. Waldbock, M. Dossot, X. Devaux, E. McRae, A. V. Soldatov, В. В. Милевский, А. Ю. Долгобородов</i>	
THE SHOCK WAVE COMPRESSION OF CARBON NANOTUBES . . . . .	181
<i>S. Yu. Anan'ev, B. D. Yankovsky, M. Mases, J. Waldbock, M. Dossot, X. Devaux, E. McRae, A. V. Soldatov, V. V. Milyavskiy, A. Yu. Dolgoborodov</i>	
БЕСПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ КОНДЕНСИРОВАННОЙ СРЕДЫ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ. . . . .	181
<i>В. Ф. Анисичкин</i>	
PARAMETER-FREE EQUATION OF STATE OF CONDENSED MATTER UNDER HIGH DENSITY OF ENERGY . . . . .	182
<i>V. F. Anisichkin</i>	
ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ . . . . .	182
<i>А. Н. Ищенко, С. А. Афанасьева, Н. Н. Белов, В. В. Буркин, К. С. Рогачев, А. Н. Табаченко, Н. Т. Югов</i>	
BEHAVIOR OF CERMET MATERIALS AT HIGH IMPACT . . . . .	183
<i>A. N. Ishchenko, S. A. Afanasyeva, N. N. Belov, V. V. Burkin, K. S. Rogachev, A. N. Tabachenko, N. T. Yugov</i>	
СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФРАГМЕНТАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ . . . . .	183
<i>И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк</i>	
STATISTICAL REGULATIONS OF CERAMIC TUBE SAMPLE FRAGMENTATION . . . . .	184
<i>I. A. Bannikova, S. V. Uvarov, O. B. Naimark</i>	
МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГРЮНАЙЗЕНА . . . . .	184
<i>Р. К. Бельхеева</i>	
NHE MODELS FOR DESCRIPTION OF GRÜNEISEN COEFFICIENT . . . . .	185
<i>R. K. Belkheeva</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТАЛЛОВ . . . . .	185
<i>Д. А. Билалов, М. А. Сокоиков, В. В. Чудинов, В. А. Оборин, А. И. Терехина, О. Б. Наймарк</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF LOCALIZATION OF PLASTIC STRAIN OF METALS UNDER DYNAMIC LOADING . . . . .	186
<i>D. A. Bilalov, M. A. Sokovikov, V. V. Chudinov, V. A. Oborin, A. I. Terehina, O. B. Naimark</i>	
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛОВ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ . . . . .	186
<i>И. Н. Бородин, А. Е. Майер</i>	
FEATURES OF THE DEFECT STRUCTURE FORMATION IN METALS AT SEVERE PLASTIC DEFORMATION . . . . .	187
<i>I. N. Borodin, A. E. Mayer</i>	
ПОВЕДЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МЯГКИХ ГРУНТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ . . . . .	187
<i>А. М. Брагов, В. В. Баландин, А. Ю. Константинов, В. Л. Котов, А. К. Ломунов, А. Р. Филиппов</i>	
BEHAVIOR OF SOME SOFT GROUNDS AND ROCKS UNDER SEVERE DYNAMIC LOADING . . . . .	188
<i>A. M. Bragov, V. V. Balandin, A. Yu. Konstantinov, V. L. Kotov, A. K. Lomunov, A. R. Filippov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКОЛЬНОГО И ОТКОЛЬНОГО СО СМЫКАНИЕМ МЕТАНИЯ ПЛАСТИН ИЗ 12Х18Н10Т ТОЛЩИНОЙ 1; 1,5; 2 И 3 ММ ПРОДУКТАМИ ВЗРЫВА МАЛОГАБАРИТНЫХ УСТРОЙСТВ С ТРОТИЛОВЫМ ЭКВИВАЛЕНТОМ ДО 250 Г ТНТ . . . . .	188
<i>Е. А. Козлов, С. А. Бричиков, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. В. Ольховский, В. Н. Ногин, А. В. Петровцев, Д. М. Шалковский, Д. А. Варфоломеев, Н. С. Жилыева</i>	

EXPERIMENTAL AND CALCULATION STUDY OF SPALL-FREE AND SPALL CLOSURE LAUNCHING OF 12KH18N10T PLATES HAVING 1-, 1.5-, 2-, AND 3-MM THICKNESS BY EXPLOSION PRODUCTS FROM SMALL-SCALE DEVICES WITH UP TO 250 G TNT EQUIVALENT . . . . .	188
<i>E. A. Kozlov, S. A. Brichikov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, A. V. Olkhovsky, V. N. Nogin, A. V. Petrovstev, D. M. Shalkovsky, D. A. Varfolomeev, N. S. Zhilyaeva</i>	
ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ . . . . .	189
<i>И. Г. Бродова, И. Г. Ширинкина, А. Н. Петрова, В. В. Астафьев, Т. И. Яблонских, Е. В. Шорохов, Н. Г. Оглезнева, И. Н. Жгилёв</i>	
THERMAL STABILITY OF ULTRAFINE-GRAINED ALUMINUM ALLOYS AFTER DYNAMIC DEFORMATION . . . . .	189
<i>I. G. Brodova, I. G. Shirinkina, A. N. Petrova, V. V. Astafiev, T. I. Yablonskikh, E. V. Shorokhov, N. G. Oglezneva, I. N. Zhgilev</i>	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛЕ Cu. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В LANL И ИТМФ . . . . .	189
<i>А. Н. Анисимов, М. В. Ветчинников, Б. Л. Воронин, С. А. Грушин, В. А. Дегтярев, Д. А. Демин, М. А. Демина, А. Г. Кечин, С. В. Копкин, В. П. Фомин</i>	
MOLECULAR-DYNAMIC SIMULATION OF SPALLATION PHENOMENA IN MONOCRYSTAL OF Cu. COMPARISON OF THE RESULTS FROM LANL AND ITMP . . . . .	190
<i>A. N. Anisimov, M. V. Vetchinnikov, B. L. Voronin, S. A. Grushin, V. A. Degtiarev, D. A. Demin, M. A. Demina, A. G. Kechin, S. V. Kopkin, V. P. Fomin</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ . . . . .	190
<i>Т. Л. Вихорнова, Л. А. Давыдова, С. А. Гусев, Б. Р. Гафаров, В. П. Мельников</i>	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF POLYMER-BONDED MATERIAL MECHANICAL PROPERTIES IN WIDE RANGE OF STRAIN RATE . . . . .	191
<i>T. L. Vikhornova, L. A. Davydova, S. A. Gusev, B. R. Gafarov, V. P. Melnikov</i>	
ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО СОСТОЯНИЙ МЕТАЛЛА, ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ «КРИСТАЛЛ-ЖИДКОСТЬ» И «ЖИДКОСТЬ-ПАР» ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ИМПУЛЬСНОМ ЭНЕРГОВКЛАДЕ . . . . .	191
<i>Н. Б. Волков, Е. А. Чингина</i>	
FEATURES OF A THERMODYNAMICS DESCRIPTION OF THE METAL SOLID AND LIQUID STATES, AND THE “CRYSTAL-LIQUID” AND “LIQUID-VAPOR” PHASE TRANSITIONS AT AN INTENSIVE PULSE ENERGY INPUT . . . . .	192
<i>N. B. Volkov, E. A. Chingina</i>	
ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ВЗАИМНОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ (СВАРКА ВЗРЫВОМ) . . . . .	193
<i>А. Ю. Волкова, А. В. Иноземцев, Б. А. Гринберг</i>	
ELECTRON-MICROSCOPIC INVESTIGATION OF THE TRANSITION ZONE (EXPLOSION WELDING) OF WELDED JOINTS OF METALS POSSESSING DIFFERENT MUTUAL SOLUBILITY . . . . .	194
<i>A. Yu. Volkova, A. V. Inozemtsev, B. A. Greenberg</i>	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕДИ . . . . .	194
<i>Ю. В. Воробьёв</i>	
MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF HIGH STRAIN RATE DEFORMATION OF COPPER . . . . .	195
<i>Yu. V. Vorobyov</i>	
УЛЬТРА-КОРОТКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ МИКРО-ВЗРЫВ: СОЗДАНИЕ НОВЫХ ФАЗ ВЕЩЕСТВА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ . . . . .	195
<i>Е. Г. Гамалий</i>	
ULTRA-FAST LASER-INDUCED MICRO-EXPLOSION: PRODUCING NEW MATERIAL PHASES UNDER EXTREME CONDITIONS . . . . .	195
<i>E. G. Gataly</i>	
ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЗАРЯДОВОЕ СОСТОЯНИЕ ИОНОВ В СЛОИСТЫХ КОБАЛЬТИТАХ GDBACO <sub>2</sub> O <sub>5.5</sub> И LiCOO <sub>2</sub> . . . . .	196
<i>Б. А. Гижевский, В. Р. Галахов, В. В. Месилов, С. Н. Шамин, С. В. Наумов, А. С. Семенова, Д. Г. Келлерман, С. В. Телегин</i>	
EFFECT OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION ON THE CHARGE STATE OF THE IONS IN THE LAYERED COBALTITES GDBACO <sub>2</sub> O <sub>5.5</sub> AND LiCOO <sub>2</sub> . . . . .	196
<i>B. A. Gizhevskii, V. R. Galakhov, V. V. Mesilov, S. N. Shamin, S. V. Naumov, A. S. Semenova, D. G. Kellerman, S. V. Telegin</i>	
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТИТАНА И ЕГО ГИДРИДА В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ УДАРНОГО СЖАТИЯ . . . . .	197
<i>А. А. Гольшиев, Д. В. Шахрай, А. М. Молодец</i>	

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF TITANIUM AND TITANIUM HYDRIDE AT MEGABAR PRESSURES OF SHOCK COMPRESSION . . . . .	197
<i>A. A. Golyshev, D. V. Shakhray, A. M. Molodets</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ . . . . .	198
<i>Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак</i>	
FORMATION OF INTERFACE STRUCTURE DURING EXPLOSIVE WELDING . . . . .	198
<i>B. A. Greenberg, M. A. Ivanov, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak</i>	
УДАРНОЕ СЖАТИЕ ГИДРИДОВ И ДЕЙТЕРИДОВ ВАНАДИЯ С РАЗНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ АТОМОВ ГАЗОВ. . . . .	199
<i>А. Н. Голубков, Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов, А. А. Каякин, А. Н. Шуйкин</i>	
SHOCK COMPRESSION OF VANADIUM HYDRIDES AND DEUTERIDES WITH VARIOUS CONCENTRATIONS OF GAS ATOMS. . . . .	199
<i>A. N. Golubkov, L. F. Gudarenko, M. V. Zhernokletov, A. A. Kayakin, A. N. Shuikin</i>	
ВЛИЯНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАЗМЕР КРИСТАЛЛИТОВ НЕКОТОРЫХ ТУГОПЛАВКИХ ВЕЩЕСТВ . . . . .	199
<i>А. Н. Жуков, В. В. Якушев, А. И. Рогачёва</i>	
THE INFLUENCE OF SHOCK WAVE LOADING ON CRYSTALLITE SIZE OF SOME REFRACTORY MATERIALS . . . . .	200
<i>A. N. Zhukov, V. V. Yakushev, A. I. Rogacheva</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ С АНОМАЛЬНОЙ СЖИМАЕМОСТЬЮ. . . . .	200
<i>А. Н. Зубарева, В. А. Сосиков, А. В. Уткин</i>	
INVESTIGATION OF SHOCK-WAVE PROPERTIES OF MATTER WITH ANOMALOUS COMPRESSIBILITY. . . . .	201
<i>A. N. Zubareva, V. A. Sosikov, A. V. Utkin</i>	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕНИЯ ПРИ ВЫХОДЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛА . . . . .	201
<i>А. Н. Анисимов, М. В. Ветчинников, Б. Л. Воронин, С. А. Грушин, В. А. Дегтярев, М. А. Демина, А. Г. Кечин, С. В. Копкин, Н. С. Самсонова, М. Г. Игнаткова, В. П. Фомин</i>	
MOLECULAR-DYNAMIC MODELING OF EJECTION, WHEN SHOCK WAVE ARRIVES AT THE FREE SURFACE OF METAL . . . . .	201
<i>A. N. Anisimov, M. V. Vetchinnikov, B. L. Voronin, S. A. Grushin, V. A. Degtyagev, M. A. Demina, A. G. Kechin, S. V. Kopkin, N. S. Samsonova, M. G. Ignatkova, V. P. Fomin</i>	
МОДЕЛЬ КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В СРЕДАХ С ПРОЧНОСТЬЮ . . . . .	202
<i>О. Н. Игнатова, В. А. Раевский, И. С. Целиков</i>	
MODEL OF DAMAGE COMPACTION IN MEDIA WITH STRENGTH. . . . .	202
<i>O. N. Ignatova, V. A. Raevsky, I. S. Tselikov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬФА-ЭПСИЛОН ПОЛИМОРФНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЖЕЛЕЗЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ . . . . .	203
<i>Г. В. Ионов, В. В. Дрёмов, Ф. А. Сапожников, М. А. Воробьёва, Н. А. Смирнов, Н. Е. Чиждкова</i>	
MD MODELING OF THE ALPHA-EPSILON POLYMORPHOUS TRANSITION IN IRON . . . . .	204
<i>G. V. Ionov, V. V. Dremov, F. A. Sapozhnikov, M. A. Vorobyova, N. A. Smirnov, N. E. Chizhkova</i>	
РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ ДЛЯ СМЕСИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО МОДЕЛИ ХАРТРИ–ФОКА–СЛЭТЕРА. . . . .	204
<i>М. А. Кадатский, К. В. Хищенко</i>	
HUGONIOT CALCULATIONS FOR A MIXTURE OF CHEMICAL ELEMENTS BASED ON HARTREE–FOCK–SLATER MODEL . . . . .	204
<i>M. A. Kadatsky, K. V. Khishchenko</i>	
ИСКАЖЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ni <sub>3</sub> (Al, Ti) В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ . . . . .	204
<i>Н. В. Казанцева, В. Ю. Колосов, В. П. Пилюгин</i>	
LATTICE DISTORSION OF THE INTERMETALLIC COMPOUND Ni <sub>3</sub> (Al, Ti) UNDER SEVERE PLASTIC DEFORMATION. . . . .	205
<i>N. V. Kazantseva, V. Yu. Kolosov, V. P. Pilyugin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ АМГ6БМ И АМГ6М В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЛГП . . . . .	205
<i>Е. И. Карнаухов, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, Д. Н. Казаков, А. С. Майорова, О. Е. Козелков, А. А. Тяктев, С. С. Мокрушин</i>	
STUDY OF DYNAMIC FEATURES OF ALLOYS AMG6BM AND AMG6M IN SHOCK-WAVE TESTS WITH LGP GAS GUNS . . . . .	206
<i>E. I. Karnauhov, A. V. Pavlenko, S. N. Malugina, D. N. Kazakov, A. S. Mayorova, O. E. Kozelkov, A. A. Tiaktev, S. S. Mokrushin</i>	

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОГО СХОЖДЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИЗУЧЕНИЯ СОХРАНЕННЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДАМИ ИМРТ И СЭМ . . . . .	206
<i>Е. А. Козлов, С. А. Бричков, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. В. Ольховский, А. А. Дегтярев, Г. Г. Бондарчук, Л. П. Брезгина, О. А. Никитин, Е. О. Ковалев, В. В. Смирнов, А. В. Добромислов, Н. И. Талуц</i>	
SPECIAL FEATURES OF QUASISPHERICAL CONVERGENCE DYNAMICS OF STEEL SHELLS BASED ON LASER INTERFEROMETRY RESULTS AND RECOVERED SHELLS STUDY BY THE ISDT AND SEM METHODS . . . . .	206
<i>Е. А. Козлов, С. А. Бричков, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. В. Ольховский, А. А. Дегтярев, Г. Г. Бондарчук, Л. П. Брезгина, О. А. Никитин, Е. О. Ковалев, В. В. Смирнов, А. В. Добромислов, Н. И. Талуц</i>	
СДВИГОВАЯ ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧЕСКАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ В СПЛАВЕ Al-Cu ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ . . . . .	207
<i>В. С. Красников, А. Е. Майер</i>	
SHEAR STRENGTH AND PLASTIC LOCALIZATION IN ALLOY Al-Cu UNDER SHOCK LOADING . . . . .	207
<i>V. S. Krasnikov, A. E. Mayer</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МИШЕНИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ВКЛЮЧЕНИЕ, ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МОЩНЫМ ПОТОКОМ ЭНЕРГИИ . . . . .	207
<i>В. С. Красников, А. П. Яловец, С. В. Кауцков</i>	
THE FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN THE TARGET CONTAINING INCLUSION UNDER RADIATION BY POWERFUL ENERGY FLOW . . . . .	208
<i>V. S. Krasnikov, A. P. Yalovets, S. V. Kashutov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИ- И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЯХ, СОЗДАВАЕМЫХ ДЕЙСТВИЕМ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА . . . . .	208
<i>С. А. Абросимов, А. П. Бажулин, А. П. Большаков, В. И. Конов, И. К. Красюк, П. П. Пашинин, В. Г. Ральченко, А. Ю. Семенов, Д. Н. Созык, И. А. Стучебрюхов, В. Е. Фортвов, К. В. Хищенко, А. А. Хомич</i>	
EXPERIMENTAL STUDY OF POLY- AND MONOCRYSTALLINE DIAMONDS AT NEGATIVE PRESSURES USING PICOSECOND LASER PULSES. . . . .	208
<i>S. A. Abrosimov, A. P. Bolshakov, A. P. Bazhulin, V. E. Fortov, K. V. Khishchenko, A. A. Khomich, V. I. Konov, I. K. Krasnyuk, P. P. Pashinin, V. G. Ralchenko, A. Yu. Semenov, D. N. Sovyk, I. A. Stuchebryukhov</i>	
МОДЕЛИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ И ВИХРЕВЫХ ДВИЖЕНИЙ СЖИМАЕМЫХ СПЛОШНЫХ СРЕД . . . . .	209
<i>В. Ф. Куропатенко</i>	
POTENTIAL AND EDDY COMPRESSIBLE CONTINUA MODELS . . . . .	209
<i>V. F. Kuropatenko</i>	
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО СДВИГОВОЙ И ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ В ОБЛАСТИ ПРОТЕКАНИЯ ОБРАТИМОГО $\alpha'$ - $\epsilon$ -ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ, А ТАКЖЕ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОХРАНЕННЫХ ОБРАЗЦОВ . . . . .	209
<i>Е. А. Козлов, В. И. Таржанов, Д. Г. Панкратов, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, Д. С. Боярников, А. Г. Попцов, В. Н. Ногин, А. В. Петровцев, Д. М. Шалковский, А. В. Добромислов, Н. И. Талуц</i>	
NEW DATA ON SHEAR AND SPALL STRENGTHS OF QUENCHED 30KHGSA STEEL UNDER EXPLOSIVE LOADING IN THE REGION OF REVERSIBLE $\alpha'$ - $\epsilon$ -PHASE TRANSFORMATION BASED ON RESULTS OF MULTI-CHANNEL LASER INTERFEROMETRY, METALLOGRAPHIC ANALYSIS, AND ELECTRON MICROSCOPY OF RECOVERED SAMPLES . . . . .	210
<i>Е. А. Козлов, В. И. Таржанов, Д. Г. Панкратов, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, Д. С. Боярников, А. Г. Попцов, В. Н. Ногин, А. В. Петровцев, Д. М. Шалковский, А. В. Добромислов, Н. И. Талуц</i>	
МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СМЕСЕЙ И СПЛАВОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ КВАРЦ В СВОЙ СОСТАВ, ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ . . . . .	210
<i>К. К. Маевский, С. А. Кинеловский</i>	
MODEL BEHAVIOR OF POROUS MIXTURES AND ALLOYS CONTAINING QUARTZ IN ITS COMPOSITION WITH THE SHOCK WAVE LOADING. . . . .	211
<i>К. К. Маевский, С. А. Кинеловский</i>	
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВО ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ. . . . .	211
<i>А. Е. Майер, И. Н. Бородин, В. С. Красников</i>	
LOCALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION AT THE SHOCK WAVE FRONT . . . . .	212
<i>А. Е. Майер, И. Н. Бородин, В. С. Красников</i>	
ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА . . . . .	212
<i>П. Н. Майер, А. Е. Майер</i>	



TWO-DIMENSIONAL MODEL OF THE DYNAMIC FRACTURE OF LIQUID METAL UNDER THE ACTION OF INTENSIVE ELECTRON IRRADIATION AND THE METAL MELTS STRENGTH . . . . .	213
<i>P. N. Mayer, A. E. Mayer</i>	
ГЕТЕРОГЕННОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ СХОЖДЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН . . . . .	213
<i>А. Н. Мальшев, Д. Н. Замотаев, О. Н. Игнатова, О. А. Тюпанова, М. И. Ткаченко, Э. Г. Шепелев, А. М. Подурец, А. Н. Баландина, И. Н. Кондрохина</i>	
HETEROGENEOUS DEFORMATION OF METALS AT CONVERGENCE OF CYLINDRICAL APERTURES HAVING SMALL DIAMETERS UNDER EFFECT OF SHOCK WAVES . . . . .	214
<i>A. N. Malyshev, D. N. Zamotaev, O. N. Ignatova, M. I. Tkachenko, E. G. Shepelev, A. M. Podurets, A. N. Balandina, I. N. Kondrokhina</i>	
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УДАР УДАРНИКОМ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ . . . . .	214
<i>Л. А. Мерзиевский, А. А. Васильев, А. В. Виноградов, В. И. Лаптев</i>	
HYPERVELOCITY IMPACT OF RING IMPACTORS. . . . .	214
<i>L. A. Merzhiyevsky, A. A. Vasilyev, A. V. Vinogradov, V. I. Laptev</i>	
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАТИНЫ . . . . .	215
<i>В. М. Елькин, В. Н. Михайлов, Т. Ю. Михайлова</i>	
AN EQUATION OF STATE FOR PLATINUM . . . . .	215
<i>V. M. Elkin, V. N. Mikhaylov, T. Yu. Mikhaylova</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОТОННОГО МИКРОСКОПА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. . . . .	215
<i>К. Л. Михайлюков, И. В. Храмов, С. В. Потапов, Н. В. Фролова</i>	
STUDY OF THE PROTON MICROSCOPE POTENTIAL WHEN REGISTERING DYNAMIC PROCESSES . . . . .	215
<i>K. L. Mikhailukov, I. V. Khramov, S. V. Potapov, N. V. Frolova</i>	
«IN-SITU» ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И МНОГОМАСШТАБНАЯ КИНЕТИКА РАЗВИТИЯ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ НАГРУЗКАХ. . . . .	216
<i>О. Б. Наймарк</i>	
DYNAMIC EXPERIMENT “IN SITU” AND MULTI-SCALE KINETICS OF DAMAGE EVOLUTION AT INTENSE LOADS . . . . .	216
<i>О. В. Naimark</i>	
КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ . . . . .	217
<i>М. Ю. Орлов, Ю. Н. Орлов, А. Н. Садохин</i>	
INTEGRATED THEORETICAL-AND-EXPERIMENTAL STUDY OF NATURAL MATERIALS BEHAVIOR UNDER EXPLOSIVE LOADING. . . . .	217
<i>М. Yu. Orlov, Yu. N. Orlov, A. N. Sadokhin</i>	
МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ AL-MG СПЛАВОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ . . . . .	218
<i>А. Н. Петрова, И. Г. Бродова, В. В. Астафьев, Е. В. Шорохов, А. А. Гранский, А. П. Насонов, К. В. Гаан</i>	
STRUCTURAL MODIFICATION IN AL-MG ALLOY BY DYNAMIC CANNEL-ANGULAR PRESSING . . . . .	218
<i>A. N. Petrova, I. G. Brodova, V. V. Astafiev, E. V. Shorokhov, A. A. Granskiy, A. P. Nasonov, K. V. Gaan</i>	
IN SITU ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГО-СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И МИКРОСТРУКТУРА ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НА ИХ ОСНОВЕ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ. . . . .	219
<i>В. П. Пилюгин, Б. А. Гринберг, Т. П. Толмачёв, Т. М. Гапонцева, Ю. В. Соловьёва, А. И. Анчаров</i>	
IN SITU MEASUREMENTS OF ENRGY-POWER PARAMETERS AND MICROSTRUCTURE OF TRANSITION METALS AND ALLOYS AT SEVERE DEFORMATIONS UNDER PRESSURE . . . . .	219
<i>V. P. Pilyugin, B. A. Grinberg, T. P. Tolmachev, T. M. Gapontseva, J. V. Solovieva, A. I. Ancharov</i>	
ЗОНЫ РИСКА ДЛЯ СТЕНКИ КОКСОВОЙ КАМЕРЫ, ПОЛУЧЕННОЙ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ . . . . .	220
<i>А. В. Плотников, А. М. Пацелов, Б. А. Гринберг</i>	
RISK ZONE IN THE COKING CHAMBER WALL MANUFACTURED BY EXPLOSIVE WELDING. . . . .	220
<i>A. V. Plotnikov, A. M. Patselov, B. A. Greenberg</i>	
О ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ В МЕТАЛЛАХ ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ СЖАТИЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ. . . . .	221
<i>А. М. Подурец, М. И. Ткаченко</i>	
DISLOCATION DENSITY IN METALS DURING AND AFTER SHOCK LOADING. . . . .	221
<i>А. М. Podurets, M. I. Tkachenko, O. N. Ignatova, A. I. Lebedev, V. V. Igonin, V. A. Raevsky</i>	
МОЛЕКУЛЯРНО ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ, КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В Sn И Вe ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 300 ГПА: ЛИНИИ РАВНОВЕСИЯ, МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ, ГРАНИЦЫ ДОСТИЖИМЫХ ПЕРЕСЫЩЕНИЙ, КИНЕТИКА НУКЛЕАЦИИ . . . . .	222
<i>С. П. Проценко, А. О. Тупеев, В. Г. Байдаков, Г. В. Ионов, В. В. Дрёмов, А. В. Караваев</i>	

MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF MELTING, CRYSTALLIZATION AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN Sn AND Be AT PRESSURES UP TO 300 GPa: EQUILIBRIUM LINES, METASTABLE STATES, LIMITS OF ATTAINABLE SUPERSATURATION, KINETICS OF NUCLEATION . . . . .	222
<i>S. P. Protsenko, A. O. Tipeev, V. G. Baidakov, G. V. Ionov, V. V. Dremov, A. V. Karavaev</i>	
ВВЕДЕНИЕ ФРАКТАЛОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ . . . . .	223
<i>М. С. Пушкин, А. В. Иноземцев, Б. А. Гринберг</i>	
INTRODUCTION OF FRACTALS TO DESCRIBE THE INTERFACE AFTER EXPLOSIVE WELDING . . . . .	223
<i>M. S. Pushkin, A. V. Inozemtsev, B. A. Greenberg</i>	
ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ УСТАНОВЛЕННЫХ ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ . . . . .	224
<i>А. Я. Учаев, В. Т. Пунин, Н. И. Сельченкова, Е. В. Кошелева</i>	
SUBSTANTIATION OF CAPABILITY FOR METALS' BEHAVIOR PREDICTABILITY UNDER EXTREME CONDITIONS ON THE BASIS OF SPECIFIED GENERAL REGULARITIES OF DYNAMIC FAILURE PROCESSES . . . . .	224
<i>A. Ya. Uchaev, V. T. Punin, N. I. Selchenkova, E. V. Kosheleva</i>	
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОДИФФУЗИИ В $\gamma$ -U И $\gamma$ -U-Mo . . . . .	225
<i>Д. Е. Смирнова, А. Ю. Куксин, С. В. Стариков, В. В. Стегайлов</i>	
ATOMISTIC SIMULATION OF SELF-DIFFUSION IN $\gamma$ -U AND $\gamma$ -U-Mo . . . . .	226
<i>D. E. Smirnova, A. Yu. Kuksin, S. V. Starikov, V. V. Stegailov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ . . . . .	226
<i>М. А. Соколов, В. В. Чудинов, Д. А. Билалов, В. А. Оборин, А. Н. Петрова, С. В. Уваров, О. А. Плехов, О. Б. Наймарк, И. Г. Бродова</i>	
INVESTIGATION OF PLASTIC DEFORMATION LOCALIZATION UNDER DYNAMIC LOADING . . . . .	227
<i>M. A. Sokovikov, V. V. Chudinov, D. A. Bilalov, V. A. Oborin, A. N. Petrova, S. V. Uvarov, O. A. Plekhov, O. B. Naimark, I. G. Brodova</i>	
ДИФФУЗИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В НИТРИДЕ УРАНА: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТЫ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ . . . . .	227
<i>А. Ю. Куксин, Д. Е. Смирнова, С. В. Стариков</i>	
DIFFUSION OF POINT DEFECTS IN URANIUM MONONITRIDE: ATOMISTIC SIMULATION AND AB-INITIO CALCULATION . . . . .	228
<i>A. Yu. Kuksin, D. E. Smirnova, S. V. Starikov</i>	
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ И ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ. . . . .	228
<i>Н. И. Талуц, А. В. Добромыслов, Е. А. Козлов</i>	
LOCALIZATION OF DEFORMATION AND VORTEX STRUCTURE IN SINGLE-CRYSTAL AND POLYCRYSTALLINE METALS AND ALLOYS UNDER LOADING BY SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES . . . . .	228
<i>N. I. Taluts, A. V. Dobromyslov, E. A. Kozlov</i>	
О СОВМЕЩЕНИИ МЕТОДИК ОПТИЧЕСКОГО РЫЧАГА И ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННОЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ . . . . .	229
<i>Е. А. Козлов, В. И. Таржанов, И. В. Теличко, Д. Г. Панкратов, Д. П. Кучко, М. А. Ральников</i>	
ON COMBINING THE OPTICAL LEVER AND LASER HETERODYNE TECHNIQUES TO STUDY DYNAMIC PROPERTIES OF STRUCTURAL MATERIALS . . . . .	229
<i>E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, I. V. Telichko, D. G. Pankratov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov</i>	
КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ ПЛАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛА: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ. . . . .	229
<i>А. О. Tipeev, В. Г. Байдаков</i>	
KINETICS AND MECHANISM OF CRYSTAL MELTING: MOLECULAR DYNAMICS ANALYSIS . . . . .	230
<i>A. O. Tipeev, V. G. Baidakov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ, ВЫЗЫВАЕМОМ ИМПУЛЬСАМИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И РАЗГОНЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВОМ ЛАЙНЕРОВ . . . . .	230
<i>Е. В. Кошелева, В. В. Мохова, А. М. Подурец, В. Т. Пунин, Н. И. Сельченкова, А. В. Тилькунов, И. Р. Трунин, А. Я. Учаев</i>	
STUDY OF PROCESSES OF METALS' DISPERSION UNDER SHOCK-WAVE LOADING, CAUSED BY PULSES OF RELATIVISTIC ELECTRONS AND LINERS ACCELERATED BY ELECTRIC EXPLOSION. . . . .	231
<i>E. V. Kosheleva, V. V. Mokhova, A. M. Podurets, V. T. Punin, N. I. Selchenkova, A. V. Til'kunov, I. R. Trunin, A. Ya. Uchaev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ СВИНЦА ПРИ УДАРНОВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РАЗГРУЗКЕ. . . . .	232
<i>А. В. Фёдоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин, Д. В. Назаров, Е. А. Чудаков, Д. А. Калашиников, Е. И. Бутусов</i>	

STUDY OF LEAD BEHAVIOR FEATURES AT SHOCK LOADING AND FURTHER UNLOADING . . . . .	232
<i>A. V. Fedorov, A. L. Mikhailov, S. A. Finyushin, D. V. Nazarov, E. A. Chudakov, D. A. Kalashnikov, E. I. Butusov</i>	
МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВ В ОБЛАСТИ УДАРНЫХ СЖАТИЙ И ТЕПЛОВЫХ РАСШИРЕНИЙ . . . . .	232
<i>В. Ф. Куропатенко, С. Ю. Филатов</i>	
SMALL-PARAMETRIC EQUATIONS OF STATE IN THE REGION OF SHOCK COMPRESSIONS AND THERMAL EXPANSIONS . . . . .	232
<i>V. F. Kuropatenko, S. Yu. Filatov</i>	
ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ХРОМОЦИРКОНИЕВОЙ БРОНЗЫ, ПОДВЕРГНУТОЙ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМУ ПРЕССОВАНИЮ И СТАРЕНИЮ . . . . .	233
<i>Н. Ю. Фролова, В. И. Зельдович, И. В. Хомская, А. Э. Хейфец, Е. В. Шорохов, П. А. Насонов, А. А. Гранский</i>	
THERMAL STABILITY OF CHROMIUM-ZIRCONIUM BRONZE SUBJECTED TO CHANNEL-ANGULAR PRESSING AND AGING . . . . .	233
<i>N. Yu. Frolova, V. I. Zel'dovich, I. V. Khomskaya, A. E. Kheifetz, E. V. Shorokhov, P. A. Nasonov, A. A. Granskii</i>	
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ . . . . .	234
<i>К. В. Хищенко</i>	
EQUATIONS OF STATE FOR METALS AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES . . . . .	234
<i>К. В. Khishchenko</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ МЕДИ И БРОНЗЫ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТОДОМ ДКУП . . . . .	234
<i>И. В. Хомская, В. И. Зельдович, Е. В. Шорохов, Н. Ю. Фролова, А. В. Макаров, А. Э. Хейфец, П. А. Насонов, К. В. Гаан, Г. В. Майкова</i>	
STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED COPPER AND BRONZE, OBTAINED BY HIGH-RATE DEFORMATION BY MEANS OF DCAP METHOD . . . . .	234
<i>I. V. Khomskaya, V. I. Zeldovich, E. V. Shorokhov, N. Yu. Frolova, A. V. Makarov, A. E. Kheifets, P. A. Nasonov, K. V. Gaan, G. V. Maikova</i>	
УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ 30ХГСА ПРИ НАГРУЖЕНИИ В ОБЛАСТЬ ТВЕРДОФАЗНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ . . . . .	235
<i>Д. М. Шалковский, А. В. Петровцев, Д. А. Варфоломеев, М. Н. Якимова, В. В. Дремов, Е. Е. Миронова, Е. А. Козлов, В. И. Таржанов, С. А. Бричиков, А. В. Ольховский, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. Е. Широбоков, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, А. С. Майорова</i>	
AN ELABORATED MODEL OF 30HGSA STEEL UNDER SHOCK LOADING IN THE REGION OF THE SOLID-PHASE TRANSFORMATION . . . . .	235
<i>D. M. Shalkovsky, A. V. Petrovtsev, D. A. Varfolomeyev, M. N. Yakimova, V. V. Dremov, E. E. Mironova, E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, S. A. Brichikov, A. V. Olkhovsky, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, A. E. Shirobokov, A. V. Pavlenko, S. N. Malyugina, A. S. Mayorova</i>	
УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕЙТЕРИДОВ Ti И Zr В УСЛОВИЯХ НАГРЕВА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ ДО 1200 °С . . . . .	236
<i>В. Г. Шевченко, В. Ю. Давыдов</i>	
SHAPE DEUTERIDOV Ti AND Zr IN AIR AT THE TEMPERATURE OF <1200 °С . . . . .	236
<i>V. G. Shevchenko, V. Yu. Davidov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО ОБЖАТИЯ МЕДНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ АМПУЛ . . . . .	237
<i>В. А. Аринин, В. В. Бурцев, А. Л. Михайлов, В. Д. Орлов, А. М. Подурец, А. В. Руднев, М. А. Сырунин, И. А. Терешкина, Б. И. Ткаченко, М. И. Ткаченко, И. Р. Трунин, А. П. Цой, И. В. Шиберин</i>	
EXPERIMENTAL STUDY AND CALCULATION MODELING OF THE EXPLOSIVE COMPRESSION OF SPHERICAL COPPER AMPULES . . . . .	237
<i>V. A. Arinin, V. V. Burtsev, A. L. Mikhailov, V. D. Orlov, A. M. Poduretc, A. V. Rudnev, M. A. Syrunin, I. A. Tereshkina, B. I. Tkachenko, I. R. Trunin, A. P. Tcoi, I. V. Shiberin</i>	
ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ МАНГАНИНОВЫМИ ДАТЧИКАМИ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИХСЯ И РАСХОДЯЩИХСЯ УДАРНО-ИЗЭНТРОПИЧЕСКИХ ВОЛНАХ . . . . .	237
<i>А. О. Борщевский, Е. А. Козлов, А. И. Клёнов, А. В. Петровцев, В. Н. Ногин, К. С. Сидоров, Д. М. Шалковский, Д. Т. Юсупов</i>	
SPECIAL FEATURES OF REGISTRATION BY MANGANIN GAGES OF STRESS WAVES IN SPHERICALLY CONVERGING AND DIVERGING SHOCK-INSENTROPIC WAVES . . . . .	237
<i>А. О. Borschevsky, E. A. Kozlov, A. I. Klenov, A. V. Petrovtsev, V. N. Nogin, K. S. Sidorov, D. M. Shalkovsky, D. T. Yusupov</i>	
О СОВМЕЩЕНИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННОЙ МЕТОДИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТЫХ МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ В ИНТЕРЕСАХ ВЕРИФИКАЦИИ И КАЛИБРОВКИ СОВРЕМЕННЫХ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ . . . . .	238
<i>Е. А. Козлов, Д. Г. Панкратов, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. Г. Попцов, А. К. Якунин</i>	

ON COMBINING THE OPTICAL ANALYZER AND LASER HETERODYNE TECHNIQUES FOR MEASURING SOUND VELOCITIES IN SHOCK-COMPRESSED METALS AND ALLOYS FOR VERIFICATION AND CALIBRATION OF MODERN ELASTIC-VISCOUS-PLASTIC MODELS . . . . .	238
<i>E. A. Kozlov, D. G. Pankratov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, A. G. Poptsov, A. K. Yakunin</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ $P$ , $T$ -УСЛОВИЙ, РЕАЛИЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ УДАРНОМ СЖАТИИ НИТРИДА КРЕМНИЯ В ПЛОСКИХ АМПУЛАХ СОХРАНЕНИЯ . . . . .	239
<i>В. В. Якушев, А. В. Уткин, А. Н. Жуков, Д. В. Шахрай, В. В. Ким</i>	
THE DETERMINATION OF $P$ , $T$ -CONDITIONS GENERATED AT HIGH TEMPERATURE SHOCK COMPRESSION OF SILICON NITRIDE IN PLANAR RECOVERY AMPOULES . . . . .	239
<i>V. V. Yakushev, A. V. Utkin, A. N. Zhukov, D. V. Shakhrai, V. V. Kim</i>	
ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛА МЕДИ НА ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЮ ЯЧЕЙСТОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ . . . . .	240
<i>А. В. Добромислов, Н. И. Талуц, Е. А. Козлов</i>	
INFLUENCE OF THE ORIENTATION OF A COPPER SINGLE CRYSTAL ON THE FORMATION AND THE EVOLUTION OF A DISLOCATION CELL STRUCTURE UNDER LOADING BY SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES . . . . .	240
<i>A. V. Dobromyslov, N. I. Taluts, E. A. Kozlov</i>	
<b>Секция 5</b>	
<b>НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ</b>	
<b>Section 5</b>	
<b>SCIENTIFIC BASES OF NUCLEAR POWER ENGINEERING AND NUCLEAR MEDICINE</b>	
КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ . . . . .	243
<i>В. А. Симоненко</i>	
KEY PROBLEMS OF NUCLEAR POWER . . . . .	243
<i>V. A. Simonenko</i>	
КОНЦЕПЦИЯ БЫСТРОГО РЕАКТОРА С ЖИДКИМ U-Pu ТОПЛИВОМ . . . . .	244
<i>Л. И. Пономарёв</i>	
CONCEPTION OF THE FAST REACTOR WITH THE LIQUID U-Pu FUEL . . . . .	244
<i>L. I. Ponomarev</i>	
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА АТЭК . . . . .	244
<i>И. Р. Макеева, И. А. Доровских, И. А. Волков, Н. Д. Дырда, Е. А. Белоногова</i>	
THE ANALYSIS OF POSSIBLE VARIANTS OF DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER ENGINEERING USING ATEK CODE . . . . .	245
<i>I. R. Makeyeva, I. A. Dorovskikh, I. A. Volkov, N. D. Dyrda, E. A. Belonogova</i>	
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ КАМПАНИИ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 . . . . .	245
<i>Д. Г. Модестов, А. С. Бикеев, Л. М. Зуева, М. А. Калугин, Е. А. Кашаева, Г. Н. Малышкин, М. В. Никольшин, И. Ю. Силантьева, Д. А. Шкаровский</i>	
COMPARATIVE VVER-1200 REACTOR CALCULATIONS . . . . .	246
<i>D. G. Modestov, A. S. Bikeyev, L. M. Zueva, M. A. Kalugin, E. A. Kashaeva, G. N. Malyshkin, M. V. Nikulshin, I. Yu. Silantieva, D. A. Shkarovsky</i>	
О ВЫБОРЕ ДЕМОНСТРАЦИОННОГО РАСПЛАВНО-СОЛЕВОГО РЕАКТОРА . . . . .	246
<i>М. Н. Белоногов, И. А. Волков, Н. Д. Дырда, М. А. Трапезников</i>	
CHOICE OF THE DEMONSTRATION MOLTEN-SALT REACTOR . . . . .	247
<i>M. N. Belonogov, I. A. Volkov, N. D. Dyrda, M. A. Trapeznikov</i>	
ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ . . . . .	248
<i>Н. Д. Дырда, И. Р. Макеева, В. А. Симоненко</i>	
THE QUESTIONS OF ORGANIZING MODES OF FAST REACTORS . . . . .	248
<i>N. D. Dyrda, I. R. Makeyeva, V. A. Simonenko</i>	
ПРОГРАММА «ТАНДЕМ» ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СВЯЗАННЫХ РАСЧЕТОВ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК. . . . .	248
<i>И. Ю. Силантьева, Л. М. Зуева, Е. А. Кашаева, Г. Н. Малышкин, Д. Г. Модестов, Д. В. Могиленских, С. Ю. Мокшин, М. В. Никольшин, В. Г. Орлов, Е. Ю. Язова</i>	
TANDEM PROGRAM FOR PARALLEL COMPUTING OF COUPLED NEUTRON-PHYSICAL AND THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF REACTOR CORES. . . . .	249
<i>I. Yu. Silantieva, L. M. Zueva, E. A. Kashaeva, G. N. Malyshkin, D. G. Modestov, D. V. Mogilenskikh, S. Yu. Mokshin, M. V. Nikulshin, V. G. Orlov, E. Yu. Yazova</i>	

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПРОГРАММНОГО КОДА СОКРАТ-БН . . . . .	250
<i>Ю. Ю. Виноградова, Н. И. Рыжов</i>	
DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF HEAT-HYDRAULICS UNIT FOR SOCRAT-BN . . . . .	250
<i>Yu. Yu. Vinogradova, N. I. Ryzhov</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА «МЕЧЕННЫХ ЧАСТИЦ» ДЛЯ УЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ ФУНКЦИОНАЛОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ПО ПРОГРАММЕ ПРИЗМА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ . . . . .	250
<i>А. С. Доросев, С. И. Самарин, Е. В. Серова</i>	
PRIZMA CODE: TAGGED PARTICLES FOR RESOLVING INITIAL DATA UNCERTAINTIES IN RADIATION TRANSPORT BY THE MONTE CARLO METHOD . . . . .	251
<i>A. S. Dorosev, S. I. Samarina, E. V. Serova</i>	
СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПИК. ПРОЕКТ ФИЗПУСКА . . . . .	252
<i>И. Г. Вавилова, А. Р. Голиков, М. Р. Колхидашвили, В. В. Марченко, Л. М. Площанский, Т. В. Савельева, С. Л. Смольский, В. А. Соловей, Е. Ю. Фокин</i>	
HARDWARE AND SOFTWARE OF CONTROL SYSTEM OF RADIATION SAFETY FOR COMPLEX PIK. VARIANT IS PHYSICAL STARTUP. . . . .	252
<i>I. G. Vavilova, A. D. Golikov, M. R. Kolhidashvili, V. V. Marchenkov, L. M. Ploshyansky, T. V. Savel'eva, S. L. Smol'sky, V. A. Solovei, E. Yu. Fokin</i>	
ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС . . . . .	252
<i>И. В. Лавренюк, О. В. Валеева, Н. Б. Аникин, С. М. Улянов</i>	
PROBLEMS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS FOR NPS HYDROGEN SAFETY ENSURING. . . . .	253
<i>I. V. Lavrenyuk, O. V. Valeeva, N. B. Anikin, S. M. Ulyanov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫХ ПЛАМЕН В ИНТЕРЕСАХ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В МАСШТАБЕ 1:200 . . . . .	253
<i>Н. Б. Аникин, А. В. Павленко, С. И. Балабин, О. Е. Шестаченко, А. Н. Григорьев, И. Л. Бугаенко, Ю. А. Пискунов</i>	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDROGEN-AIR FLAMES FOR HYDROGEN SAFETY CONCERN IN 1:200 SCALE . . . . .	253
<i>N. B. Anikin, A. V. Pavlenko, S. I. Balabin, O. E. Shestachenko, A. N. Grigoriev, I. L. Bugaenko, Yu. A. Piskunov</i>	
РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ВОДОРОД-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ ПОД КУПОЛОМ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПРИ ТЯЖЕЛОЙ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ . . . . .	254
<i>И. В. Глазырин, С. И. Балабин, И. Л. Бугаенко, А. В. Карпеев, О. Г. Котова, Н. А. Михайлов, А. А. Надольский, А. В. Павленко, В. А. Симоненко, О. В. Шульц</i>	
NUMERICAL STUDY OF HYDROGEN-OXYGEN MIXTURE COMBUSTION IN NUCLEAR REACTOR DOME DURING SEVERE ACCIDENT . . . . .	254
<i>I. V. Glazyrin, S. I. Balabin, I. L. Bugaenko, A. V. Karpeev, O. G. Kotova, N. A. Mikhaylov, A. A. Nadolskii, A. V. Pavlenko, V. A. Simonenko, O. V. Shults</i>	
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА НИТРИДНОГО ОЯТ. . . . .	254
<i>А. М. Потанов</i>	
THERMODYNAMIC SIMULATION OF THE NITRIDE SNF . . . . .	254
<i>А. М. Potanov</i>	
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПОРОШКОВ МОНОНИТРИДА УРАНА И ПЛУТОНИЯ . . . . .	255
<i>И. В. Пешкичев, О. В. Шульц, А. А. Скибо, Е. А. Белоногова, А. Е. Паукова, В. А. Симоненко, В. П. Соколов, И. Р. Макеева</i>	
DEVELOPING OF COMPUTER MODELS FOR CARBOTHERMIC REDUCTION OF URANIUM AND PLUTONIUM OXIDES . . . . .	255
<i>I. V. Peshkichev, O. V. Shults, A. A. Skibo, E. A. Belonogova, A. E. Paukova, V. A. Simonenko, V. P. Sokolov, I. R. Makeeva</i>	
АДРОННАЯ ТЕРАПИЯ. . . . .	256
<i>С. И. Самарин, В. И. Костюченко</i>	
HADRON THERAPY . . . . .	256
<i>S. I. Samarina, V. I. Kostyuchenko</i>	
ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ МК ИТНМС . . . . .	256
<i>В. И. Костюченко, А. С. Макарова, С. И. Самарин, А. С. Углов</i>	
VERIFICATION OF A MONTE CARLO-BASED PROGRAM ITHMC. . . . .	257
<i>V. I. Kostjuchenko, A. S. Makarova, S. I. Samarina, A. S. Uglov</i>	

КОМПЛЕКСНОЕ ЛЕЧЕНИЕ РЕЦИДИВОВ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ГЛИОМ <i>О. Н. Давыдова, А. В. Важенин, Т. М. Шарабура, М. М. Пименова, А. В. Ситницын</i>	257
COMBINATION THERAPY OF RECURRENT MALIGNANT GLIOMAS <i>O. N. Davydova, A. V. Vazhenin, N. M. Sharabura, M. M. Pimenova, A. V. Sinityn</i>	258
КОНФОРМНАЯ ЛУЧЕВАЯ ТЕРАПИЯ, КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЩЕЙ ВЫЖИВАЕМОСТИ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ЛЕЧЕНИИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ГЛИОМ ГОЛОВНОГО МОЗГА <i>М. М. Пименова, А. В. Важенин, Т. М. Шарабура, О. Н. Давыдова, А. В. Ситницын</i>	258
CONFORMAL RADIOTHERAPY AS A FACTOR INFLUENCING OVERALL SURVIVAL IN COMBINATION THERAPY FOR CEREBRAL MALIGNANT GLIOMA <i>М. М. Pimenova, A. V. Vazhenin, N. M. Sharabura, O. N. Davydova, A. V. Sinityn</i>	258
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ РАКА ОРОФАРИНГЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ <i>А. А. Ложков, А. В. Важенин, Т. М. Шарабура</i>	259
MODERN RADIOTHERAPY TECHNOLOGY OF OROPHARYNGEAL CANCER <i>A. A. Lozhkov, A. V. Vazhenin, T. M. Sharabura</i>	259
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУЙНЫХ ВЫБРОСОВ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ХАРАКТЕРА ТЕЧЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ПАРОВАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ИЗОЛИРОВАННЫХ КАМЕРАХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ПОМЕЩЕНИЯ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ <i>С. Д. Пасюков, М. В. Никифоров</i>	260
VISUALIZATION OF JET EMISSIONS AND SPATIAL BEHAVIOR OF THE HYDROGENEOUS VAPOR-GAS MIXTURE FLOW IN ISOLATED CHAMBERS MODELING NUCLEAR POWER PLANT CONTAINMENT <i>S. D. Pasyukov, M. V. Nikiforov</i>	260
ХИТИН-ХИТОЗАН КАК СОРБИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ УТЕЧКИ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ АВАРИЙНОМ ЗАТОПЛЕНИИ <i>Т. В. Казаковская, В. М. Щербakov, Э. Ю. Горячев, А. М. Горелов</i>	260
CHITIN-CHITOSAN- A SORBENT PREVENTING RELEASE OF RADIOACTIVE COMPOUNDS UNDER EMERGENCY SUBMERSION <i>T. V. Kazakovskaya, V. M. Shcherbakov, E. Yu. Goryachev, A. M. Gorelov</i>	261
ПРЯМОЙ УЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА С 160 МЭВ-НЫМ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ В МНОГОСЛОЙНОМ ЦИЛИНДРЕ ФАРАДЕЯ <i>А. С. Доросев, С. И. Самарин, В. И. Костюченко</i>	262
DIRECT ACCOUNTING FOR UNCERTAINTIES IN INITIAL DATA FROM AN EXPERIMENT WITH 160-MEV PROTONS IN A FARADAY MULTILAYER CUP <i>A. S. Dorosev, S. I. Samarin, V. I. Kostyuchenko</i>	262
РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕРХДЛИТЕЛЬНОГО СРОКА ДЕЙСТВИЯ <i>Б. Е. Бураков, М. В. Заморянская</i>	263
DEVELOPMENT OF NEW GENERATION OF SAFE RADIO-LUMINESCENCE EMITTERS FOR VERY LONG TERM USE <i>В. Е. Burakov, M. V. Zamoranskaya</i>	263
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОДИНОЧНОЙ ЦЕНТРИФУГИ И РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК «ЦЕНТРОБЕЖНОГО» ЗАВОДА <i>В. Д. Борисевич, М. А. Борщевский, И. Н. Андронов, С. А. Сенченков</i>	264
ASSESSMENT OF PARAMETERS OF GAS CENTRIFUGE AND SEPARATION CASCADE BASING ON INTEGRAL CHARACTERISTICS OF SEPARATION PLANT <i>V. Borisevich, M. Borshchevskiy, I. Andronov, S. Senchenkov</i>	264
МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИЗА НИТРИДНОГО ОЯТ <i>О. В. Шульц</i>	264
MODEL FOR ELECTROREFINING OF NITRIDE SNF <i>O. V. Shults</i>	265
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ КОМПОНОВОК АКТИВНЫХ ЗОН БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА РЕАКТОРА <i>И. А. Волков</i>	265
THE ANALYSIS OF POSSIBLE CORE ASSEMBLINGS OF FAST REACTORS WITH LEAD HEAT CARRIER IN THE VIEW OF NUCLEAR FUEL CYCLE OPTIMIZATION <i>I. A. Volkov</i>	266

МЕТОДИКА ОДНОВАРИАНТНЫХ И МНОГОВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ СЛАБОСВЯЗАННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО. . . . .	267
<i>Я. З. Кандиев, В. Г. Орлов, Е. В. Серова</i>	
A MONTE CARLO TECHNIQUE FOR SINGLE- AND MULTI-VARIANT SIMULATION OF WEAKLY COUPLED SYSTEMS. . . . .	267
<i>Y. Z. Kandiev, V. G. Orlov, E. V. Serova</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ. . . . .	267
<i>В. И. Графутин, В. А. Илюхин, О. В. Илюхина, Е. П. Прокопьев</i>	
ELECTRONIC PROPERTIES OF TRANSITION METALS AND ALLOYS BASED METHOD POSITRON ANNIHILATION SPECTROSCOPY . . . . .	268
<i>V. I. Grafutin, E. P. Prokopen, S. P. Timoshenkov</i>	
<b>Секция 6</b>	
<b>ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ</b>	
<b>Section 6</b>	
<b>NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODES AND ACCURATE SOLUTIONS</b>	
ЭКОНОМИЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ. . . . .	273
<i>Максим Г. Анучин, Михаил Г. Анучин, А. Н. Кузнецов</i>	
AN ECONOMIC METHOD FOR SIMULATING STEADY-STATE CONDITIONS IN GAS TRANSPORT SYSTEMS . . . . .	273
<i>Maxim G. Anuchin, Mikhail G. Anuchin, A. N. Kuznetsov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СВОЙСТВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ. . . . .	274
<i>В. А. Вирченко, А. П. Егоров, А. И. Ахметзянов</i>	
EXPERIMENTAL AND THEORETICAL APPROACH TO ESTIMATION OF EXPLOSIVES PROPERTIES . . . . .	274
<i>V. A. Virchenko, A. I. Akhmetzyanov, A. P. Egorov</i>	
ОДНО ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА. . . . .	275
<i>С. П. Баутин, В. Е. Замыслов, О. Д. Зорина, П. А. Козлов, П. П. Скачков</i>	
AN ONE APPROXIMATE DESCRIPTION OF FLOWS OF COMPRESSIBLE VISCOUS HEAT-CONDUCTIVE GAS . . . . .	275
<i>S. P. Bautin, V. E. Zamyslov, O. D. Zorina, P. A. Kozlov, P. P. Skachkov</i>	
ДОСТАТОЧНЫЕ УСЛОВИЯ СОХРАНЕНИЯ ТИПА УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ . . . . .	276
<i>В. В. Башуров</i>	
SUFFICIENT CONDITIONS FOR THE PRESERVATION OF THE TYPE OF PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS. . . . .	276
<i>V. V. Bashurov</i>	
ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО И УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ. . . . .	277
<i>Ю. В. Баяндин, О. В. Наймарк, Н. В. Савельева</i>	
TREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC AND SHOCK WAVE LOADING OF METALS. . . . .	277
<i>Yu. V. Bayandin, O. V. Naimark, N. V. Savelieva</i>	
ТРЕХМЕРНАЯ МЕТОДИКА МАЛОРАКУРСНОГО ТОМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НАД ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК, ПОДВЕРГНУТЫХ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОМУ ВЗРЫВНОМУ ОБЖАТИЮ . . . . .	278
<i>Л. П. Брезгина</i>	
3D SMALL-DIRECTION TOMOGRAPHY OF INTERNAL STRUCTURE OF STEEL SHELLS AFTER THEIR QUASI-SPHERICAL IMPLODING COMPRESSION. . . . .	278
<i>L. P. Brezgina</i>	
NVIDIA-GPU ИНСТРУМЕНТ УСКОРЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ . . . . .	279
<i>С. К. Бурученко</i>	
NVIDIA-GPUS, A TOOL OF ACCELERATION IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD): EFFICIENCY AND RELIABILITY. . . . .	279
<i>S. K. Buruchenko</i>	
ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЖЕСТКИХ ПОЛИВЫПУКЛЫХ ВАРИАЦИОННЫХ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ . . . . .	280
<i>В. А. Гаранжа, Л. Н. Кудрявцева</i>	
ITERATIVE METHOD FOR SOLVING STIFF POLYCONVEX VARIATIONAL PROBLEMS OF NON-LINEAR ELASTICITY THEORY . . . . .	280
<i>V. A. Garanzha, L. N. Kudravtseva</i>	

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА СМЕШАННЫХ ЯЧЕЕК В 2D ПРОГРАММЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОДА ЭГАК . . . . .	280
<i>А. Р. Гужова, Е. А. Гончаров, В. Ю. Колобянин, Ю. В. Янилкин</i>	
NUMERICAL STUDIES OF A CALCULATION METHOD FOR MIXED CELLS IN 2D HEAT CONDUCTIVITY PROGRAM IN EGAK CODE . . . . .	281
<i>A. R. Guzova, E. A. Goncharov, V. Yu. Kolobianin, Yu. V. Yanilkin</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ НА ТЕЛО . . . . .	281
<i>М. А. Ильгамов, А. А. Аганин, Т. С. Гусева, Л. А. Косолапова, В. Г. Малахов, Н. А. Хисматуллина</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF CUMULATIVE IMPACT OF CAVITATION BUBBLES ON A BODY. . . . .	281
<i>M. A. Ilgamtov, A. A. Aganin, T. S. Guseva, L. A. Kosolapova, V. G. Malakhov, N. A. Khismatullina</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В ПК ANSYS EXPLICIT . . . . .	282
<i>С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Н. Н. Федорова, А. В. Федоров</i>	
SIMULATION OF BLAST ACTION ON CIVIL STRUCTURES USING ANSYS EXPLICIT . . . . .	283
<i>S. A. Valger, M. N. Danilov, N. N. Fedorova, A. V. Fedorov</i>	
ВОЗНИКНОВЕНИЕ КОНВЕКЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ С ПРИМЕСЬЮ . . . . .	283
<i>О. Н. Дементьев</i>	
BEGINNINGS OF CONVECTION IN THE HORIZONTAL LAYER OF THE LIQUID WITH THE IMPURITY. . . . .	284
<i>O. N. Dementyev</i>	
ЧИСЛЕННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ДВУХКАСКАДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МИКРОМИШЕНИ НА ОСНОВЕ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ С ИЗВЕСТНЫМ И НЕИЗВЕСТНЫМ ЭНЕРГОВЛОЖЕНИИ ВО ВНЕШНЕМ КАСКАДЕ . . . . .	284
<i>Г. В. Долголева</i>	
NUMERICAL CONSTRUCTION OF A CYLINDRICAL MICROTARGET ON THE BASIS OF SHOCK-FREE COMPRESSION WITH THE KNOWN AND THE UNKNOWN THE LAW THE ENERGY DEPOSITION IN THE EXTERNAL CASCAD.E . . . . .	284
<i>G. V. Dolgoleva</i>	
СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КМОП ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ . . . . .	285
<i>М. В. Горбатенко, С. С. Дьяков, В. М. Повышев</i>	
CIRCUIT SIMULATION OF THE RADIATION AS IT AFFECTS THE OPERATION OF CMOS MEMORY CELL UNDER THE PULSED GAMMA IRRADIATION . . . . .	285
<i>M. V. Gorbatenko, S. S. Dyakov, V. M. Povyshev</i>	
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИ IOSO . . . . .	285
<i>И. Н. Егоров</i>	
ENHANCEMENT OF COMPLEX ENGINEERING OBJECTS USING IOSO OPTIMIZATION TECHNOLOGY . . . . .	286
<i>I. N. Egorov</i>	
РЕАЛИЗАЦИЯ, ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ МГД УРАВНЕНИЙ В ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ СЖИМАЕМЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД . . . . .	286
<i>М. Ю. Егужова, В. А. Жмайло, В. Н. Софронов, О. Н. Чернышова, Ю. В. Янилкин</i>	
REALIZATION, RESEARCH AND TESTING OF 3D CALCULATION METHODS TO SOLVE MHD EQUATIONS IN EULERIAN VARIABLES FOR COMPRESSIBLE MULTI-MATERIAL MEDIA. . . . .	287
<i>M. Yu. Yeguzhova, V. A. Zhmailo, V. N. Sofronov, O. N. Chernysheva, Yu. V. Yanilkin</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В МАГНИТНЫХ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗДАХ . . . . .	287
<i>А. Г. Жилкин, Д. В. Бисикало</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF FLOW STRUCTURE IN MAGNETIC CLOSE BINARY STARS . . . . .	287
<i>A. G. Zhilkin, D. V. Bisikalo</i>	
ПОКРЫТИЕ ВЫПУКЛЫХ ВОСЬМИ ВЕРШИННЫХ МНОГОГРАННИКОВ В $R^3$ МЕНЬШИМИ ГОМОТЕТИЧНЫМИ КОПИЯМИ. . . . .	288
<i>А. О. Завадский, Е. А. Курсева</i>	
COVERING OF CONVEX EIGHT-VERTEX POLYHEDRONS IN $R^3$ BY SMALLER HOMOTHETIC COPIES . . . . .	288
<i>A. O. Zavadskii, E. A. Kursheva</i>	



ОБ АППРОКСИМАЦИИ ЧИСЛЕННОГО ПОТОКА В МЕТОДЕ КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА С УЧЕТОМ ПОДСЕТОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕЧЕНИЙ МНОГОМАТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЫ . . . . .	289
<i>П. П. Захаров, И. С. Меньшов</i>	
ON NUMERICAL FLUX APPROXIMATION IN FINITE VOLUME METHOD WITH REGARD OF SUB-CELL STRUCTURE FOR MULTIMATERIAL MEDIUM FLOWS COMPUTATION. . . . .	289
<i>I. S. Menshov, P. P. Zakharov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ . . . . .	289
<i>А. С. Зелепугин, О. А. Шкода, О. К. Лепакова, С. А. Зелепугин</i>	
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF MULTILAYER COMPOSITES FAILURE . . . . .	290
<i>A. S. Zelepugin, O. A. Shkoda, O. K. Lepakova, S. A. Zelepugin</i>	
ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ . . . . .	290
<i>С. А. Зелепугин, А. С. Зелепугин, А. С. Бодров, Н. В. Позднышева</i>	
3D SIMULATION OF PLASTIC DEFORMATION OF TITANIUM SAMPLES UNDER DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING. . . . .	291
<i>S. A. Zelepugin, A. S. Zelepugin, A. S. Bodrov, N. V. Pozdnysheva</i>	
ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ SPH РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ . . . . .	291
<i>А. Д. Зубов, М. А. Зубов</i>	
A NUMERICAL SPH METHOD FOR TWO-DIMENSIONAL AXIALLY SYMMETRIC PROBLEMS OF NONLINEAR HEAT CONDUCTION . . . . .	291
<i>A. D. Zubov, M. A. Zubov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАССООБМЕНА В МАГНИТНЫХ КАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ С БЫСТРО ВРАЩАЮЩИМИСЯ БЕЛЫМИ КАРЛИКАМИ. . . . .	292
<i>П. Б. Исакова, А. Г. Жилкин, Д. В. Бисикало, Н. Р. Ихсанов</i>	
NUMERICAL SIMULATIONS OF MASS TRANSFER PROCESS IN MAGNETIC CVS WITH FAST-ROTATING WHITE DWARFS . . . . .	292
<i>P. B. Isakova, A. G. Zhilkin, D. V. Bisikalo, N. R. Ikhsanov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ РАВНОВЕСИЯ ТРУБОПРОВОДА, С ДВИЖУЩЕЙСЯ ПО НЕМУ ЖИДКОСТЬЮ, В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С УЧЕТОМ ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ О ЕГО СТЕНКИ . . . . .	292
<i>В. В. Башуров, Н. Ф. Исмаилова, А. И. Кропотов, М. В. Пчелинцев, М. Ю. Филимонов</i>	
STUDY OF PIPELINE EQUILIBRIUM POSITIONS, FLUID MOVING INSIDE PIPELINE, IN GRAVITY FIELD, TAKING INTO ACCOUNT THE FRICTION OF LIQUID ON ITS SIDES . . . . .	293
<i>V. V. Bashurov, N. F. Ismagilova, A. I. Kropotov, M. V. Pchelintsev, M. Yu. Filimonov</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ НА БАЗЕ РАЗРЫВНОГО МЕТОДА ГАЛЕРКИНА . . . . .	293
<i>Н. Б. Иткина, С. И. Марков</i>	
MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF ADSORPTION ON THE BASIS OF THE DISCONTINUOUS GALERKIN METHOD . . . . .	293
<i>N. B. Itkina, S. I. Markov</i>	
ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА УДАРНЫХ ВОЛН . . . . .	294
<i>К. И. Казин, Д. А. Варфоломеев, В. Ф. Куропатенко</i>	
ABOUT ONE METHOD OF INCREASING THE ACCURACY OF SHOCK WAVE CALCULATION . . . . .	294
<i>K. I. Kazin, D. A. Varfolomeev, V. F. Kurapatenko</i>	
ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ В ЗАДАЧЕ ВЫВЕДЕНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ . . . . .	294
<i>И. Н. Кандоба, И. В. Козьмин, А. Б. Ложников, В. И. Починский</i>	
TIME OPTIMAL CONTROL IN A PROBLEM OF LAUNCHER INJECTION . . . . .	295
<i>I. N. Kandoba, I. V. Kozmin, A. B. Lozhnikov, V. I. Pochinskii</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ТЕЧЕНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ В КОЛЬЦЕВЫХ СОПЛАХ . . . . .	295
<i>А. Л. Карташев, М. А. Карташева</i>	
RESEARCH OF DEPOSITION OF PARTICLES IN CASE OF FLOW OF MULTICOMPONENT MEDIA IN AN ANNULAR NOZZLES. . . . .	296
<i>A. L. Kartashev, M. A. Kartasheva</i>	
ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ (РАСШИРЕНИИ) СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ ИЗ НЕСЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ. ЗАДАЧА ЗАБАБАХИНА . . . . .	296
<i>А. Б. Киселев</i>	

EXACT SOLUTION TO THE PROBLEM ON DYNAMIC COMPRESSION (EXPANSION) OF SPHERICAL LAYER OF INCOMPRESSIBLE VISCOUS FLUID. ZABAVAKHIN'S PROBLEM . . . . .	297
<i>A. B. Kiselev</i>	
ЭФФЕКТИВНАЯ ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШАТЕЛЕЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД ДЛЯ СИСТЕМ ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРЫ . . . . .	297
<i>М. И. Климов, И. С. Меньшов</i>	
EFFECTIVE PARALLEL IMPLEMENTATION OF THE CONTINUUM MECHANICS SOLVERS FOR HYBRID ARCHITECTURE SYSTEMS . . . . .	297
<i>М. I. Klimov, I. S. Menshov</i>	
ОБ ОДНОЙ МОДИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ «ЗАМОРОЖЕННОЙ» ГАЗОВЗВЕСИ. . . . .	297
<i>Н. Л. Клиначева, Ю. М. Ковалев, В. Ф. Куропатенко</i>	
ABOUT ONE MODIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE «FROZEN» GAS SUSPENSION. . . . .	298
<i>N. L. Klinacheva, Yu. M. Kovalev, V. F. Kuropatenko</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ, ОСНОВАННОЙ НА АЛГЕБРАИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ РЕКОНСТРУКЦИИ. . . . .	298
<i>С. В. Кольчугин, Н. А. Березина, В. В. Власов, А. Б. Коновалов</i>	
THE USE OF A PRIORI INFORMATION IN FEW-VIEWS COMPUTED TOMOGRAPHY BASED ON THE ALGEBRAIC RECONSTRUCTION TECHNIQUE . . . . .	299
<i>S. V. Kolchugin, N. A. Berezina, V. V. Vlasov, and A. B. Kononov</i>	
ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ШУМА ТОМОГРАФА С МЕГАЭЛЕКТРОНВОЛЬТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОНОВ . . . . .	299
<i>А. Б. Коновалов, В. В. Власов</i>	
ESTIMATING THE GEOMETRICAL PARAMETERS AND PERMISSIBLE NOISE LEVEL FOR MEGA-ELECTRON-VOLT ELECTRON BEAM TOMOGRAPHY . . . . .	300
<i>А. В. Коновалов, В. В. Власов</i>	
ДВУМЕРНАЯ ЗАДАЧА О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МЕТОДИК . . . . .	300
<i>А. А. Краюхин, В. Ю. Колобянин, Ю. В. Янилкин</i>	
A TWO-DIMENSIONAL TRAVELING LONGITUDINAL WAVE PROBLEM FOR VERIFICATION OF ELASTOPLASTIC TECHNIQUES. . . . .	301
<i>А. А. Крауухин, В. Ю. Kolobyenin, Yu. V. Yanilkin</i>	
ВАРИАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР БЛОЧНЫХ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК ВОКРУГ ТЕЛ С РУЛЯМИ И КРЫЛЬЯМИ . . . . .	301
<i>А. И. Белокрыс-Федотов, В. А. Гаранжа, Д. А. Забарко, В. П. Котенев, Л. Н. Кудрявцева</i>	
VARIATION GENERATOR OF BLOCK CALCULATION MESHES AROUND BODIES WITH VANES AND WINGS . . . . .	302
<i>А. I. Belokryss-Fedotov, V. A. Garanzha, D. A. Zabarko, V. P. Kotenev, L. N. Kudryavtseva</i>	
КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ В ЗАДАЧЕ МАЛЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ УПРУГИХ ПЛАСТИН . . . . .	302
<i>А. А. Кулешов</i>	
FINITE-DIFFERENCE APPROXIMATION FOR THE PROBLEM OF SMALL BENDING VIBRATIONS IN THIN ELASTIC PLATES . . . . .	302
<i>А. А. Kuleshov</i>	
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗАЩИТНЫХ СЛОЕВ СИСТЕМЫ ТОПЛИВО – ОБОЛОЧКА В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ . . . . .	303
<i>Е. И. Курбатова, А. И. Ксенофонтов, В. М. Демин</i>	
COMPUTER MODELING AND RESEARCH OF CARBON INFLUENCE ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF BLANKET OF FUEL SYSTEM – CAN DURING FORMATION AND OPERATION . . . . .	303
<i>Е. I. Kurbatova, A. I. Ksenofontov, V. M. Dyomin</i>	
О ЯДЕРНОМ ГОРЕНИИ DD И P – В <sup>11</sup> В ГЛУБОКОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА В ВАКУУМНОМ РАЗРЯДЕ . . . . .	304
<i>Ю. К. Куриленков, В. П. Тараканов, С. Ю. Гуськов</i>	
ON DD AND P-V <sup>11</sup> NUCLEAR BURNING AT THE DEEP POTENTIAL WELL OF VIRTUAL CATHODE IN VACUUM DISCHARGE. . . . .	304
<i>Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov</i>	
ДИНАМИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ХОЛОДНОГО ГАЗОВОГО ШАРА . . . . .	305
<i>В. Ф. Куропатенко, Е. С. Шестаковская</i>	
DYNAMIC COMPRESSION OF COLD GAS BALL . . . . .	305
<i>V. F. Kuropatenko, E. S. Shestakovskaya</i>	

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕКЛАРАТИВНО-МОДУЛЬНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И СОЗДАНИЯ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ . . . . .	305
<i>В. К. Лысых, А. М. Чупрунов</i>	
APPLICATION OF DECLARATIVE-MODULAR APPROACH FOR OBJECT DOMAIN DESCRIPTION AND USER GRAPHICAL INTERFACE DEVELOPMENT . . . . .	306
<i>V. K. Lisykh, A. M. Chuprunov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ УДАРНЫХ ВОЛН В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЛАХ . . . . .	306
<i>А. Е. Майер, К. В. Хищенко</i>	
NUMERICAL MODELING OF FORMATION OF STRUCTURE OF SHOCK WAVES IN ELASTIC-PLASTIC BODIES . . . . .	307
<i>A. E. Mayer, K. V. Khishchenko</i>	
ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ И ЦЕННОСТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА В МЕТОДЕ МОНТЕ-КАРЛО . . . . .	307
<i>И. Н. Медведев</i>	
ABOUT USING TRAJECTORY BIFURCATION AND HOLISTIC MODELING OF FREE PATH LENGTH IN MONTE-CARLO METHOD . . . . .	307
<i>I. N. Medvedev</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СЖИМАЕМОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ . . . . .	308
<i>С. Л. Дерябин, А. В. Мезенцев, А. П. Садов</i>	
USING MODELS OF A COMPRESSIBLE CONTINUUM FOR DESCRIBING TWO-DIMENSIONAL FLUID FLOW . . . . .	308
<i>S. L. Deryabin, A. V. Mezentsev, A. P. Sadov</i>	
CUDA-ВЕРСИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ТИС-1D». АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ. ЗАДАЧА КАЛИБРОВКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ . . . . .	309
<i>К. Д. Меркулов, И. С. Меньшов</i>	
CUDA-VERSION OF SOFTWARE SYSTEM “TIS-1D”. PERFORMANCE ANALYSIS. CALIBRATION PROBLEM OF CONTINUUM MECHANICS COMPUTER MODELS . . . . .	309
<i>K. D. Merkulov, I. S. Menshov</i>	
ОСОБЕННОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЭЙЛЕРОВА ПОДХОДА В РАСЧЕТАХ СЖАТИЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ . . . . .	310
<i>Н. А. Михайлов, И. В. Глазырин, А. В. Ершова, А. В. Карпеев, А. А. Надольский, И. В. Самков, А. В. Хмельёв, М. Н. Чижекков, С. Н. Щербаклова</i>	
NUMERICAL DETAILS OF MULTICOMPONENT EULERIAN APPROACH IN THE SIMULATION OF LASER TARGETS COMPRESSION . . . . .	310
<i>N. A. Mikhailov, I. V. Glazyrin, A. V. Ershova, A. V. Karpeev, A. A. Nadolsky, I. V. Samkov, A. V. Khmelyov, M. N. Chizhkov, S. N. Shcherbakova</i>	
ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПИ: КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ . . . . .	310
<i>К. Л. Михайлюков, И. В. Храмов, А. В. Скобеев, С. В. Потапов, Н. В. Фролова, М. Д. Романова</i>	
PI PROGRAM TO SIMULATE PROTON IMAGES: BRIEF DESCRIPTION AND EXAMPLES OF IMPLEMENTATION . . . . .	311
<i>K. L. Mikhailukov, I. V. Khratov, A. V. Skobeev, S. V. Potapov, N. V. Frolova, M. D. Romanova</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ОТКОЛЬНОМУ РАЗРУШЕНИЮ В ОДНОМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ . . . . .	311
<i>А. В. Мищенко, И. С. Меньшов, А. Б. Киселев</i>	
USE OF DIFFERENT ELASTO-PLASTIC MODELS FOR DESCRIBING EXPERIMENTAL DATA OF METAL SCABBING IN ONE-DIMENSIONAL STATEMENT . . . . .	312
<i>A. V. Mischenko, I. S. Menshov, A. B. Kiselev</i>	
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСПАДЕ РАЗРЫВА В ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ И ТРЕХТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКЕ . . . . .	312
<i>Н. Я. Моисеев</i>	
SOLUTION OF THE RIEMANN PROBLEM FOR TWO-TEMPERATURE AND THREE-TEMPERATURE GAS DYNAMICS . . . . .	312
<i>N. Ya. Moiseev</i>	
УДАРНО-ВОЛНОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ ЭКРАНОВ ПРИ УДАРЕ ОСКОЛКОМ . . . . .	313
<i>Н. И. Гуляева, Е. В. Недоспасова, С. В. Родиков, В. Н. Смирнов</i>	
SHOCK-WAVE LOADING OF PROTECTIVE BARRIER ON IMPACT BY FRAGMENT . . . . .	313
<i>N. I. Gulyaeva, E. V. Nedospasova, S. V. Rodikov, V. N. Smirnov</i>	

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ВИНЕРА-ХОПФА В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ВЗРЫВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ МЕТОДОМ КРЫЛОВА. . . . .	313
<i>Г. В. Орлов</i>	
SOLUTION OF THE WIENER-HOPF EQUATION FOR EXPERIMENTAL SHOCK DATA PROCESSING WITH THE KRYLOV METHOD . . . . .	314
<i>G. V. Orlov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖАТИЯ РЕАГИРУЮЩЕГО ДЕЙТЕРИЯ . . . . .	314
<i>И. Б. Палымский</i>	
THE NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS OBZHATIYA ING DEUTERIUM . . . . .	314
<i>I. B. Palymskiy</i>	
ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВЗВЕСИ. . . . .	315
<i>А. В. Панов, В. Е. Фёдоров</i>	
EXACT SOLUTIONS FOR GAS SUSPENSION EQUATION SYSTEM . . . . .	315
<i>A. V. Panov, V. E. Fedorov</i>	
АНАЛИЗ ИНВАРИАНТНОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАЛИЛЕЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ УНИТАРНОГО ТОПЛИВА ВО ВЗРЫВ. . . . .	316
<i>Ю. М. Ковалев, В. Ф. Куропатенко, Е. Е. Пигасов</i>	
ANALYSIS OF THE INVARIANCE UNDER GALILEAN TRANSFORMATION MATHEMATICAL MODEL OF THE TRANSITION OF COMBUSTION OF A UNITARY FUEL IN BLAST . . . . .	316
<i>Yu. M. Kovalev, V. F. Kuropatenko, E. E. Pigasov</i>	
К ТЕОРИИ И ОБОСНОВАНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ ФРАКТАЛЬНЫХ ЛАБИРИНТОВ . . . . .	317
<i>А. А. Потапов</i>	
ON THE THEORY AND JUSTIFICATION OF PHYSICAL APPLICATIONS FRACTAL LABYRINTHS . . . . .	317
<i>A. A. Potapov</i>	
МЕТОДЫ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ МЕДУЗА-П НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПАМЯТЬЮ . . . . .	318
<i>В. А. Пронин</i>	
METHODS FOR PARALLELING THE MEDUZA-P SOFTWARE PACKAGE ON DISTRIBUTED-MEMORY COMPUTERS	318
<i>V. A. Pronin</i>	
ОБОБЩЕННОЕ ТЕЧЕНИЕ КУЭТТА . . . . .	319
<i>С. Н. Аристов, Е. Ю. Просвиряков</i>	
GENERALIZED COUETTE FLOW . . . . .	319
<i>S. N. Aristov, E. Yu. Prosviryakov</i>	
РАЗРУШЕНИЕ И УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ. . . . .	319
<i>А. В. Радченко, П. А. Радченко, С. П. Батуев</i>	
FRACTURE AND SHOCK-WAVE PROCESSES IN ANISOTROPIC MATERIALS AT DYNAMIC LOADS . . . . .	319
<i>A. V. Radchenko, P. A. Radchenko, S. P. Batuev</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БАЛКИ ИЗ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ . . . . .	320
<i>П. А. Радченко, С. П. Батуев, Д. В. Лоскутова, И. А. Лебедев, Д. Г. Копаница, А. В. Радченко</i>	
MODELING OF DEFORMATION AND FRACTURE OF BEAM FROM GLUED WOOD AT LOW-SPEED IMPACT . . . . .	320
<i>P. A. Radchenko, S. P. Batuev, D. V. Loskutova, I. A. Lebedev, D. G. Kopanitsa, A. V. Radchenko</i>	
МЕТОДЫ И ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА «ФРЕГАТ» РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ В СМЕШАННЫХ ЯЧЕЙКАХ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК . . . . .	320
<i>Е. Н. Ребенок, Л. М. Зуева, Д. В. Могиленских, Т. Б. Фёдорова</i>	
METHODS AND PARALLEL PROGRAM "FREGAT" FOR DISTRIBUTING SUBSTANCES IN MIXED CELLS OF COMPUTATIONAL MESHES . . . . .	321
<i>E. N. Rebenok, L. M. Zueva, D. V. Mogilenskikh, T. B. Fedorova</i>	
ОДИН МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ . . . . .	321
<i>Л. И. Рубина, О. Н. Ульянов</i>	
ONE METHOD OF OBTAINING EXACT SOLUTIONS OF THE NON-LINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS IN PARTIAL DERIVATIVES . . . . .	321
<i>L. I. Rubina, O. N. Ulyanov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ УПРУГОГО ПРЕДВЕСТНИКА В МАТЕРИАЛАХ. . . . .	322
<i>Н. В. Савельева, Ю. В. Баяндин, О. Б. Наймарк</i>	

NUMERICAL STUDY OF ELASTIC PRECURSOR DECAY . . . . .	322
<i>N. V. Saveleva, Yu. V. Bayandin, O. B. Naimark</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ . . . . .	323
<i>A. A. Серёжкин, И. С. Меньшов</i>	
MODELING MULTIPHASE FLOW IN ELASTO-PLASTIC POROUS SOLIDS . . . . .	323
<i>A. A. Serezhkin, I. S. Menshov</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ТРЕНЕР К ЗАДАЧАМ РАЗВЕДКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ . . . . .	323
<i>С. Б. Серов</i>	
THE APPLICATION OF THE TRENER CODE SYSTEM TO THE EXPLORATION OF MINERAL RESOURCES . . . . .	324
<i>S. B. Serov</i>	
РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ, КИНЕТИКИ ПРОТЕКАНИЯ $\alpha'$ - $\epsilon$ -ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ, ЗАРОЖДЕНИЯ, РАЗВИТИЯ И ЗАЛЕЧИВАНИЯ ОТКОЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ИЗ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ . . . . .	324
<i>Н. Д. Соколова, Е. А. Козлов, А. В. Петровцев, Д. М. Шалковский, Н. С. Жилева, И. И. Кузнецова, Л. В. Хардина</i>	
MATHEMATICAL MODELING OF HIGH-STRAIN-RATE DEFORMATION, KINETICS OF $\alpha'$ - $\epsilon$ -PHASE TRANSITION, AS WELL AS NUCLEATION, GROWTH AND RECOMPACTION OF SPALL DAMAGE FOR RECOVERED SAMPLES OF QUENCHED 30KHGSA STEEL UNDER EXPLOSIVE LOADING . . . . .	325
<i>N. D. Sokolova, E. A. Kozlov, A. V. Petrovtsev, D. M. Shalkovsky, N. S. Zhilyaeva, I. I. Kuznetsova, L. V. Khardina</i>	
ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В МЕХАНИКЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД . . . . .	325
<i>В. С. Суров, И. В. Березанский, Е. Н. Степаненко</i>	
HYPERBOLIC MODEL IN MECHANICS OF HETEROGENEOUS MEDIA . . . . .	325
<i>V. S. Surov, I. V. Berezanskiy, E. N. Stepanenko</i>	
О ПОВЕДЕНИИ НЕКОТОРЫХ РЕШЕНИЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ . . . . .	326
<i>Л. И. Рубина, О. Н. Ульянов</i>	
ABOUT BEHAVIOUR OF SOME SOLUTIONS FOR NONLINEAR MATHEMATICS MODELS . . . . .	327
<i>L. I. Rubina, O. N. Ulyanov</i>	
АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ СЕТОК В ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОБЛАСТЯХ ВРАЩЕНИЯ . . . . .	327
<i>Н. А. Артемова, Т. Н. Бронина, О. В. Ушакова</i>	
GRID GENERATION ALGORITHMS FOR DEFORMED DOMAINS OF ROTATION . . . . .	328
<i>N. A. Artemova, T. N. Bronina, O. V. Ushakova</i>	
ГРУППОВОЙ АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ КИНЕТИКИ ДЕФЕКТОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ . . . . .	329
<i>Н. В. Филин</i>	
GROUP ANALYSIS OF THE EQUATION OF DEFECTS KINETICS IN A SOLID . . . . .	329
<i>N. V. Filin</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕЙСТОЙ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВЗВЕСЯХ, СОДЕРЖАЩИХ РЕАГИРУЮЩИЕ И ИНЕРТНЫЕ ЧАСТИЦЫ . . . . .	330
<i>Ю. В. Кратова, А. В. Федоров, Т. А. Хмель</i>	
NUMERICAL MODELING OF CELLULAR DETONATION IN GAS-PARTICLE MIXTURES OF REACTING AND CHEMICALLY INERT SOLID PARTICLES . . . . .	330
<i>Yu. V. Kratova, T. A. Khmel, A. V. Fedorov</i>	
РОСТ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ВСЕСТОРОННЕМ СЖАТИИ . . . . .	331
<i>Н. А. Дмитриев, Л. Ф. Потапкина, С. А. Холин</i>	
INSTABILITY GROWTH UNDER ALL-AROUND COMPRESSION . . . . .	331
<i>N. A. Dmitriev, L. F. Potapkina, S. A. Kholin</i>	
ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МИШЕНЬ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА УМЕРЕННОЙ МОЩНОСТИ . . . . .	331
<i>А. Ю. Круковский, В. Г. Новиков, И. П. Цыгвинцев</i>	
THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF LASER PULSE IMPACT ON THE TIN TARGET . . . . .	331
<i>I. P. Tsygvintsev, A. Yu. Krukovskiy, V. G. Novikov</i>	
МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В ПОДВИЖНОМ СЛОЕ . . . . .	332
<i>М. А. Чащин, Л. И. Рубина, О. Н. Ульянов</i>	
TECHNIQUE OF NUMERICAL MODELLING OF INTERACTION OF RADIATION WITH SUBSTANCE IN MOBILE LAYER . . . . .	333
<i>M. A. Chaschin, L. I. Rubina, O. N. Ulyanov</i>	

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ РЕШАТЕЛЬ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ «МОДУЛЬ NEWT». ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В МЕТОДИКЕ КОРОНА . . . . .	333
<i>С. В. Чеботарь, А. С. Сухих</i>	
PARALLEL SOLVER "NEWT MODULE" FOR LINEAR ALGEBRAIC EQUATION SYSTEMS AND ITS APPLICATION IN CODE KORONA . . . . .	334
<i>S. V. Chebotar, A. S. Sukhikh</i>	
НЕЯВНАЯ КОНЕЧНО-ОБЪЕМНАЯ СХЕМА С TVD-РЕКОНСТРУКЦИЕЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В P1-ПРИБЛИЖЕНИИ . . . . .	334
<i>А. Д. Гаджиев, И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков</i>	
AN IMPLICIT FINITE-VOLUME TVD SCHEME FOR SOLVING THE 2D RADIATIVE HEAT TRANSFER EQUATION IN P1-APPROXIMATION. . . . .	334
<i>A. D. Gadzhiev, I. S. Chubaresko, A. A. Shestakov</i>	
ПРОГРАММА INTERVAL-3D ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С ОДНОЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ НА ДРУГУЮ . . . . .	334
<i>Н. В. Чухманов, В. И. Тарасов, И. В. Сырова</i>	
INTERVAL-3D FOR GAS-DYNAMIC VALUES TRANSFER BETWEEN 3D ARBITRARY COMPUTATION GRIDS . . . . .	335
<i>N. V. Chukhmanov, V. I. Tarasov, I. V. Syrova</i>	
МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДОННОЙ ОБЛАСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ . . . . .	336
<i>Ю. В. Грахов, В. И. Хлыбов, Р. К. Швалева</i>	
METHODOLOGY OF NUMERICAL MODELLING OF AEROGASDYNAMIC PROCESSES IN THE BOTTOM PART OF FLIGHT VEHICLES. . . . .	336
<i>Yu. V. Grakhov, V. I. Khlybov, R. K. Shvaleva</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ ПОПРАВОЧНОГО МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ ДИАГОНАЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ СОВМЕСТНОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ . . . . .	336
<i>А. А. Шестаков</i>	
CONVERGENCE STUDY OF A CORRECTION DIAGONAL ELEMENT METHOD FOR SOLVING COUPLED ENERGY AND RADIATIVE TRANSFER EQUATIONS . . . . .	337
<i>A. A. Shestakov</i>	
ОБ ОДНОЙ ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧЕ РГД НА СЖАТИЕ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ . . . . .	337
<i>А. С. Вершинская, Д. С. Нецветаев, А. В. Уракова, А. А. Шестаков</i>	
A TEST PROBLEM ON RADIATIVE TRANSFER IN A COMPRESSED LAYERED SYSTEM IN DIFFERENT APPROXIMATIONS. . . . .	337
<i>A. S. Vershinskaya, D. S. Netsvetayev, A. V. Urakova, A. A. Shestakov</i>	
СХЕМА ГРОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ КВАЗИДИФфуЗИОННЫМ МЕТОДОМ. . . . .	337
<i>С. А. Грабовенская, В. В. Завьялов, А. А. Шестаков</i>	
GROM SCHEME FOR SOLVING RADIATIVE TRANSFER EQUATIONS BY A QUASI-DIFFUSION METHOD . . . . .	337
<i>S. A. Grabovenskaya, V. V. Zaviyalov, A. A. Shestakov</i>	
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ВЕКТОРНЫЙ МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ ОБЛАСТЯХ . . . . .	337
<i>Э. П. Шурина, Д. А. Архипов</i>	
THE MODIFIED VECTOR FINITE ELEMENT METHOD FOR MODELING OF THREE-DIMENSIONAL ELECTROMAGNETIC FIELDS IN INHOMOGENEOUS AREAS . . . . .	338
<i>E. P. Shurina, D. A. Arhipov</i>	
ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕНЗОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД С МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ . . . . .	338
<i>М. И. Эпов, Э. П. Шурина, Н. В. Штабель, Е. И. Михайлова</i>	
ELABORATION AND ANALYSIS OF THE EFFECTIVE TENSOR ELECTRICAL AND MAGNETIC CHARACTERISTICS OF HETEROGENEOUS MEDIUM WITH MICROINCLUSIONS . . . . .	339
<i>М. И. Епов, Е. П. Shurina, N. V. Shtabel, E. I. Mikhailova</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В РОТОРЕ МОДЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ ИГУАССУ. . . . .	339
<i>Ю. В. Янилкин, В. П. Стаценко, Ю. Д. Чернышев, О. О. Топорова, В. Ю. Колобянин, И. Ю. Турутина, С. П. Беляев, А. С. Дмитриева</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF A 3D GAS FLOW IN BOWL OF THE IGUASSU MODEL GAS CENTRIFUGE . . . . .	339
<i>Yu. V. Yanilkin, V. P. Statsenko, Yu. D. Chernyshev, O. O. Toporova, V. Yu. Kolobyenin, I. Yu. Turutina, S. P. Belyaev, A. S. Dmitrieva</i>	

КОД ЭГИДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ	340
<i>Ю. В. Янилкин, С. П. Беляев, В. Ю. Колобянин, А. В. Городничев, А. Р. Гужова, Л. И. Дегтяренко, Н. П. Интяпина, В. Г. Куделькин, С. А. Линяев, Д. В. Логинов, А. Л. Потехин, Е. В. Потехина, А. С. Разумков, А. Л. Стадник, В. И. Тарасов, О. О. Топорова, И. Ю. Турутина, В. М. Шабуров</i>	
CODE EGIDA FOR 2D AND 3D CONTINUUM MECHANICS SIMULATIONS	340
<i>Yu. V. Yanilkin, S. P. Belyaev, V. Yu. Kolobyanin, A. V. Gorodnichev, A. R. Guzhova, L. I. Degtyarenko, N. P. Intyapina, V. G. Kudel'kin, S. A. Linyayev, D. V. Loginov, A. L. Potekhin, E. V. Potekhina, A. S. Razumkov, A. L. Stadnik, V. I. Tarasov, O. O. Toporova, I. Yu. Turutina, V. M. Shaburov</i>	
КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ЧИСТЫХ МЕТАЛЛАХ И СПЛАВЕ Fe-Cr И СОПОСТАВЛЕНИЕ С КЛАСТЕРНОЙ ДИНАМИКОЙ	341
<i>М. Ю. Ромашка, А. В. Янилкин</i>	
A KINETIC MODEL OF ACCUMULATION OF RADIATIONAL DEFECTS IN PURE METALS AND IN Fe-Cr ALLOY AND COMPARISON WITH CLUSTER DYNAMICS	341
<i>M. Yu. Romashka, A. V. Yanilkin</i>	
МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРАМ КЛАСТЕРОВ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В КАСКАДАХ ПРИ НЕЙТРОННОМ И ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ, И ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ КЛАСТЕРОВ	342
<i>М. Ю. Ромашка, А. В. Янилкин</i>	
A MODEL OF SIZE DISTRIBUTION OF POINT DEFECT CLUSTERS GENERATING IN CASCADES UNDER NEUTRON AND ION IRRADIATION AND THE PROBLEM OF CALCULATION OF CLUSTER DIFFUSION COEFFICIENTS	343
<i>M. Yu. Romashka, A. V. Yanilkin</i>	
КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФУЗИИ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО	343
<i>А. Ю. Куксин, В. А. Хлебников, А. В. Янилкин</i>	
KINETIC MODEL OF DIFFUSION IN ALLOYS ON THE BASIS OF THE MONTE-CARLO METHOD	344
<i>A. Yu. Kuksin, V. A. Khlebnikov, A. V. Yanilkin</i>	
ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОТОЧЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРЕШЕННЫХ РЕЗОНАНСОВ.	344
<i>В. М. Шмаков, Е. А. Глазков, Е. И. Черепанова, Г. В. Орлов, Е. Ф. Гордейчук</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПО ПОЛИМЕРНЫМ МАТЕРИАЛАМ	345
<i>Т. В. Попова, А. Е. Майер, К. В. Хищенко</i>	
MODELING OF THE SHOCK WAVES PROPAGATION IN POLYMERIC MATERIALS.	345
<i>T. V. Popova, A. E. Mayer, K. V. Khishchenko</i>	
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	346
INDEX	354

## **Забабахинские научные чтения:**

Сборник тезисов докладов XII Международной конференции 2–6 июня 2014. –  
РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск

**Тезисы докладов публикуются в авторском изложении  
без корректорской и редакторской правок.**

Оригинал-макет подготовили: О. В. Завьялова, В. Б. Литвинов, Н. И. Потеряхина,  
Т. Б. Пряхина, Н. В. Шувалова, И.Е. Ядринцева

Подписано в печать 08.05.2014  
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 46,5  
Тираж 350 экз. Заказ № 4 от 06.05.2014

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