

Забабакхинские научные чтения

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

20–24 МАРТА 2017 ГОД

ТЕЗИСЫ

Zababakhin Scientific Talks

INTERNATIONAL CONFERENCE

MARCH 20–24, 2017

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 XIII Международной конференции 20–24 марта 2017. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2017. – 424 с, ил.

ISBN 978-5-902278-83-2

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 РАН 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

Пронин Ян Владимирович
Шестаков Александр Александрович

ISBN 978-5-902278-83-2

© ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ
им. академ. Е. И. Забабахина», 2017

СЛОВО О ЗАБАБАХИНЕ

В августе 1945 года в Советском Союзе развернулись масштабные работы по созданию атомной бомбы. Было осознано, что монополия США на это оружие массового поражения угрожает безопасности СССР.

Команда под руководством И. В. Курчатова, собранная для решения этой важнейшей задачи, включала как известных ученых различных научных областей: физики, химии, математики, технических наук, геологии, – так и недавних выпускников институтов.

Многие из этих молодых ученых выдвинулись на ведущие роли, благодаря научным талантам и выдающимся способностям организаторов науки.

Среди них особое место занимает Евгений Иванович Забабахин, имя которого носит наша конференция.

Е. И. Забабахин родился в Москве 16 января 1917 года. После окончания техникума работал наладчиком токарных станков на заводе «Шарикоподшипник», а в 1938 году поступил на физический факультет МГУ. После начала Великой Отечественной войны их курс перевели в Военно-воздушную академию имени Н. Е. Жуковского.

В 1944 году он окончил с отличием факультет авиавооружения (параллельно пройдя полный курс физфака МГУ) и был оставлен в адъюнктуре (военный аналог аспирантуры) под руководством профессора генерала Д. А. Вентцеля.

Евгений Иванович самостоятельно выбрал тему диссертации «Исследование процессов в сходящейся детонационной волне», которую защитил в 1947 году.

Его диссертация заинтересовала К. П. Станюковича, который обратил на нее внимание Я. Б. Зельдовича, одного из главных участников работ по атомной бомбе.

Яков Борисович высоко оценил возможности использования результатов Е. И. Забабахина и его научный талант и привлек его для работы по совместительству в своем отделе в Институте химической физики, а в апреле 1948 года добился его откомандирования младшим научным сотрудником в недавно созданный центр разработки атомной бомбы – КБ-11 (ныне ВНИИЭФ, г. Саров). Через несколько месяцев он был повышен до старшего научного сотрудника.

Евгений Иванович быстро стал одним из самых авторитетных специалистов по расчетным и экспериментальным методам газодинамики взрыва, активно участвовал в отработке конструкции первой советской атомной бомбы и в ее испытании. Как известно, она была в основных чертах копией первой американской атомной бомбы, но по тщательности отработки и некоторым конструктивным решениям даже превосходила заокеанский прототип.

После успешного испытания 29 августа 1949 года Е. И. Забабахин в числе ведущих участников был отмечен высокими наградами: Сталинской премией и орденом Ленина.

В процессе работы над первой атомной бомбой он совместно с Л. В. Альтшулером, Я. Б. Зельдовичем и К. К. Крупниковым предложил оригинальную, более совершенную конструкцию, которая была успешно испытана в 1951 году. При вдвое меньшем весе она оказалась вдвое мощнее копии зарубежной бомбы. За эту работу Евгений Иванович получил Сталинскую премию I степени и орден Трудового Красного Знамени. В 1951 году он был назначен начальником одного из теоретических отделов КБ-11.

Продолжая заниматься совершенствованием атомных бомб Евгений Иванович активно включился в разработку первой термоядерной бомбы («сахаровской слойки»). Оказались весьма полезными его исследования по разгону ряда пластин (плоская слойка). Под его руководством и, главным образом, им лично были проведены расчеты сжатия сферической слойки. При этом были получены интересные научные результаты по автоматическим режимам кумуляции периодических слоев, найдены способы получения оптимальных значений различных параметров кумуляции.

За создание и испытание первой термоядерной бомбы и за совершенствование атомных бомб Е. И. Забабахин стал в 1954 году одним из немногих, получивших самые высокие награды: ему было присвоено звание Героя Социалистического Труда, он получил Сталинскую премию I степени, а его денежная премия была самой большой среди всех участников. В 1953 году по представлению И. В. Курчатова ему вместе с некоторыми ведущими участниками атомного проекта была без защиты диссертации присуждена ученая степень доктора физико-математических наук.

Впоследствии Евгений Иванович шутил, что над кандидатской диссертацией он активно работал, докторскую степень получил без всяких усилий, а против избрания его членом-корреспондентом Академии наук даже возражал.

В начале 1955 года Е. И. Забабахин был назначен заместителем главного конструктора и научного руководителя КБ-11.

В марте 1955 года начались практические работы по созданию в СССР второго ядерного центра НИИ-1011, принципиальные решения по которому были приняты в 1954 году.

Первым решением правительства по руководящим кадрам НИИ-1011 главным конструктором и научным руководителем был назначен К. И. Щёлкин, а одним из заместителей научного руководителя и начальником

одного из двух теоретических секторов – Е. И. Забабахин, начальником второго теоретического сектора был назначен Ю. А. Романов.

Первым разработанным в новом институте ядерным боеприпасом стала сверхбомба диаметром 2 метра, длиной 8 метров, весом около 25 тонн, расчетной мощностью 30 мегатонн. Испытание сверхбомбы было отменено из-за неготовности полигона на Новой Земле к проведению взрывов такой мощности. В дальнейшем корпус сверхбомбы и ее уникальная парашютная система были использованы для испытаний нескольких самых мощных ядерных зарядов разработки как НИИ-1011, так и КБ-11 (в том числе знаменитой «Кузькиной матери»).

В 1957–1958 годах было проведено 14 ядерных испытаний изделий, разработанных НИИ-1011.

По их результатам в 1957 году был принят на вооружение термоядерный заряд в составе авиабомбы, ставший первым термоядерным боеприпасом в советском ядерном арсенале.

На вооружение были приняты первый боеприпас для головной части баллистической ракеты, боеприпас для авиационной крылатой ракеты (совместно с КБ-25, ныне ВНИИА имени Н. Л. Духова) и еще один боеприпас для авиабомбы.

За эти работы Е. И. Забабахин в числе шести ведущих сотрудников института был удостоен Ленинской премии. В 1958 году он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.

В сентябре 1960 года, после ухода К. И. Щёлкина на пенсию (официально по болезни) Е. И. Забабахин был назначен научным руководителем НИИ-1011.

На этом посту Евгений Иванович работал до конца жизни – до 27 декабря 1984 года.

За время научного руководства Забабахина снежинский ядерный центр, неоднократно менявший название (НИИ-1011, ВНИИ приборостроения, ВНИИ технической физики), разрабатывал ядерное оснащение для всех видов советских вооруженных сил.

Авиабомбы с ядерным оснащением, как стратегические, так и тактические, разрабатывались исключительно нашим институтом. Это же относится к артиллерийским ядерным боеприпасам и к боеприпасам для баллистических ракет на подводных лодках.

Эти работы велись в тесном сотрудничестве с соответствующими подразделениями Министерства обороны и с разработчиками носителей. Особенно плодотворное сотрудничество поддерживалось с СКБ-385 – разработчиком ракет для подводных лодок (ныне ГРЦ имени В. П. Макеева). Этому способствовали регулярные встречи руководителей – Е. И. Забабахина и В. П. Макеева, которых связывало взаимное уважение и симпатия.

Под руководством Е. И. Забабахина продолжалась обширная программа физических опытов по изучению свойств веществ и физических процессов в экстремальных условиях, характерных для ядерных взрывов, начатая еще в 1957 году. Такие опыты проводились как попутно с испытаниями ядерных зарядов, так и с применением специально разработанных ядерных взрывных устройств. Важнейшие эксперименты были проведены для исследования поражающих факторов ядерного взрыва и для изучения процессов термоядерного горения. По объему и широте охвата программа физических опытов ВНИИТФ не имеет аналога среди всех мировых ядерных оружейных центров.

Особое значение имел физический опыт, проведенный в 1965 году, в котором было осуществлено термоядерное горение газообразного дейтерия и газообразной дейтериево-тритиевой смеси.

Этот опыт положил начало разработки нового типа атомных зарядов, использование которых в термоядерных боеприпасах позволило значительно уменьшить их габариты и массу, что было весьма актуально для создания разделяющихся головных частей ракетных комплексов как наземного, так и подводного базирования.

Его результаты оказались востребованы и при создании ядерных взрывных устройств (ЯВУ) для мирных применений. Мирному использованию ядерных взрывов Евгений Иванович уделял особое внимание. Под его руководством ВНИИТФ стал лидером по разработке и использованию устройств для мирных ядерных взрывов: из проведенных в СССР 124 мирных ядерных взрывов в 75 были использованы устройства разработки ВНИИТФ.

Технические требования к мирным ЯВУ были весьма специфичными: для взрывов наружного действия с выбросом грунта (строительство каналов, водохранилищ, насыпных плотин, гаваней и т. п.) и для подземного дробления руды важнейшее значение имела минимизация радиоактивных продуктов, остающихся после взрыва, а габариты и вес не имели решающего значения. Для взрывов, проводимых на большой глубине (глубинного сейсмического зондирования, интенсификации добычи нефти и газа, создания подземных полостей для хранения углеводородов, глубинного захоронения биологически вредных отходов, ликвидации аварийных газовых фонтанов), требовались ЯВУ минимально возможного диаметра, способные выдерживать большие давления и температуры.

Опыт 1965 года, в разработке и проведении которого Евгений Иванович принимал личное активное участие, был полезен для обоих типов ЯВУ.

Для Е. И. Забабахина как руководителя было характерно детальное обсуждение всех важнейших работ с основными специалистами института. Такие обсуждения обычно проходили в просторном кабинете Евгения Ивановича, основные варианты он тщательно записывал мелом на большой доске, фиксируя своим мелким, но очень четким почерком в виде графиков и ставших легендарными таблиц. Тут же виртуозно проводились



Самое чистое ядерно-взрывное устройство
для мирных применений

Самый малогабаритный
ядерный артиллерийский снаряд



необходимые численные оценки. Евгений Иванович поддерживал перспективные, иногда весьма рискованные предложения и брал ответственность за окончательное решение, стараясь убедить участников в его целесообразности.

Для разработок ВНИИТФ было характерно, что они часто находились на грани риска, иногда это приводило к отказам, но в целом способствовало достижению рекордных показателей (многие из них, по всей видимости, являются мировыми рекордами).

В том числе были созданы:

- самый легкий и малогабаритный боеприпас для стратегических ядерных сил;
- самый малогабаритный ядерный артиллерийский снаряд;
- самый ударостойкий ядерный заряд для авиабомбы;
- самый экономичный по расходу ядерных материалов атомный заряд;
- самый маломощный заряд-облучатель, что позволяло наиболее экономично изучать поражающие факторы ядерного взрыва;
- самое прочное и термостойкое ЯВУ для промышленных применений;
- самое чистое ЯВУ для мирных применений (99,85% за счет энергии синтеза).

Большое внимание Евгений Иванович уделял развитию расчетной и экспериментальной базы ВНИИТФ. Вводились в эксплуатацию всё более мощные вычислительные машины, создавались и совершенствовались расчетные программы. Было создано несколько импульсных ядерных реакторов и электрофизических установок, устройств для моделирования турбулентного перемешивания, было начато создание мощных лазерных систем. Постоянно обновлялся парк газодинамических, климатических, ударных установок для наземной отработки ядерных зарядов и боеприпасов.

Работы, выполненные ВНИИТФ под научным руководством Е. И. Забабахина, были отмечены высокими правительственными наградами: получено 10 Ленинских и 20 Государственных премий, 4 сотрудника ВНИИТФ стали Героями Социалистического Труда, многие сотрудники получили ордена и медали СССР.

Для Евгения Ивановича были характерны исключительные скромность и бескорыстие. Он отмечен самыми высокими наградами, но они были получены до того, как он стал научным руководителем института. Став руководителем, он неизменно отказывался входить в составы авторских коллективов, представляемых на Ленинские или Государственные премии. В наше прагматичное время наивным чудачеством выглядит поступок Евгения Ивановича и директора нашего института Г. П. Ломинского: они отказались получать денежные выплаты, которые им причитались за генеральские звания, посчитав для себя достаточными зарплаты за руководство институтом.

До последних лет жизни Е. И. Забабахин продолжал научные исследования в области кумуляции, стараясь получить фундаментальные законы различных видов кумуляции.

Выдающиеся научные достижения Евгения Ивановича были отмечены в 1984 году присуждением золотой медали имени М. В. Келдыша Академии наук СССР.

Коллектив ВНИИТФ и работники всего российского ядерного оружейного комплекса хранят благодарную память о Евгении Ивановиче Забабахине.

Совместным решением Минатома Российской Федерации и губернатора Челябинской области 28 октября 1998 года ВНИИТФ было присвоено имя академика Е. И. Забабахина.

В 1998 году во ВНИИТФ были учреждены ежегодные премии для молодых ученых. Самая престижная из этих премий носит имя Е. И. Забабахина.

ВНИИТФ регулярно проводит Забабахинские научные чтения, ставшие авторитетным международным научным форумом. Вашему вниманию предлагаются тезисы очередной XIII конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Евгения Ивановича Забабахина.

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

PLENARY SESSION

РАБОТЫ Е. И. ЗАБАБАХИНА В ОБЛАСТИ КУМУЛЯЦИИ

И. Е. Забабахин

E-mail: igor-zababakhin@yandex.ru

Работы Е. И. Забабахина по кумулятивным процессам и явлениям проходят через всю его научную деятельность. Такому процессу – схождению сферически симметричной детонационной волны – была посвящена его кандидатская диссертация, защищенная в 1947 г. Итоги всей этой деятельности были подведены в маленькой по объему, но емкой по содержанию книге «Явления неограниченной кумуляции» / Е. И. Забабахин, И. Е. Забабахин. (М.: Наука, 1988). В ней были рассмотрены различные классы явлений неограниченной кумуляции: мгновенной, стационарной, статической; в идеальной постановке, а также с учетом некоторых диссипативных процессов. Рассматривается принципиальный вопрос о неустойчивости неограниченной кумуляции.

Представлен сжатый обзор этих задач.

1. Кумулятивные струи. Плоский и осесимметричный случай. Несжимаемая и сжимаемая жидкость.
2. Схлопывание полости в несжимаемой жидкости. Идеальная жидкость. Вязкая жидкость. Схождение цилиндрической оболочки.
3. Кубическое уравнение состояния. Резко упрощает уравнения газодинамики, дает наглядные решения.
4. Метательное действие взрыва. Ряд типичных задач в упрощенной постановке. Приведены качественные решения.
5. Неустойчивость и ее ограничение. Гравитационная неустойчивость контактных границ. Способы борьбы.
6. Сходящиеся ударные и детонационные волны. Сходящаяся ударная волна. Автомодельность. Сходящаяся детонационная волна. Детонация в магнитном поле. Фокусировка ударной волны в веществе с фазовым переходом. Фокусировка упругого предвестника. Безударное сжатие шара.
7. Сферический пузырек в сжимаемой жидкости. Неоднозначность предельных решений.
8. Кумуляция с периодической автомодельностью. Автомодельная система из тяжелых и легких слоев. Автомодельная многогранная сходящаяся ударная волна.
9. Ударные волны электромагнитного поля. Сходящаяся цилиндрическая и коническая ударная волна.
10. Статическая кумуляция. Концентрический пресс.
11. Неустойчивость неограниченной кумуляции. Идеальная среда, развитие возмущений. Принципиальная неустойчивость.

Кумуляция остается очень полезной идеализацией, допускающей точные решения и указывающей как к ней приближаться практически.

E. I. ZABABAKHIN'S RESEARCH INTO CUMULATION

I. E. Zababakhin

E-mail: igor-zababakhin@yandex.ru

E. I. Zababakhin conducted research into cumulative processes and phenomena during his entire scientific life. In 1947 he defended his PhD thesis focused on such a process, i.e. convergence of spherically symmetric detonation waves. All these activities were summarized in a book, small by volume but rich in content, titled «Unlimited cumulation phenomena» by E. I. Zababakhin and I. E. Zababakhin. (M.: Nauka, 1988). It considers different classes of unlimited cumulation phenomena: instantaneous, stationary, static; in an ideal setting, and also taking into account some dissipative processes. It explores a fundamental issue of unlimited cumulation instability.

The talk gives a brief review of the following problems:

1. Cumulative jets. Planar and axisymmetric cases. Incompressible and compressible liquids.
 2. The collapse of cavities in incompressible liquids. Ideal liquid. Viscous liquid. Convergence of liquid cylindrical shell.
 3. Cubic equation of state. It dramatically simplifies the equations of gas dynamics and gives clear solutions.
 4. Propelling effect of explosion. A number of typical problems in a simplified statement. Qualitative solutions are provided.
 5. Instability and its limitation. Gravity-driven instability of a contact boundary. Methods of limitation.
 6. Converging shock and detonation waves. Converging shock wave. Self-similarity. Converging detonation wave. Detonation in a magnetic field. Focusing of a shock wave in material with the phase transition. Focusing of elastic precursor. Shock-free compression of a sphere.
 7. Spherical bubble in compressible liquid. Ambiguity of extreme solutions.
 8. Cumulation with periodic self-similarity. Self-similar system consisting of heavy and light layers. Self-similar converging polyhedral shock wave.
 9. Shock waves of electromagnetic field. Converging cylindrical and conical shock waves.
 10. Static cumulation. Concentric press.
 11. Instability of unlimited cumulation. Ideal medium, development of perturbations. Fundamental instability.
- Cumulation remains a useful idealization that allows for exact solutions and indicates how to approach it in practice.
-

ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ

А. П. Васильев

АО «НИКИЭТ» имени академика Н. А. Доллежала,
Москва, Россия
Общественный совет Госкорпорации «Росатом», Россия
E-mail: avasiliev@nikiet.ru

И американские, и советские ученые еще при разработке первых атомных бомб думали и мечтали о мирном применении мощи ядерных взрывов. Первый подземный ядерный взрыв был проведен в США в 1957 г., что позволило сравнить результаты расчета и эксперимента. Но американская программа мирных ядерных взрывов не получила широкого развития.

Программа мирных ядерных взрывов в СССР была более обширной и многоплановой и нацелена на практические применения. Для ее реализации во ВНИИЭФ и ВНИИТФ были созданы заряды высокой чистоты для взрывов на выброс, а также специальные заряды для камуфлетных взрывов на больших глубинах, в том числе для работы при высоких температурах и давлениях.

В докладе рассмотрены примеры различных применений, их цели и полученные результаты как успешные, так и неудачные, что, хоть и редко, но случалось. Особое внимание уделено дальнейшей судьбе объектов мирных ядерных взрывов.

NUCLEAREXPLOSIVETECHNOLOGIESINPEAC EFULNUCLEAREXPLOSIONS

A. P. Vasiliev

JSC NIKIET, Moscow, Russia
Public Council of State Atomic Energy Corporation
«Rosatom», Russia
E-mail: avasiliev@nikiet.ru

American and Soviet scientists during the development of the first atomic bombs were thinking about peaceful application of nuclear explosions. The first underground nuclear explosion was carried out in the USA in 1957, that enabled to compare the results of experiments and calculations. But American program of peaceful nuclear explosions was not widely developed.

The program of peaceful nuclear explosions in the USSR was more extensive and comprehensive and focused on practical application. To implement this program VNIIEF and VNIITF created high purity charges for excavating explosions, as well as special charges for camouflet explosions in deep boreholes, in particular for operation at high temperatures and pressures.

The report considers the examples of various applications, their objectives and results, both successful and unsuccessful (that rarely happened). Special attention is paid to the possible future of the sites of peaceful nuclear explosions.

ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ И КУМУЛЯТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

В. А. Симоненко

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

Интерес к высокоинтенсивным и кумулятивным процессам и явлениям обусловлен военными и технологическими применениями и проявлениями их в природе. Первоначально они встречались при взрывных явлениях, а затем, как оказалось, без взрывов – в XIX веке при решении проблемы разрушения гребных судовых винтов. Но, оглядываясь назад с современных позиций, можно констатировать, что наибольший интерес к рассматриваемому кругу проблем сложился в 40–70-х годах прошлого века в связи с работами по созданию и применению ядерных взрывных устройств. В этот же период были получены основные теоретические результаты. Тем не менее, теоретические и экспериментальные исследования продолжают и получаются новые интересные и порой ценные результаты, в том числе, и для технологических целей. Расширяется также круг понимаемых природных явлений такого типа.

Существенный вклад в развитие этого направления внес Е. И. Забабахин. Он указал на ряд новых по тому времени процессов – сходящаяся детонационная волна, периодическая слоеная система, ряд конфигураций магнитных волн, упругая волна и волна ударных полиморфных превращений. Проанализировал особенности протекания таких процессов. Особое внимание уделено обсуждению неограниченной кумуляции и изучению механизмов включения физических ограничений. Обратил внимание на то, что в ряде случаев эти механизмы не устраняют, а изменяют характер протекания кумулятивного процесса.

В классе высокоинтенсивных процессов работы Евгения Ивановича способствовали углублению понимания процессов, сопровождающих сильные взрывы в атмосфере. Он обращал внимание на особенности протекания таких процессов. Большое внимание он уделял теоретическим и экспериментальным аспектам сильных взрывов в подземных условиях, в ближних областях от места взрыва, на удалении, в областях полиморфных превращений в веществах (в частности, предложил постановку графитовых образцов в двух экспериментах), вопросам технологических применений сильных взрывов – камуфлетных и взрывов на выброс. В поле внимания были исследования и работы по взрывному пережатию аварийных газовых скважин, по созданию подземных полостей, по организации отвода радиоактивности, по созданию кратеров на поверхности и др. Благодаря его поддержке наш институт занимал лидирующие позиции по использованию высокоинтенсивных процессов для исследований свойств веществ в экстремальных состояниях.

Евгений Иванович уделял повышенное внимание вопросам неустойчивости кумулятивных и высокоинтенсивных процессов, возникновению и развитию турбулентности, как в лабораторных условиях, так и в натуральных экспериментах.

При появлении новых экспериментальных возможностей для организации и использования высокоинтенсивных процессов были выявлены и глубоко изучались классы явлений, основываясь на той методологии, которая была создана в предыдущие десятилетия, но с использованием новых расчетно-теоретических возможностей. Расширились также применения этой методологии к исследованиям природных явлений, таких как образование трубок взрыва (диатрем) в земной коре, выход волны цунами на берег, высокоскоростное столкновение астероидов и комет, взрывные процессы в звездных объектах, включая нейтронные звезды и др. Дополнительно отметим, весь круг таких проблем регулярно обсуждался и обсуждается на Забабахинских научных чтениях.

HIGH-INTENSIVE AND CUMULATIVE PROCESSES AND PHENOMENA

V. A. Simonenko

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

High-intensive and cumulative processes and phenomena are of interest due to their manifestation in nature and military and technological applications. At first, people came across them in explosions, then, without explosions, when dealing with destroyed marine screw propeller and solving that problem in the 19th century. In retrospective it is obvious that those processes and phenomena were of greatest interest in the 1940–1970-s in relation to creation and development of nuclear explosive devices. The major theoretical results were obtained at the same time. Nevertheless theoretical and experimental research is still in progress and new results are obtained both interesting and valuable for science and technology purposes. More and more phenomena of this type are understood in nature.

A significant contribution to the development of this scientific area was made by Evgeny Zababakhin. He identified a number of new at that time processes: converging detonation wave, periodically-layered system, several electromagnetic wave configurations, elastic wave and shock-induced wave of polymorphous transformations. He analyzed specifics of those processes, paying special attention to unlimited cumulation and mechanisms triggering physical limitations. He emphasized that in some cases those mechanisms do not eliminate a cumulative process but change its character.

As for high-intensive processes, Dr. Zababakhin's efforts facilitated in-depth understanding of the ones accompanying strong explosions in the atmosphere. He paid attention specific features of those processes. He was involved in the study of theoretical and experimental aspects of strong underground explosions in the close vicinity and

at some distance of the explosion, in the areas of polymorphous transformations in materials (for example, he proposed a setup for two experiments with graphite samples). He looked into the issues of technical applications of strong explosions – confined and excavating. He focused on research and activities for explosion-driven occlusion of emergency gas wells, formation of large underground cavities and surface craters, radioactivity interception, etc. Thanks to his support and efforts our Institute was a leading one in application of high-intensive processes for studying materials under extreme conditions.

Evgeny Zababakhin looked into instability of high-intensive and cumulative processes, turbulence initiation and development both in lab-scale and real experiments.

When new experimental opportunities opened for application of high-intensive processes, in-depth studies of those classes of phenomena were carried out based on the methodology developed in the previous decades but with the use of new simulation capabilities. That methodology was then broader applied to study natural phenomena such as formation of explosion pipes (diatremes) in the Earth crust, tsunami arrival at the coast, high-velocity collisions of asteroids and comets, stellar explosive processes (including those in neutron stars), etc. This wide circle of problems is regularly discussed during the Zababakhin Scientific Talks.

ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

В. Г. Рогачев

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: oefimova@otd13.vniief.ru

Обсуждается постановка и результаты ряда лазерных экспериментов по исследованию реологических свойств веществ.

Основное внимание уделяется экспериментам при относительно низких потоках лазерного излучения, когда в облучаемой мишени формируются ударные волны слабой интенсивности. Исследуется динамика затухания ударных волн и формирование отколов.

Рассмотрена возможность лазерного моделирования разрушающего воздействия мощного превентивного взрыва на опасные астероиды. С помощью лазерных экспериментов с микро макетами каменных астероидов (хондритов) определены критерии заведомого разрушения астероидов контактным ядерным взрывом.

**HIGH POWER LASERS APPLICATION
FOR THE SUBSTANCES RHEOLOGICAL
PROPERTIES RESEARCH**

V. G. Rogachev

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

E-mail: oefimova@otd13.vniief.ru

Experimental setup and results of laser experiments on researching rheological properties of various substances are discussed.

Main attention is devoted to experiments at relatively low flows of laser radiation when low intensity shock waves are generated within the irradiated target. The shock wave attenuation dynamics and material spallation are investigated.

The opportunity of laser modeling of high-power preventive explosion destructive effect onto dangerous asteroids is considered. In laser experiments with stoned asteroid (chondrites) micromodels the criteria for asteroids destruction at contact nuclear explosion were defined.

Секция 1

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

Section 1

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

ЭКСПЕДИЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЙОНА ПАДЕНИЯ УЧУРСКОГО МЕТЕОРИТА

И. И. Амелин¹, В. К. Гусяков¹,
В. А. Цельмович², А. Ю. Куражковский²

¹ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²Геофизическая обсерватория «Борок» филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, п. Борок, Россия

E-mail: aii@omzg.sscc.ru; tselm@mail.ru

Несмотря на развитие современных средств наблюдения за космическим пространством вплоть до настоящего времени существуют значительные территории, где падения небесных тел остаются практически незамеченными в силу малой плотности населения и труднодоступности территории. Например, в [1] указано, что в августе 1993 г. группа геологов под руководством В. Е. Кириллова наблюдала сейсмические, звуковые явления и масштабный вывал леса в Аяно-Майском районе на севере Хабаровского края [1–3].

Для проверки метеоритной гипотезы образования вывала и поиска предполагаемого места падения метеорита в период с 5 июля по 11 августа 2016 года лаборатория цунами ИВМиМГ СО РАН провела работы по наземному изучению района. Были осмотрены ряд воронок в нижнем течении р. Ниж. Конкули, Унга-Бережан и Аякачан) и выяснилось их земное происхождение (термокарст, карст). Обнаружена область направленного вывала леса (300×800 м) в верховьях р. Сыннар. Отобраны два образца торфа – рабочий и контрольный. Рабочий образец взят в 5–7 км от места предполагаемого падения метеорита, контрольный – в 1,5 км к юго-востоку от с. Чагда в долине р. Алдан. Определение магнитных характеристик поверхностного слоя торфа из района р. Нижняя Конкули по методике [4] показало, что величина остаточной магнитной восприимчивости (Irs) рабочего образца почти в 6 раз превышала контрольный. Космическое происхождение магнитной пыли содержащейся в торфе из предполагаемого района падения метеорита подтвердили и микрозондовые анализы.

Получены первые вещественные доказательства, подтверждающие метеоритную гипотезу возникновения вывала леса в долине р. Нижняя Конкули 3.08.1993 г. Дальнейшие экспедиционные исследования зоны разрушений позволят получить реальные данные для верификации существующих математических моделей взаимодействия ударных волн на реальном рельефе, с тем чтобы иметь возможность спрогнозировать возможный ущерб в случае столкновения с Землей крупных метеоритов в будущем [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-05-00703а «Изучение природных катастроф в голоцене с помощью микрозондового анализа микрочастиц-индикаторов событий из торфяных отложений».

Литература

1. Кириллов В. Е. Маршрутами, тропами и дорогами. Хабаровск, 2004. 146 с.
2. Амелин И. И. Падение крупного метеорита на севере Хабаровского края в 1993 г. // Сб. трудов III международной конференции «Метеориты, астероиды, кометы», Челябинск-Чебаркуль, 21–23 мая 2015. С. 211–214.
3. Интернет-источник: <http://tsun.sscc.ru/nh/uchur.html>
4. Цельмович В. А. Возможности микроскопической диагностики космической пыли в торфе. «Метеориты, астероиды, кометы». Материалы международной конференции «Чебаркуль 2015». ISBN 978-5-9905440-8-6. Изд-во «ТЕТА», Челябинск. С. 193–196.
5. В. П. Коробейников, П. И. Чушкин, Л. В. Шуршалов О зоне наземных разрушений при воздушном взрыве крупного метеорита. Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа, 1974, № 3, 94–100.

EXPEDITION STUDY OF AREA OF BIG METEORITE FALLING IN UCHUR RIVER BASIN

I. I. Amelin¹, V. K. Gusiakov¹,
V. A. Tsel'movich², A. Yu. Kurazhkovsky²

¹ICMMG SB RAS, Novosibirsk, Russia

²GO «Borok» IPE RAS, v. Borok, Russia

E-mail: aii@omzg.sscc.ru; tselm@mail.ru

Despite the development of modern technical tools for near-Earth space surveillance, there are significant areas where the falls of cosmic bodies remain unnoticed due to low population density and accessibility problems. For example, in [1] it is reported that the geological team led by V. E. Kirillov observed seismic and sound effects and large-scale forest destruction in Ayano-Maisky district (north of Khabarovsk region) in August of 1993 [1–3].

To test the meteoritic hypothesis of observed phenomena and search the possible place of the impact, the Tsunami Laboratory of the ICMMG SB RAS carried out the fieldwork in the Nizhnaya Konkuli river area from July 5 to August 11, 2016. Number of depressions along the Nizhnaya Konkuli, Unga-Bereyakan and Ayakachan rivers were examined and they were found as having the terrestrial origin (thermokarst, karst). The group detected an area of forest fall (300×800 m) with directed fallen tree trunks in the upper part of Synnyar river basin. Two samples of peat were taken for further lab analysis. One (working) sample was taken 5–7 km from the place of the supposed meteorite impact, and other (control) sample was taken near the village Chagda in Aldan valley, some 500 km of the impact site. Measuring of the magnetic characteristics of the surface layer of peat from the Nizhnaya Konkuli area by the method described in [4] showed that the magnitude of the residual magnetic susceptibility (Irs) of the working sample of almost 6 times higher than the control sample. The cosmic origin of magnetic dusts found in the working peat sample from the Nizhnaya Konkuli valley was confirmed by microprobe analyses.

Thus, the first objective evidences of the meteorite hypothesis of the 1993 event occurred in the Nizhnaya

Konkuli valley were obtained. Further exploration of the destruction zone will provide the real data to verify existing mathematical models of interaction of shock waves with land relief [5] in order to predict the possible damage resulted from the collision of large asteroids with the Earth surface in the future.

This work was partly supported by RFBR grant 16-05-00703a «Study of natural disasters in the Holocene by microprobe analysis of events microparticles indicator of peat deposits.»

References

1. Kirillov V.E. Routes, trails and roads. Khabarovsk, 2004. 146 p.
2. Amelin I.I. The fall of a large meteorite in the north of the Khabarovsk Territory in 1993 // Sat. works of the III International conference «Meteorites, Asteroids, comets», Chelyabinsk, Cherbarkul, 21-23 May 2015. P. 211–214.
3. Internet sources: <http://tsun.sscc.ru/nh/uchur.html>
4. Tsel'movich V.A. Features microscopic diagnostics of cosmic dust in the peat. «Meteorites, Asteroids, comets». Proceedings of the international conference «Cherbarkul 2015». ISBN 978-5-9905440-8-6. Publishing house «ТЕТА», Chelyabinsk. P. 193–196.
5. Korobeynikov V.P., Chushkin P.I., Shurshalov L.V. About area of land destruction by air explosion of a large meteorite. Math. USSR Academy of Sciences, Fluid Mechanics, 1974, № 3, P. 94–100.

1-2

ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА БЕДНЫЕ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫЕ ПЛАМЕНА

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

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия
E-mail:dep5@vniitf.ru

В работе исследовались бедные водородо-воздушные пламена в диапазоне концентраций водорода 14–18% в вертикально ориентированной трубе квадратного сечения стороной 138 мм. Измерительная секция трубы имела оптические окна размером 138 мм на 200 мм. Использовались две конфигурации трубы. В конфигурации № 1 труба представляет собой единый отсек атмосферного давления длиной 1680 мм. Напротив, в конфигурации № 2 труба состояла из разделённых между собой лавсановой мембраной отсека атмосферного давления и вакуумного отсека длиной 1680 мм и 2070 мм, соответственно.

Непосредственно перед экспериментом канал трубы вакуумировался, а затем, исключая вакуумный отсек, заполнялся до атмосферного давления водородо-воздушной смесью. Смесью воспламенялась

искрой снизу трубы. В эксперименте регистрировались теневые изображения пламени с частотами 4100 и 10 000 Гц, измерялась видимая скорость пламени, а также давление в атмосферном отсеке.

В первой части работы было проведено экспериментальное исследование пламен в конфигурации трубы № 1. Ниже 16% водорода в воздухе реализуется режим выпуклых, а свыше 16% – вогнутых пламен. При концентрации 16% водорода реализуется переходный режим осциллирующего пламени, характеризующегося сферической формой в малом масштабе и плоской – в масштабе сечения канала. Осцилляции пламени возбуждаются в пучностях стоячей акустической волны под действием периодического энерговыделения в пламени. Синхронная эволюция сферических очагов пламени формируют очевидный механизм осцилляции площади поверхности пламени, который объясняет периодический характер энерговыделения в пламени.

Во второй части работы экспериментально исследовалось развитие пламен под действием поля искусственной гравитации, под действием расширения в вакуум, в конфигурации трубы № 2. Управляемое разрушение лавсановой мембраны инициировало расширение газа в направлении вакуумного отсека. Показано, что пламена при $[H_2]=16\%$ наиболее чувствительны к неустойчивости Релея-Тейлора. Наложение поля искусственной гравитации резко интенсифицирует неустойчивость в этой смеси. В отсутствие волны расширения осциллирующее пламя также объясняется действием неустойчивости Релея-Тейлора.

INSTABILITIES EFFECT ON LEAN HYDROGEN-AIR FLAMES

N. B. Anikin, V. A. Simonenko, A. V. Pavlenko,
A. A. T'aktev, I. L. Bugaenko, Yu. A. Piskunov

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

In the work we investigated lean premixed hydrogen-air flames within the range of hydrogen concentrations 14–18% in a vertical tube with square cross section 138×138 mm. Pipe measuring compartment had optical windows 138×200 mm. Two tube configurations were used. Configuration #1 was a single pipe compartment 1680 mm long filled up to atmospheric pressure. On the opposite, configuration #2 included two compartments separated with a lavsan membrane one filled up to atmospheric pressure and the other was evacuated compartment 1680 and 2070 mm long, respectively.

Just before the experiment the air from the tube was pumped out and then all the pipe compartments, excepting compartments below the lavsan membrane, were refilled with the hydrogen-air mixture up to the value of the atmospheric pressure. The mixture was ignited with the spark in the bottom compartment of the tube. Shadowgraph was recorded with digital camera in

the range of frequencies from 4100 to 10 000 Hz, the visible velocity of flame and the pressure profile inside the filled compartment were measured.

In the first part of the work we experimentally investigated the flames, using tube configuration #1. When hydrogen concentration was below 16% the flame mode was convex, but when it was higher the flame mode was concave. When hydrogen concentration was 16%, transition mode took place with periodical oscillating flame having locally spherical shape and planar shape at the scale of the channel. Flame oscillations were excited in antinodes of standing acoustic wave under the influence of periodic energy release. Simultaneous evolution consisting of consecutive nucleation, grow and collapse of spherical flames determined obvious mechanism of flame area oscillation which explained periodic character of flame energy release.

In the second part of our work we experimentally investigated flame propagation under the action of artificial-G field, formed by expansion wave in vacuum. We used tube configuration #2. Controlled rupture of lagsan membrane initiated gas expansion toward vacuum compartment. It was shown that flames in mixture $[H_2]=16\%$ are the most sensitive to Rayleigh-Taylor instability. The imposition of artificial-G field strongly intensifies instability in this mixture. It is assumed that flame oscillations without expansion wave are also caused by Rayleigh-Taylor instability.

1-3

**ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМЕТ С ПЛАНЕТАМИ
НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ
ТЕОРИИ М. А. ЛАВРЕНТЬЕВА**

А. А. Баренбаум

Учреждение ФАНО Институт проблем нефти и газа РАН,
Москва Россия

E-mail: azary@mail.ru

До недавнего времени различия в физических эффектах [1], вызванных падениями высокоскоростных галактических комет на планеты земной группы с газовой оболочкой (Земля, Венера) и без нее или с очень разреженной оболочкой (Меркурий, Марс, Луна) не поддавались теоретическому объяснению. Прогресса в понимании механизма взаимодействия галактических комет с планетами, имеющими атмосферу и без нее, удалось достичь с привлечением гидродинамических моделей М. А. Лаврентьева первого приближения [2, 3]. М. А. Лаврентьев показал, что при столкновении тел со скоростями $\sim 50\text{--}100$ км/с и более развиваются столь большие давления, что можно пренебречь прочностными и пластическими свойствами среды и силами трения по сравнению с силами инерции.

Это позволяет в первом приближении рассматривать столкновение галактических комет с поверхностью планет, как взаимодействие двух идеальных несжимаемых жидкостей. В модели [2], названной нами приближением «упругого удара», энергия и импульс кометы преимущественно идут на образование кратера диаметром 10–200 км. А в модели [3], названной приближением «неупругого удара», образуется узконаправленная ударная волна, которая, замедляясь, проникает до глубин ~ 300 км, расходуя энергию кометы на испарение, плавление и нагрев пород [4].

В зависимости от сочетания ряда факторов [5] с планетами без атмосферы галактические кометы взаимодействуют по механизму упругого удара, а на планетах с атмосферой преобладает механизм неупругого удара. Вопрос о степени участия обоих механизмов в создании на планетах конкретных геологических структур нуждается в специальном изучении.

Литература

1. Баренбаум А.А. (2010) Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии. М: ЛИБРОКОМ.
2. Лаврентьев М.А. (1957) Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи математических наук. Т. 12. Вып. 4(76). С. 41-56.
3. Лаврентьев М.А. (1959) Проблема пробивания при космических скоростях // Искусственные спутники Земли. М.: Изд-во АН СССР. Вып. 3. С. 61-65.
4. Баренбаум А.А. (2013) Возможный механизм нагрева пород литосферы галактическими кометами // Уральский геологический журнал. № 1(91). С. 21–39.
5. Barenbaum A.A. (2015) On the mechanism of energy dissipation of galactic comets bombarding terrestrial planets // Journal Physics: Conf. Ser. 653 012073, doi:10.1088/1742-6596/653/1/012073

**STUDY OF MECHANISM INTERACTION
OF HIGH-SPEED GALACTIC COMETS
WITH PLANETS BASED ON THE
HYDRODYNAMIC MA LAVRENTIEV THEORY**

A. A. Barenbaum

Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: azary@mail.ru

Until recently, the differences in physical effects [1], caused by falls of high-speed galactic comets on the terrestrial planets, with a gaseous envelope (Earth, Venus) and without it or with very sparse envelope (Mercury, Mars and Moon) had not a theoretical explanation. Progress in understanding the mechanism of interaction of the galactic comets and planets, having an atmosphere and without it, was achieved with the use of hydrodynamic models MA Lavrentiev of first approximation [2, 3]. MA Lavrentiev showed that the collision of bodies with velocities of $\sim 50\text{--}100$ km/s and more are developing such great pressures, that we can neglect the strength and plastic properties of medium and friction forces in comparison with the forces of inertia.

This allows a first approximation to consider the clash of galactic comets with the planet's surface, as the interaction of two ideal incompressible fluids. Model [2], which we call approximation of «elastic impact», comet's energy and impulse in mostly go to the formation crater with a diameter of 10–200 km. And in the model [3], named us the approximation of «inelastic impact» is formed the narrowly focused shock wave that penetrates to a depth of ~300 km, expending energy of comet on evaporation, melting and heating rocks [4].

Depending on the combination of factors [5] on the planets without atmosphere, collision process occurs mainly by the mechanism elastic impact, whereas the mechanism of inelastic impact prevails on planets with atmosphere. The question of the extent of the involvement of both mechanisms in the creation on the planets of specific geological structures needs special study.

References

1. Barenbaum A.A. (2010) Galaktotsentricheskaya paradigma v geologii i astronomii. M: LIBROKOM.
2. Lavrentiev M.A. (1957) Cumulative charge and the principles of its operation // Uspekhi mate-maticheskikh nauk. Vol. 12, Вып. (76), P. 41–56.
3. Lavrentiev M.A. (1959) Problem of penetration at space velocities // Iskusstvennyye sputniki Zemli. M.: Publ. AN SSSR. Вып. 3. P.61-65.
4. Barenbaum A.A. (2013) A possible mechanism of heating lithosphere rocks by galactic comets // Ural-skiy geologicheskii zhurnal. № 1(91). P. 21–39.
5. Barenbaum A.A. On the mechanism of energy dissipation of galactic comets bombarding terrestrial planets // 2015 Journal Physics: Conf. Ser. 653 012073, doi:10.1088/1742-6596/653/1/012073

1-4

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ, СКОРОСТНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ТОРНАДО И ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

С. П. Баутин¹, Р. Е. Волков², И. Ю. Крутова³,
А. Г. Обухов⁴, О. В. Опрышко³

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

²Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

³Снежинский физико-технический институт, Снежинск, Россия

⁴Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

E-mail: ¹SBautin@usurt.ru; ²romka011090@gmail.com;

³IUKrutova@mephi.ru; ⁴aobukhov@tsogu.ru

С помощью результатов экспериментальных [1–3] и теоретических [4–6] исследований доказана ошибочность предложения не учитывать влияния вращения Земли вокруг своей оси на те течения, для которых число Россби много больше единицы.

Численно и в аналитическом виде построены решения системы уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса, моделирующие течения воздуха как в придонных частях торнадо и тропического циклона (одномерные нестационарные), так и в целом в этих потоках (трехмерные нестационарные). Все эти решения согласуются с данными натурных наблюдений за указанными природными воздушными течениями.

С использованием построенных решений установлено, что часть кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси переходит в кинетическую энергию окружного движения в исследуемых течениях. И нет другого источника энергии для создания и поддержания окружного движения в этих природных потоках.

Анализ геометрических, скоростных и энергетических характеристик рассматриваемых течений показал следующее: разрушительный характер имеют те, наблюдаемые в природе торнадо, у которых кинетическая энергия окружного движения в придонной части больше кинетической энергии радиального движения воздуха в этой части потока.

Высказаны рекомендации по практическому использованию полученных результатов [7]. В том числе по уничтожению тропических циклонов с разумными энергетическими затратами.

Литература

1. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. Торнадо. М.: Физматлит, 2011. 344 с.
2. Баутин К. В., Баутин С. П., Макаров В. Н. Экспериментальное подтверждение возможности создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса // Вестник УрГУПС. 2013. № 2(18). С. 27–33.
3. Баутин С. П., Макаров В. В. Создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса при использовании трубы двухметрового диаметра // Вестник УрГУПС. 2016. № 4 (32). С. 39–45.
4. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008. 80 с.
5. Баутин С. П., Обухов А.Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. Новосибирск: Наука, 2012. 152 с.
6. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г., Баутин К. В. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. Новосибирск: Наука, 2013. 216 с.
7. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. Проблема предсказания и уничтожения смерча // Технологии гражданской безопасности. 2016. Том 13. № 1 (47). С. 70-75.

**GEOMETRICAL, SPEED AND ENERGY
CHARACTERISTICS IN THE BOTTOM PART
OF THE TORNADOES
AND TROPICAL CYCLONES**

S. P. Bautin¹, R. E. Volkov², I. Yu. Krutova³,
A. G. Obuhov⁴, O. V. Opryshko³

¹Ural state university of railway transport,
Ekaterinburg, Russia

²Tumen state university, Tumen, Russia

³Snezisk physics-technical institute, Snezhsk, Russia

⁴Tumen industrial university, Tumen, Russia

E-mail: ¹SBautin@usurt.ru; ²romka011090@gmail.com;

³IYKrutova@mephi.ru; ⁴aobukhov@tsogu.ru

With the using the experimental results [1–3] and the theoretical results [4–6] there is the proof that the proposal is fault, which say about the value Rossbi number and the Earth's rotation.

Numerically and analytically constructed solutions of equations of gas dynamics, taking into account the action of the Coriolis force to simulate the flow of air in the bottom parts of the tornadoes and tropical cyclones (one-dimensional non-stationary), and in general in these streams (three-dimensional non-stationary). All these decisions are consistent with the data of field observations indicated natural air currents.

With the use of the solutions found that part of the kinetic energy of rotation of the Earth about its axis is converted into kinetic energy of movement in the circumferential currents investigated. And there is no other source of energy to build and maintain the district movements in these natural flows.

Analysis of geometric, speed and energy characteristics of these flows showed the following: destructive are those observed in nature tornado in which the kinetic energy of motion of the district in the bottom part of the greater kinetic energy of radial movement of air in this part of the stream.

Make recommendations for the practical use of the results [7]. Including the destruction of tropical cyclones with reasonable energy costs.

References

1. Varaksin A. Yu., Romash M. E. Kopeitsev Tornadoes. M.: Fizmatlit, 2011. 344 p.
2. Bautin S. P., Bautin K. V., Makarov V. N. Experimental prove of chance to create air flow which was twisted by Coriolis forces // Herald of USURT. 2013, № 2(18). Pp. 27-33.
3. Bautin S. P., Makarov V. V. The creation air flow of gas, which was twisted by power of Coriolis and using the tube with two meters diameter // Herald of USURT. 2016, № 4 (32). Pp. 39–45.
4. Bautin S. P. The tornadoes and the Coriolis forces. Novosibirsk: Nauka, 2008. 80 p.
5. Bautin S. P., Obuhov A. G. Mathematic modeling of destructive atmospheric vortexes. Novosibirsk: Nauka, 2012. 152 p.
6. Bautin S. P., Obuhov A. G., Krutova I. Y., Bautin K. V. Destructive atmospheric vortexes: theorems, calculations and experiments. Novosibirsk: Nauka. 2013, 216 p.

7. Bautin S. P., Obuhov A. G., Krutova I. Y. Prediction and elimination problem of tornadoes // Technology of citizens safety. 2016. Vol. 13, № 1 (47). Pp. 70–75.

1-5

**ОТКЛОНЕНИЕ АСТЕРОИДОВ
КИНЕТИЧЕСКИМ СТОЛКНОВЕНИЕМ**

М. Брук-Саял

Ливерморская национальная лаборатория
имени Э. Лоуренса, Ливермор, США

E-mail: syall@llnl.gov

Опасные астероиды могут быть отклонены, предотвращая столкновение с Землей двумя основными способами: (1) кинетическое столкновение с космическим кораблем, который движется при высокой скорости (как правило, 5–20 км/с) или (2) использование ядерного взрывного устройства (NED). Ученые из Ливерморской национальной лаборатории (LLNL) смоделировали реакцию астероида на оба метода. В то время как метод NED требует некоторых сценариев, подход с кинетическим ударником может быть эффективен для малых астероидов, когда имеется достаточно времени для предупреждения (как правило, 10 и более лет). В этом докладе мы расскажем о последних достижениях в области моделирования методом кинетического столкновения, с использованием адаптивного SPH кода. Мы рассмотрим влияние формы астероида, его состава, пористости и прочности на момент воздействия на астероид. Мы также рассмотрим, как передача импульса возрастает с увеличением скорости столкновения. Предлагаемая операция AIDA совместными усилиями NASA и ESA впервые продемонстрирует метод кинетического отклонения в 2022 году на примере двоичного астероида Didymos. Как часть рабочей группы AIDA по моделированию столкновения, мы проводим моделирования этого события (400 кг, 6 км/с) в рамках подготовки крупномасштабного сверхскоростного эксперимента.

**KINETIC IMPACT DEFLECTION
OF ASTEROIDS**

M. Bruck-Syal

Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA

E-mail: syall@llnl.gov

Hazardous asteroids can be deflected off of an Earth-impacting orbit by two main methods: (1) kinetic impact by a spacecraft traveling at high speeds (typically, 5–20 km/s) or (2) use of a Nuclear Explosive Device (NED). Researchers at LLNL model asteroid response to both methods. While the NED method is required in some scenarios, the kinetic impactor approach can be effective for smaller asteroids when deployed with

sufficient warning time (typically, 10 years or more). Here we report on recent advances in modeling the kinetic impact method, using an adaptive SPH code. We consider the effects of asteroid shape, composition, porosity, and strength on momentum transfer to the asteroid. We also consider the scaling of momentum transfer with impact velocity. The proposed AIDA mission, a joint effort between NASA and ESA, will demonstrate kinetic impact deflection for the first time in 2022, at the binary asteroid Didymos. As part of the AIDA working group for impact modeling, we are conducting many simulations of the 400-kg, 6 km/s impact event, in preparation for this large-scale hypervelocity experiment. LLNL-ABS-709817

1-6

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ УСКОРЕНИЯ ТЕЛ

П. М. Гаврилов

ФГУП «Горно-химический комбинат», Железногорск,
Россия

E-mail: gln@mcc.krasnoyarsk.su

В статье [1] рассмотрено инерционное движение и гравитационное взаимодействие двух тел во Вселенной. На основе анализа уравнения движения [2] было получено точное автомодельное решение в безразмерной форме:

$$\tilde{\mathbf{a}} = \frac{1}{\tilde{\mathbf{r}}} - \frac{1}{\tilde{\mathbf{r}}^2} \quad (1)$$

где $\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{a}/(3\mathbf{v}^2/\mathbf{r}_e)$, $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/\mathbf{r}_e$, $\mathbf{r}_e = Gm_2/3\mathbf{v}^2$.

Уравнение (1) объясняет известное «противоречие»: почему сначала происходит замедление, а затем ускорение движения одного тела относительно другого. При этом в работе [1] было показано, что никакой дополнительной энергии (так называемой «темной энергии») для придания ускорения телу (или частице) массой m_1 не требуется. Данный вывод по существу подтвердили исследователи из Оксфорда [3], которые проанализировали 740 сверхновых звезд типа Ia и поставили под сомнение существование «темной энергии», так как различие расстояний, полученных с помощью сверхновых Ia и законом Хаббла, не превышает трех сигм.

Дифференцируя (1) в точке экстремума имеем:

$$\left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{a}}}{\partial \tilde{\mathbf{r}}} \right)_{ex} = 0, \quad (2)$$

тогда

$$\tilde{\mathbf{r}}_{ex} = 2, \quad \tilde{\mathbf{a}}_{ex} = 0,25. \quad (3)$$

Кроме того определим пределы:
при $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow 0$

$$\lim_{\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow 0} \tilde{\mathbf{a}} = -\infty, \quad (4)$$

при $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow \infty$

$$\lim_{\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{a}} = 0. \quad (5)$$

Надо отметить, что $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow 0$ в следующих случаях:

а) $\mathbf{r} \rightarrow 0$;в) $\mathbf{r}_e \rightarrow \infty$, соответственно при:в.1.) $m_2 \rightarrow \infty$;в.2.) $\mathbf{v} \rightarrow 0$.

Поскольку $\mathbf{r} = \mathbf{v}t$, то случаи а) и в.2.) следует рассматривать как один, который по существу означает момент падения тела массой m_1 на другое тело массой m_2 .

Интерес представляет случай в.1.), когда $m_2 \rightarrow \infty$: по существу тело массой m_2 имеет очень высокую плотность, как «черная дыра» или нейтронная звезда, при этом значение $\tilde{\mathbf{r}} = 1$ ($\mathbf{r} = \mathbf{r}_e$) следует рассматривать как некий аналог гравитационного радиуса с разницей лишь в константе, когда тело (или частица) массой m_1 , в отличие от частицы в состоянии равномерного движения (для которой гравитационный радиус Мичелла $\mathbf{r}_g = 2Gm_2/C^2$), обладает инерцией.

Соответственно $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow \infty$ в следующих случаях:

с) $\mathbf{r} \rightarrow \infty$ д) $\mathbf{v} \rightarrow C$ (скорость света).

Из проведенного анализа следует, что уравнения механики Ньютона дают математическое описание (предсказание), наряду с теорией относительности Эйнштейна, существования «черных дыр» и нейтронных звезд с очень большой массой m_2 , при этом силы инерции позволяют телу (или частице) массой m_1 преодолеть гравитацию тела m_2 на расстоянии в 6 раз меньше, чем в случае Мичелла для частицы в состоянии равномерного движения.

Таким образом ускорение $\tilde{\mathbf{a}}$ тела (или частицы) массой m_1 при $\tilde{\mathbf{r}} > 1$ меняется слабо, достигая максимального значения немногим более нуля $\tilde{\mathbf{a}}_{ex} = 0,25$ при $\tilde{\mathbf{r}}_{ex} = 2$ и при $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow \infty$ $\tilde{\mathbf{a}} \rightarrow 0$, то есть $\mathbf{v} \rightarrow \text{const}$, что соотносится с законом Хаббла для значительных расстояний $\tilde{\mathbf{r}} \gg 1$.

Литература

1. Гаврилов П. М. Инерционное движение и гравитационное взаимодействие тел во Вселенной // Тезисы докладов, 1–56, XII Забабахинские научные чтения, 2–6 июня 2014, С. 57
2. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика, механика. – М. 1988. – Т. 1.
3. Nielsen J. T., Guffanti A., Sarkar S. Marginal evidence for cosmic acceleration from Type Ia supernovae // Nature Scientific Reports 6, Article number: 35596 (2016)

GRAVITATIONAL ACCELERATION LIMITS OF BODIES

P. M. GavriloV

Federal State Unitary Enterprise «Mining and Chemical
Combine» Zheleznogorsk, Russia

E-mail: gln@mcc.krasnoyarsk.su

In the article [1] inertial movement and gravitational interaction of two bodies within the Universe have been considered. Based on the analysis of the motion equation

a self-similar solution was obtained in a dimensionless form:

$$\tilde{\mathbf{a}} = \frac{1}{\tilde{\mathbf{r}}} - \frac{1}{\tilde{\mathbf{r}}^2}, \quad (1)$$

where $\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{a}/(3\mathbf{v}^2/\mathbf{r}_e)$, $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/\mathbf{r}_e$, $\mathbf{r}_e = Gm_2/3\mathbf{v}^2$.

The equation (1) explains the certain «contradiction»: why firstly the deceleration occurs followed by the acceleration of one body relatively to another one. Meanwhile it was indicated in the study [1] that no any additional energy (the so-called «dark energy») is required to impart acceleration to a body (or a particle) with the weight m_1 . That conclusion was inherently confirmed by Oxford researchers [3], who had analyzed 740 type Ia supernovae and queried the existence of the «dark energy», as the difference between distances obtained with Ia supernovae and the Hubble law does not exceed three sigmae.

Differentiating (1) in the point of the extremum we have:

$$\left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{a}}}{\partial \tilde{\mathbf{r}}}\right)_{ex} = 0, \quad (2)$$

then

$$\tilde{\mathbf{r}}_{ex} = 2, \quad \tilde{\mathbf{a}}_{ex} = 0,25. \quad (3)$$

Besides we define the limits:

by $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow 0$

$$\lim_{\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow 0} \tilde{\mathbf{a}} = -\infty, \quad (4)$$

by $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow \infty$

$$\lim_{\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{a}} = 0. \quad (5)$$

It should be mentioned that $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow 0$ in the following cases:

a) $\mathbf{r} \rightarrow 0$;

b) $\mathbf{r}_e \rightarrow \infty$, respectively by:

b.1.) $m_2 \rightarrow \infty$;

b.2.) $\mathbf{v} \rightarrow 0$.

Since $\mathbf{v} = \mathbf{v}t$, then the cases a) and b.2.) should be considered as the one, which in fact means the moment when a body with the weight m_1 falls onto another body with the weight m_2 .

The case of b.1.) is of interest, when $m_2 \rightarrow \infty$: in fact the body with the weight m_2 has a very high density, as a collapsar or neutron star, meanwhile the value $\tilde{\mathbf{r}} = 1$ ($\mathbf{r} = \mathbf{r}_e$) should be considered as a certain counterpart of gravitational radius with difference only in the constant when a body (or a particle) with the weight m_1 , as opposed to a uniformly moving particle (with Michell's gravitational radius $\mathbf{r}_g = 2Gm_2/C^2$) has the inertia.

Conformably $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow \infty$ in the following cases:

c) $\mathbf{r} \rightarrow \infty$

d) $\mathbf{v} \rightarrow C$ (light speed).

The analysis carried out is followed by a conclusion that along with Einstein's relativity theory the Newton's motion equations give mathematical description (prediction) of collapsars and neutron stars existing with very heavy weight m_2 , meanwhile inertia forces allow the body (or a particle) with the weight m_1 overcome the body's gravitation m_2 at a distance 6 times shorter than in Michell's case for a uniformly moving particle.

Thus, the acceleration $\tilde{\mathbf{a}}$ of a body (or a particle) with the weight m_1 by $\tilde{\mathbf{r}} > 1$ changes weakly, reaching maxi-

imum value slightly over zero $\tilde{\mathbf{a}}_{ex} = 0,25$ by $\tilde{\mathbf{r}}_{ex} = 2$ and by $\tilde{\mathbf{r}} \rightarrow \infty$ $\tilde{\mathbf{a}} \rightarrow 0$, i. e. $\mathbf{v} \rightarrow \text{const}$, which is correlated with the Hubble law for considerable distances $\tilde{\mathbf{r}} \gg 1$.

References

1. Gavrilov P. M. Inertial movement and gravitational interaction of bodies within the Universe // Abstracts of the reports, 1–56, XII Zababakhin's scientific readings, June 2–6, 2014, Page 57
2. «Course of Theoretical Physics» by Lev Landau and Evgeny Lifshitz. – Moscow. 1988. – vol. 1.
3. Nielsen J. T., Guffanti A., Sarkar S. Marginal evidence for cosmic acceleration from Type Ia supernovae // Nature Scientific Reports 6, Article number: 35596 (2016)

1-7

ИНИЦИИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРОМ МИКРО-ВЗРЫВ, ЗАКЛЮЧЕННЫЙ ВНУТРИ ПРОЗРАЧНОГО КРИСТАЛЛА: НОВЫЙ МЕТОД ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ, ПРЕВЫШАЮЩИХ 10 МЕГАБАР

Е. Г. Гамалий, А. В. Роде

Центр Лазерной Физики, Исследовательская Школа
Физики и Инженерного дела, Австралийский
Национальный Университет, Канберра АСТ, 0200,
Австралия

Единый лазерный импульс, остро сфокусированный внутри прозрачного кристалла, создает в фокальном объеме размером менее кубического микрона плотность энергии более чем 10^6 Дж/см³, превращая вещество в плазму в течение нескольких фемтосекунд. Давление более 10 мегабар, намного превышающее прочность любого материала, генерирует сильную ударную волну и волну разрежения. В результате формируется полость диаметром 200–300 нанометров, окруженная оболочкой ударно сжатого вещества внутри неповрежденного кристалла. Зона, подвергнутая лазерному воздействию внутри кристалла, была раскрыта при помощи сфокусированного ионного пучка. Размер полости и сжатой оболочки были измерены при помощи сканирующего и трансмиссионного электронных микроскопов. Анализ зависимости измеренных размера полости и ударно сжатой области от вложенной энергии показывает, что экспериментальные результаты могут быть описаны на основе законов сохранения массы и энергии и смоделированы при помощи плазменной гидродинамики. Ударно сжатый материал, испытавший рекордно быстрый нагрев и охлаждение со скоростью 10^{18} Кельвин/сек, остается внутри неповрежденного кристалла пригодным для дальнейшего исследования [1, 2].

Структура сапфира, подвергнутого действию высокого давления, была изучена при помощи дифракции рентгеновского пучка, что позволило открыть ранее неизвестную форму алюминия, [3]. Изучение

электронной диффракции в кремнии, подвергнутом действию микро-взрыва, позволило открыть новые тетрагональные полиморфы кремния [4]. Эти работы продемонстрировали, что лазерный микро-взрыв может быть способом синтеза новых материалов на лабораторном столе. В докладе приводится обзор работ в этой области за последнее десятилетие и обсуждаются новые направления, в частности возможности использования Бесселевых пучков, которые обещают, как следует из опытов, значительное увеличение массы материала, подвергнутого высокому давлению [5].

Литература

1. Juodkazis, S. et al. Laser-induced micro-explosion confined in the bulk of a sapphire crystal: Evidence of multimegabar pressures. *Phys. Rev. Lett.* 96, 166101 (2006).
2. Gamaly, E. G. et al. Laser-matter interaction in the bulk of a transparent solid: Confined micro-explosion and void formation. *Phys. Rev. B* 73, 214101 (2006).
3. A. Vailionis et al, Evidence of superdense aluminum synthesized by ultrafast micro-explosion, *Nat. Communications* 2, 445 (2011).
4. L. Rapp et al, Experimental evidence of new tetragonal polymorphs of silicon formed through ultrafast laser-induced confined micro-explosion, *Nat. Communications* 6 7555 (2015).
5. L. Rapp, et al, High aspect ratio micro-explosions in the bulk of sapphire generated by femtosecond Bessel beams, *Scientific Reports* | 6:34286 | DOI: 10.1038/srep34286.

LASER-INDUCED MICRO-EXPLOSION CONFINED IN THE BULK OF A TRANSPARENT CRYSTAL: NEW TOOL FOR FORMATION OF NOVEL HIGH-PRESSURE MATERIALS AT MULTI-MEGABAR PRESSURES

E. G. Gamaly, A. V. Rode

Laser Physics Centre, Research School of Physics and
Engineering, The Australian National University, Canberra
ACT 0200, Australia

The single femtosecond laser pulse tightly focused inside a transparent crystal creates energy density of a few MJ/cm³ converting material within the less than cubic micron absorbing volume into plasma in a few femtoseconds. A pressure in excess of 10 megabars, far exceeding the strength of any material, generates strong shock and rarefaction waves. This results in the formation of void with a diameter of a few hundred nanometers surrounded by a shell of shock-affected compressed material inside undamaged crystal. Shock-affected material, subjected to record heating and cooling rates of 10¹⁸ K/s, remains confined inside a pristine crystal available for the further studies. The laser-affected zone enclosed inside pristine crystal was opened by Focused Ion-beam milling. The size of the voids and the compressed-shell thickness were measured using transmission and scanning electron microscopes (TEM & SEM). Analysis of the size of the void and the shock-affected zone versus the deposited energy shows that the experimental results can be under-

stood on the basis of conservation laws and be modelled by plasma hydrodynamics [1, 2]. The structure of shock-affected sapphire, α -Al₂O₃, was studied by x-ray diffraction, which allowed uncovering previously unknown high-pressure phases of bcc-aluminium [3]. The electron diffraction studies of micro-explosion in silicon allowed discovering new tetragonal polymorph silicon phases [4]. It was demonstrated that laser-induced micro-explosions is a novel method for the synthesis of high-pressure phases of materials in tabletop laboratory conditions. In this talk the overview of these studies during the past decade is presented, and the future directions are discussed, in particular the use of the Bessel beams allegedly allowing producing tens time larger amounts of high-pressure affected material [5].

References

1. Juodkazis, S. et al. Laser-induced micro-explosion confined in the bulk of a sapphire crystal: Evidence of multimegabar pressures. *Phys. Rev. Lett.* 96, 166101 (2006).
2. Gamaly, E. G. et al. Laser-matter interaction in the bulk of a transparent solid: Confined micro-explosion and void formation. *Phys. Rev. B* 73, 214101 (2006).
3. A. Vailionis et al, Evidence of superdense aluminum synthesized by ultrafast micro-explosion, *Nat. Communications* 2, 445 (2011).
4. L. Rapp et al, Experimental evidence of new tetragonal polymorphs of silicon formed through ultrafast laser-induced confined micro-explosion, *Nat. Communications* 6 7555 (2015).
5. L. Rapp, et al, High aspect ratio micro-explosions in the bulk of sapphire generated by femtosecond Bessel beams, *Scientific Reports* | 6:34286 | DOI: 10.1038/srep34286.

1-8

РЭЛЕЙ-ТЕЙЛОРОВСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЛАЙНЕРОВ

С. Ф. Гаранин, А. М. Буйко, В. Б. Якубов

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

E-mail: sfgar@yandex.ru

Приложенные к лайнеру высокие магнитные давления могут обеспечить его разгон (имплозию) до больших скоростей, что представляет интерес для многих научных и технических приложений, таких как создание сильных ударных волн, совершение работы, производимой над магнитным полем (и генерации тем самым сильных магнитных полей), сжатие замагниченной плазмы и увеличение ее внутренней энергии, безударное сжатие вещества. Поскольку плотность энергии, получаемая при имплозии лайнера, определяется их скоростью и плотностью, важно иметь также высокую плотность лайнера, что можно обеспечить, если в процессе имплозии лайнер оста-

нется в конденсированном состоянии, так как при испарении и переходе лайнера в плазменное состояние его плотность может уменьшиться на несколько порядков.

При разгоне лайнера могут развиваться неустойчивости, приводящие к искажению его формы и росту неоднородности, что может ухудшить условия для его использования, или даже полностью его разрушить. Из потенциально опасных неустойчивостей можно выделить неустойчивости, возникающие при взаимодействии лайнера с токопроводящими стенками, и Рэлей-Тейлоровскую (РТ) неустойчивость, возникающую, когда низкоплотное вещество ускоряет более плотное, например, когда магнитное поле (вещество с нулевой плотностью) ускоряет плотный лайнер, или когда плотный лайнер сжимает магнитное поле или низкоплотную плазму. Родственной РТ неустойчивости является сосисочная неустойчивость, возникающая из-за кривизны силовых линий азимутального магнитного поля, которое часто используется при имплозии лайнеров. Эта неустойчивость также может играть некоторую роль в росте возмущений лайнера.

Для изучения развития РТ неустойчивостей используются различные методы. В случае малых возмущений допустим линейный анализ. Упрощения возможны также при исследовании специальных случаев и геометрий, таких как развитие периодических возмущений и локальных возмущений. Однако в реальных турбулентных случаях эффективным методом изучения развития неустойчивостей являются магнитогидродинамические расчеты.

Эксперименты показывают, что даже близкие условия лайнерной имплозии могут приводить к сильно различающимся состояниям лайнеров. Двумерные численные расчеты разгона лайнеров позволяют описать результаты таких экспериментов.

В работе рассмотрены также некоторые возможности ослабления развития РТ-неустойчивостей, такие как магнитная стабилизация, уменьшение отношения радиуса лайнера к его толщине и нанесение на лайнер периодических возмущений.

RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY OF HIGH-VELOCITY CONDENSED-MATTER LINERS

S. F. Garanin, A. M. Buyko, V. B. Yakubov

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

E-mail: sfgar@yandex.ru

High magnetic pressures applied to a liner can drive it to high implosion velocities, which is of interest for numerous scientific and engineering applications, including generation of strong shock waves, performance of work on the magnetic field (and, in so doing, generation of high magnetic fields), compression of magnetized plasma and augmentation of its internal energy, and shockless compression of matter. Since the energy density achieved by

the liner implosion is determined by the velocity and density of the liner, it is important to ensure that the liner also has high density, which can be reached if the liner preserves its condensed state during implosion, because its density can decrease several orders as the liner evaporates and converts into plasma.

Liner acceleration can be accompanied by instabilities distorting the liner's shape and causing its growing non-uniformity, which can impair its performance or even completely destroy the liner. Among the potentially destructive instabilities one can distinguish those resulting from the interaction between the liner and the current-conducting walls and the Rayleigh-Taylor (RT) instability, which occurs when a low-density material drives a higher-density one, for example, when a magnetic field (zero-density matter) drives a dense liner, or when a dense liner compresses a magnetic field or low-density plasma. Related to the RT instability is the sausage instability caused by the curvature of streamlines of an azimuthal magnetic field, which is often used to drive liners in the z-pinch geometry. This instability can play a certain role in the growth of liner perturbations.

Different approaches are used to study the development of RT instabilities. In a simple case of small perturbations one can use linear analysis. Simplifications are also possible when studying special cases and geometries, like the development of periodic and local perturbations. However, in real cases, magnetohydrodynamic simulations represent an efficient tool for studying the development of instabilities.

Experiments show that even close drive conditions may lead to disparate liner states. Two-dimensional numerical simulations of the liner implosion allow describing results of such experiments.

The work considers also some RT instabilities mitigation approaches including magnetic stabilization, reducing the ratio of the liner radius to its thickness, and liner machining to produce periodic perturbations of a certain wavelength.

1-9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРНИКОВ

А. В. Герасимов

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

E-mail: ger@mail.tomsknet.ru

Проблема защиты конструкций от интенсивных динамических нагрузок имеет важное значение в силу постоянного совершенствования средств ударно-волнового воздействия на защищаемые объекты. Возможны следующие подходы к снижению нагрузки, действующей на элементы конструкции: растяжение импульса давления в слоистой прокладке за счет мно-

гократного отражения волн от слоев с различными акустическими импедансами и диссипация энергии импульса давления при пластическом деформировании высокопористых прокладок или дробления керамических материалов. Наиболее эффективным является использование в качестве защитных слоев в слоистых системах пористых и функционально-градиентных материалов. Материалы с непрерывным изменением физико-механических характеристик в определенных направлениях являются предельным случаем материалов, состоящих из дискретно непрерывных слоев с нарастающими или убывающими величинами акустических импедансов при увеличении числа слоев. Одним из параметров, изменяющимся в выбранном направлении, может являться пористость защитного слоя. Такие материалы называются функционально-градиентными материалами. Они характеризуются непрерывным изменением состава в заданном направлении и являются смесевыми, изменение концентрации компонент которых по пространственной координате происходит по определенному закону. Одним из распространенных способов защиты объектов является использование материалов с высокими физико-механическими свойствами, типа керамики и композитов на ее основе. Следует отметить, что кроме использования в защитных системах высоких физико-механических свойств и особенностей структуры материалов есть ряд конструктивных приемов, повышающих защиту наземных и космических объектов. Одним из таких способов противодействия высокоскоростным ударникам и защиты наземных объектов является метание навстречу ударникам разнесенных систем пластин и стержней из традиционных и композитных материалов. В результате интенсивного динамического взаимодействия происходит деформирование и частичное разрушение ударников, а также отклонение их от линии соударения. Вследствие этого ударник либо рикошетирует от поверхности преграды, либо отклоняется от защищаемого объекта и не взаимодействует с преградой. Все эти факторы снижают проникающую способность ударников и уменьшают вероятность пробития корпуса защищаемого объекта.

Полностью экспериментальная отработка конструкций зачастую требует повышенных финансовых и ресурсных расходов, поэтому современным подходом к решению таких задач является численное моделирование процессов интенсивного динамического взаимодействия твердых тел с последующей экспериментальной верификацией полученных результатов. Численное моделирование позволяет получить пространственно-временную картину изменения различных величин, характеризующих напряженно-деформированное состояние исследуемых тел, а также картину их разрушения. Следует отметить, что в эксперименте можно получить, в основном, размер осколков, степень их разрушения, скорость осколков. Проследить весь процесс деформирования, зарождение и слияние микродефектов, образование трещин, формирование фрагментов разрушаемого объекта в различные мо-

менты времени возможно только в численном эксперименте.

Задача защиты пилотируемых и автоматических аппаратов для исследования околоземного и дальнего космического пространства имеет свои особенности и приобретает в настоящее время все большее значение в связи с увеличивающейся продолжительностью полетов указанных объектов, что приводит к повышению вероятности столкновения последних с частицами космических тел и техногенными осколками, образовавшимися в результате разрушения орбитальных конструкций. Один из способов защиты состоит в том, что перед защищаемой стенкой устанавливается экран для распределения импульса фрагментов ударника по большей площади защищаемой стенки за счет разрушения ударника и последующего бокового разлета его фрагментов при высокоскоростном ударе об экран. Это позволяет достичь необходимой степени защиты заданном интервале скоростей соударения без неприемлемого увеличения веса космического аппарата (КА). Привлечение к исследованию данной проблемы современных компьютеров и численных методов, позволяющих решать задачи высокоскоростного соударения в трехмерной постановке с учетом фрагментации ударников и защитных элементов конструкции КА, представляется актуальной и практически важной задачей. Следует отметить, что проблема снижения массы защитных элементов КА при сохранении их эффективности по-прежнему остается актуальной. Одним из перспективных направлений решения данной задачи является использование сеточных экранов и комбинаций сплошных и сеточных экранов. Для случая удлиненных высокоскоростных ударников в работе исследуется взаимодействие последних с метаемыми им навстречу кластерами пластин и стержней. Деформация и разрушение ударников при интенсивном динамическом взаимодействии с пластинами снижает их проникающую способность.

NUMERICAL SIMULATION OF PROTECTION OF SPACECRAFT AND GROUND FACILITIES FROM HIGH-SPEED PROJECTILES

A. V. Gerasimov

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

The problem of protecting structures from the intense dynamic loads is important due to the constant improvement of the means of shock-wave effects on the protected objects. One of the common ways to protect the objects is to use materials with high physical and mechanical properties, such as ceramics and composites on its basis. It should be noted that in addition to the use of protective systems, high physical and mechanical properties of materials and features of the structure has a number of design techniques to increase protection of ground and space objects. One way to counter high shock-workers

and the protection of ground objects is throwing towards strikers spaced systems of plates and rods of traditional and composite materials. As a result of intensive dynamic interaction occurs deformation and partial destruction of strikers, as well as their deviation from the line of impact. As a result, the strikers or ricochets off the surface of the barrier, or deviates from the object to be protected and does not interact with the barrier. All of these factors reduce the penetration projectiles and reduce the likelihood of breaking the body of the protected object. In the case of elongated high-speed projectiles in the paper the last interaction with throwing to meet them clusters of plates and rods. Deformation and fracture of strikers at intensive dynamic interaction with plates reducing their penetrating power. Fully experimental development structures often requires high expenditure, therefore a modern approach to the solution of such problems is the numerical simulation of the dynamic interaction of intense solids, followed by experimental verification of the results. The challenge of protecting manned and unmanned spacecraft for exploration of near and far space becomes now more and more important due to the increasing duration of flight of these objects, which results in an increased probability of recent collisions with particles of cosmic bodies, and man-made fragments, formed as a result of the destruction of the orbital structures. One method of protection is that the perimeter wall is set to screen for fragments impactor momentum distribution over a larger area perimeter wall by breaking the impactor subsequent lateral expansion and fragments thereof. One of the promising ways to solve this problem is the use of mesh screens and combinations of solid and mesh screens.

1-10

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРОЯТНОЙ ОБЛАСТИ ПАДЕНИЯ АСТЕРОИДА АРОПИС НА ЗЕМЛЮ В 2036 г.

В. В. Ивашкин^{1,2}, П. Гуо¹, К. А. Стихно²

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

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: Ivashkin@keldysh.ru, 869792831@qq.com, fn2cyril@gmail.com

В работе определена и исследована вероятная зона падения астероида Аропис на Землю в 2036 г. Разработаны алгоритмы для поиска траекторий опасного астероида Аропис, пересекающих Землю в 2036 г., анализа их характеристик и точек падения астероида на Землю. Произведен поиск всего множества попадающих траекторий и нескольких его подмножеств, для каждого из которых перигейное расстояние траектории близко к некоторому фиксированному перигейному расстоянию из диапазона {2069–2100; 2500; 3000; ...; 6000; 6360; 6375} км. Определено вероятное

множество точек падения астероида на поверхность Земли, и на основе этого построена столкновительная полоса на карте мира. Исследованы характеристики этой зоны падения. Дано сравнение полученных результатов с другими работами по данной проблеме.

AN ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF THE ASTEROID APOPHIS' POSSIBLE IMPACT AREA ON THE EARTH IN 2036

V. V. Ivashkin^{1,2}, P. Guo¹, C. A. Stikhno²

¹M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia

²N. E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: Ivashkin@keldysh.ru, 869792831@qq.com, fn2cyril@gmail.com

In the paper the problem of determination and analysis of the asteroid 99942 Apophis' possible impact area on the Earth in 2036 is considered. A set of the asteroid Apophis impact trajectories and their intersection points with the Earth surface are determined. The impact area on the world map has been built, and the characteristics of this area are analyzed. A comparison of our results with ones of other studies on this issue is provided.

1-11

КАТАЛОГ БОЛИДНЫХ ВЗРЫВОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С 1908 года

И. И. Амелин, В. К. Гусяков

ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: aii@omzg.sccc.ru

Среди известных типов природных катастроф наименее изученными являются болидные взрывы в атмосфере, происходящие при резком торможении и разрушении крупных космических тел. Челябинское событие 1993 года привлекло внимание к этому типу природных опасностей и привело к осознанию важности получения вероятностных оценок возникновения подобных явлений. Для получения таких оценок необходима статистика болидных взрывов за возможно более длительный период времени (десятки, а лучше сотни лет). Имеющаяся в открытом доступе база данных НАСА содержит информацию о 690 событиях с энергиями 0,1–440 Кг ТНТ, зафиксированных за период 1994–2016 г. с помощью спутниковых наблюдений за атмосферой Земли [1].

Чтобы продлить этот каталог на больший период времени, мы использовали [2], а также сведения о наиболее крупных наблюдаемых болидах на территории Азиатской части России, собранные в [3]. В результате каталог расширен на временной период 1908–1993 г. и имеет около 750 событий. Анализ показал, что за данный

период времени наиболее масштабные события с кинетической энергией более 100 Кт TNT зафиксированы наземными наблюдениями (Тунгуска, Рио-Курука, Гвиана и др.). В большинстве подобных случаев зафиксированы механические и термические повреждения наземной инфраструктуры, растительного покрова. С появлением глобальной инфразвуковой сети станций, специализированных болидных сетей, космических средств регистрации, объем данных о болидных взрывах существенно вырос за счет фиксации событий с малой энергией (0,1–1 Кт TNT) и охвата труднодоступных районов, которые дают основной вклад в число регистрируемых болидных взрывов в атмосфере Земли. На основе анализа содержания каталога предложена энергетическая шкала, характеризующая степень опасности конкретного события, которую можно использовать для прогноза возможных разрушений наземной инфраструктуры.

Литература

1. NASA. Fireball and Bolide Reports <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>
2. Observed Impact Events (over 0.1 kilotons) compiled by Wm. Robert Johnston <http://www.johnstonsarchive.net/astro/impacts.html>
3. Крупнейшие зарегистрированные и предполагаемые болидные взрывы на территории Азиатской части России за последние 100 лет http://tsun.sccc.ru/nh/russian_bolides_data.html

CATALOG OF BOLIDE EXPLOSIONS IN THE EARTH ATMOSPHERE SINCE 1908

I. I. Amelin, V. K. Gusiakov

ICMMG SD RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: aii@omzg.sccc.ru

Among the known types of natural disasters, ones of the least studied are the atmospheric fireball explosions, occurring during the fast deceleration and destruction of large cosmic bodies in the Earth atmosphere. The 1993 Chelyabinsk meteoritic explosion drew the attention to this type of natural hazard and led to the realization of the importance of obtaining probabilistic estimates of the occurrence of such phenomena. For such evaluations, the statistics fireball explosions for the longest possible period (tens or hundreds of years) is needed. Publicly available NASA database contains information on 690 explosive events with energies 0.1–440 Kt TNT recorded for the period 1994–2016, obtained by the satellite observations of the Earth's atmosphere [1].

To extend this catalog for a longer period of time, we used [2], as well as information about the largest observed fireballs in the Asian part of Russia, gathered in [3]. As a result, the catalog expanded to the time period of 1908–1993 and contains about 750 explosive events. The analysis of its content shows that during this period several large-scale (with a kinetic energy of more than 100 Kt TNT) explosive events occurred above the Earth continents (Tunguska, Rio Kuruk, Guiana and others.). In such events, mechanical and thermal damage to the ter-

restrial infrastructure and vegetation were observed and documented. With the advent of a global network of infrasound stations, specialized networks for fireball monitoring, satellite-based registration tools, the amount of data on atmospheric explosions significantly increased due to recording of events with low energy (0.1–1 Kt TNT) and reach remote areas that contribute most to the number of registered fireball explosions in the Earth's atmosphere. On the basis of the analysis of the catalog content, the energy scale characterizing the severity of a particular event was proposed. This scale can be used for predicting possible destruction of terrestrial infrastructure resulted from the large fireball explosions.

References

1. NASA. Fireball and Bolide Reports <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/> Дата обращения 10.12.2016.
2. Observed Impact Events (over 0.1 kilotons) compiled by Wm. Robert Johnston <http://www.johnstonsarchive.net/astro/impacts.html> Дата обращения 10.12.2016.
3. Largest registered and proposed bolide explosions on the Asian part of Russia during the last 100 years http://tsun.sccc.ru/nh/russian_bolides_data.html Last access 18.01.2017.

1-12

ОТКЛОНЕНИЕ АСТЕРОИДОВ С ПОМОЩЬЮ ЯДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АСТЕРОИДОВ

Д. С. Дерборн

Ливерморская национальная лаборатория
имени Э. Лоуренса, Ливермор, США

E-mail: dearborn2@llnl.gov

Реальными мерами реагирования при обнаружении опасного астероида (публикация Комиссии США по ядерному регулированию, 2010 г.) является использование кинетического ударника (КУ) или ядерного взрывного устройства (ЯВУ). Совместно с НАСА и Национальной администрацией по ядерной безопасности (НАЯБ) ЛЛНЛ проводит сравнительные исследования эффективности отклонения астероида данными методами, а также проводит исследования по уменьшению неопределенности при определении, достаточно ли будет одного кинетического ударника для решения поставленной задачи. Эффективность кинетического ударника зависит от его массы, частоты повторения наиболее удобного для пуска периода (пускового окна) и от скорости удара. Исследование альтернативных решений было проведено с целью оптимизации процесса «доставки» кинетической энергии (включая коэффициент усиления кинетической энергии, b) с помощью кинетического ударника. На основе этого исследования был разработан перехватывающий летательный аппарат, а именно сверхзвуковой аппарат для полета к астероиду для реагирования на

чрезвычайные ситуации (HAMMER), который может функционировать или как кинетический ударник, или как система доставки ЯВУ. И хотя по мнению США использование кинетического ударника является более предпочтительным в случае с более распространенными небольшими астероидами при достаточно раннем обнаружении, мы признаем, что применение ядерного взрывного устройства необходимо в случае с астероидом большого размера при малом времени упреждения. Здесь мы изучаем возможность использования ядерного подхода и рассматриваем важные свойства материала, от которых зависит поведение астероида. Ядерный подход рассматривается в контексте не требующих проверки нынешних технических возможностей, т. к. используемых в настоящее время и хорошо изученных устройств вполне достаточно для обеспечения мер реагирования при обнаружении самых больших известных потенциально опасных объектов. Приводятся результаты исследования компактных источников космического рентгеновского излучения с реальными спектрами, приводятся спектры черного тела, а также некоторые оценки влияния состава и результаты масштабирования.

NUCLEAR DEFLECTION AND THE PHYSICAL PROPERTIES OF ASTEROIDS

D. S. Dearborn

Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA

E-mail: dearborn2@llnl.gov

Realistic responses to the discovery of a threatening asteroid (NRC publication, 2010) include the use of a kinetic impactor (KI) or a Nuclear Explosive Device (NED). LLNL is part of an integrated study by NASA and the NNSA to compare the efficacy of deflection by these means and to reduce uncertainty in determining that a KI will suffice. The efficacy of a kinetic impactor depends on its mass, the launch window frequency and impact speed. A trade study was done to optimize the momentum deliverable (including the momentum enhancement factor, b) with a KI. Based on this study an intercept vehicle was designed, the Hypervelocity Asteroid Mission for Emergency Response (HAMMER), able to function as either a KI or a NED delivery system. While the US considers the kinetic impactor solution preferable for more common small asteroids when discovered sufficiently early, we recognize that the nuclear option is necessary when the size is large of the timescale short. Here we examine nuclear approach and consider the important material properties that affect the asteroid response. The nuclear approach is considered within the context of current capabilities, posing no need to test, as extant and well-understood devices are sufficient for the largest known Potentially Hazardous Objects (PHOs). Results of X-ray sources with realistic spectra as well as black body spectra are given, along with some assessment on composition dependence, and results scaling. LLNL-ABS-711503

1-13

ЧАСТОТА ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ И БОЛИДОВ

А. Е. Дудоров, О. В. Еретнова

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

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

Представлены статистические распределения по годам, месяцам года и времени суток для 909 метеоритов, падения которых зарегистрированы с 1860 по 2015 гг. Сведения о них взяты из Catalogue of Meteorites [1] и из Meteoritical Bulletin Database [2]. Исследовано распределение числа падений метеоритов по годам автокорреляционным методом. Подтверждено наличие 10–11 летней периодичности для группы Н-хондритов, железных и железокосменных метеоритов, выявленное ранее В. А. Алексеевым для Н-хондритов [3]. Этот период коррелирует с 11-летними вариациями числа солнечных пятен. Среднее число регистрируемых падений метеоритов невелико (6–7 в год), что затрудняет выявление периодичности. Среднее число падений болидов в год, регистрируемых спутниками и инфразвуковыми станциями, более чем в 4 раза превышает среднее число метеоритов. Данные о 635 болидах с 1995 г. приведены на сайте NASA [4]. Анализ распределения числа падений болидов по годам позволят предположить, что максимумы числа падений болидов чередуются с интервалом 11–12 лет. Возможно, в годы максимумов солнечной активности секторное магнитное поле Солнца оказывает влияние на движение метеороидов и отклоняет их от первоначальных орбит.

Проведено сравнение распределений метеоритных падений по месяцам года и времени суток с аналогичными распределениями для болидов. Пятьдесят восемь процентов падений метеоритов приходится на весенне-летний период. Распределение числа болидов по месяцам года является равномерным. Наиболее вероятная причина неравномерности падений метеоритов в течение года – сезонный фактор.

Показано, что 65% падений метеоритов регистрируется с 8 до 20 часов. Отмечено, что существенно больше падений метеоритов (66%) приходится на интервал времени от полудня до полуночи. Послеполуденная анизотропия в распределении числа падений метеоритов вероятнее всего связана со специфичностью наблюдений. Для болидов такая анизотропия отсутствует. Наоборот, больше болидов наблюдается в первой половине суток.

Работа выполнена при поддержке Фонда перспективных научных исследований ФГБОУ ВО ЧелГУ (проект 5/16).

Литература

1. The Catalogue of Meteorites [Электронный ресурс] URL: <http://www.nhm.ac.uk/our-science/data/metcat/search/indexmany.dsm1>

2. Meteoritical Bulletin Database [Электронный ресурс] URL: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>
3. Алексеев, В. А. // Метеоритика. 1988. Вып. 47. С. 24–31.
4. Fireball and Bolide Reports [Электронный ресурс] URL: <http://neo.jpl.nasa.gov/fireball/>
3. Alexeev V. A. // Meteoritika, 1988, iss. 47, pp. 24–31 (In Russ.).
4. Fireball and Bolide Reports [Электронный ресурс] URL: <http://neo.jpl.nasa.gov/fireball/>

FREQUENCY OF METEORITE AND BOLIDE FALLS

A. E. Dudorov, O. V. Eretnova

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

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

We present the statistical distributions of the meteorite falls number over years, months and time of the day for 909 meteorites registered between 1860 and 2015. Data are taken from Catalogue of Meteorites [1] and from Meteoritical Bulletin Database [2]. The variation of the number of meteorite falls with time is investigated using the autocorrelation method. We confirm 10–11-year periodicity of this distribution for H-chondrites, iron and iron-stone meteorites, which was found by V. A. Alexeev for H-chondrites [3]. This period correlates with the 11-year variations of the solar spots. Mean number of the registered meteorite falls is small (6–7 in a year), that makes the investigation of the periodicity difficult. Mean number of the bolides in a year registered by satellites and infrasound stations is 4 times higher than mean number of the meteorites. Data on 635 bolides registered from 1995 are presented at the NASA site [4]. The analysis of the bolide falls distribution over years allows as to suppose that sectoral magnetic field of the Sun influences the meteoroids motion and changes their initial orbits in the years of maximal solar activity.

The distributions of meteorite falls over months and time of the day are compared with the same for the bolides. Fifty eight percent of the meteorites falls happened in the spring-summer period. The distribution of the bolide falls over months is uniform. The most probable cause of the non-uniformity of the meteorite fallings distribution during a year is the season factor.

It has been shown than 65% of meteorite falls are registered between 8 a.m. and 8 p.m. We note that most of the meteorite falls (66%) happens between midday and midnight. Afternoon anisotropy of the distribution of the meteorite falls is most probably due to the peculiarities of the observations. The bolide falls distribution over time of the day does not have such anisotropy. In most cases, the bolides are registered in the first part of the day.

This work is supported by Foundation of perspective scientific research of the Chelyabinsk State University (project 5/16).

References

1. The Catalogue of Meteorites [Электронный ресурс] URL: <http://www.nhm.ac.uk/our-science/data/metcat/search/indexmany.dsm1>
2. Meteoritical Bulletin Database [Электронный ресурс] URL: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>

1-14

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ДВОЙНЫХ АСТЕРОИДНЫХ СИСТЕМ

С. Н. Замоздра

ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,
Челябинск, Россия

E-mail: sezam@csu.ru

Среди полумиллиона известных астероидов есть 290 гравитационно связанных систем из двух и более астероидов. Среди 15 тысяч известных объектов сближающихся с Землей 59 являются двойными системами. В докладе представлены результаты численного моделирования эволюции двойной системы астероидов. Несферичность тел приводит к обмену между собственным и орбитальным моментом импульса тел. В тесных системах, состоящих из тел размером порядка 100 м, время такого обмена (от 100 лет до 10 тысяч лет) существенно меньше времени эволюции из-за ударов метеороидами (миллионы лет). У медленно вращающихся тел орбитальный момент импульса переходит в собственный, поэтому минимальное расстояние между телами уменьшается и, зачастую, после серии неупругих соударений они соединяются в одно гантелевидное тело. Уже известно 50 астероидов и 3 кометы такой формы. У быстро вращающихся тел собственный момент импульса переходит в орбитальный, поэтому система расширяется и, достигнув сферы Хилла, распадается. Вопрос о потенциальной опасности систем, склонных к распаду, пока остается открытым.

INSTABILITY OF BINARY ASTEROIDS

S. N. Zamozdra

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: sezam@csu.ru

Among half-million known asteroids there are 290 gravitationally bound systems of two and more asteroids. Among 15 thousands known near-Earth objects 59 are binary systems. In the report the results of numeric modelling of binary asteroids are presented. Asphericity of bodies causes the interchange between own and orbital angular momentum of bodies. In the close binaries that consist of bodies with the size of the order of 100 m the interchange time (from 100 years to 10 thousands years) is much less than the evolution time due to meteoroid impacts (millions years). In the case of slowly rotating bodies their orbital momentum transforms into spin, therefore

minimal distance between bodies decreases and they connect into one body of dumbbell shape. There are known 50 asteroids and 3 comets of such the shape. In the case of rapidly rotating bodies their spin transforms into orbital momentum, therefore the system expands and decays when exits Hill sphere. The question of the potential danger systems are prone to decay, still remains open.

1-15

**ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ПРИСУТСТВИИ КОСМИЧЕСКОГО
ТЕРМОСТАТА С ТЕХНИЧЕСКИМИ
ПРИЛОЖЕНИЯМИ**

М. Я. Иванов, В. К. Мамаев

Центральный институт авиационного моторостроения
имени П. И. Баранова, Москва, Россия
E-mail: ivanov@ciam.ru, mamaev@ciam.ru

Физика высокоинтенсивных процессов рассмотрена в свете экспериментальных и технических достижений последних десятилетий. В плане принципиальных экспериментальных достижений привлечены регистрация конечной ненулевой температуры свободного космического пространства и обнаружение подавляющего количества скрытой массы Вселенной. Эти экспериментальные достижения являются достаточным основанием для того, чтобы рассматривать околоземное и космическое пространства в качестве всеобъемлющего внешнего космического термостата (КТ) при равновесной температуре $T_0 = 2,73$ К. Любой тепловой, в том числе и высокоинтенсивный физический процесс, следует рассматривать с учетом теплового контакта с указанным термостатом. В плане технических приложений рассмотрен учет КТ в разработке высокотемпературных воздушно-реактивных двигателей и космических силовых установок. Выписаны общие законы сохранения массы, импульса и энергии для моделирования термодинамики излучающей среды в присутствии внешнего КТ. Это моделирование применено также к анализу скрытой термодинамики элементарных частиц.

**HIGH INTENSIVE PROCESSES
AT THE SPACE THERMOSTAT PRESENCE
WITH TECHNICAL APPLICATIONS**

М. Ja. Ivanov, V. K. Mamaev

Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia
E-mail: ivanov@ciam.ru, mamaev@ciam.ru

Physics of high intensive processes was examined at the concept of experimental and technical advances of the last decades. In terms of fundamental experimental achievements involved check the finite nonzero temperature of free space and detection of the vast amount

of hidden mass of the Universe. These experimental achievements are reason enough to consider the space as a comprehensive external space thermostat (ST) at the equilibrium temperature $T_0 = 2.73$ K, in thermal contact with whom is any of the investigated physical system. In terms of technical applications were selected impressive progress in the development of the high temperature jet engines and aerospace propulsions. There are presented the general conservation laws of mass, momentum and energy to simulate the thermodynamics of a radiating medium in the presence of the finite values of temperature and pressure. This simulation applied to the analysis of the hidden thermodynamics of elementary particles.

1-16

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ**

А. В. Ивановский

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

Одним из методов создания высокой плотности энергии при моделировании физических процессов и исследований свойств веществ является конверсия кинетической энергии высокоскоростной оболочки или лайнера. Традиционно, разгон оболочек осуществляется:

- взрывчатым веществом (ВВ) на газодинамических комплексах;
- токовым импульсом на электрофизических установках;
- излучением на лазерных установках.

Электрофизические методы исследований обеспечивают:

- по сравнению с газодинамическими комплексами более высокую точность контроля параметров и получаемых данных;
- по сравнению с лазерными установками позволяют исследовать образцы больших размеров (масштабный фактор).

Сделан обзор выполненных и планируемых экспериментов с применением взрывомагнитных генераторов (ВМГ).

В области низких удельных энергий (до ~ 10 кДж/г) представляют интерес исследования реологических свойств материи – откольной и сдвиговой прочности, процессов пыления при выходе ударной волны на поверхность и т. д. Применение ВМГ обеспечивает высокую точность контроля и воспроизведения параметров нагружения, а в ряде случаев сохранение исследуемых образцов для последующего металлографического анализа.

В промежуточной области удельной энергии (до сотен килоджоулей на грамм) интересны исследования уравнений состояния веществ (УРС) и турбулентного перемешивания. Представлен экспериментальный стенд на базе дискового ВМГ малого класса, позволяющий проводить высокоточные измерения УРС веществ (2–3%) при ударном и изэнтропическом сжатии давлением 2–3 Мбар и существенно дополнить существующие экспериментальные данные (до $10^5 g_0$) по турбулентному перемешиванию веществ при ускорениях до 10^8 – $10^9 g_0$.

Лазеры наиболее приемлемы для исследований в области высоких (более 1 МДж/г) плотностей энергии. Достигнутый уровень, генерируемой Z-пинчем энергии в рентгеновском излучении, не уступает лазерам. Однако, в силу худшей организации энергии для реализации температуры излучения в 250–300 эВ необходимо создание электрофизических установок на порядок более мощных. Для достижения с помощью ВМГ лазерных плотностей энергии необходимо обострить импульса тока до 100 нс. Реализация этой технологии позволит на базе дисковых ВМГ среднего класса создать аналог установки Z и проводить разовые опыты с применением сверхмощных ВМГ с генерацией рентгеновского излучения Z-пинча в десятки МДж.

STUDY OF PHYSICAL PROCESSES AT HIGH ENERGY DENSITIES WITH THE USE OF EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS

A. V. Ivanovskiy

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

E-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru

One of the methods to produce high energy density during modeling of physical processes and studies of material properties is to convert the kinetic energy of a high-speed shell or a liner. Traditionally, the liners are driven by:

- an explosive charge (HE) on gas-dynamic complexes;
- a current pulse on electrophysical facilities;
- radiation on laser facilities.

The electrophysical methods of research:

- provide better monitoring of parameters and obtained data in comparison with gas-dynamic complexes;
- allow studying big-size specimens (scale factor) in comparison with laser facilities.

The already realized and the planned experiments with the use of explosive magnetic generators (EMG) will be overviewed.

In the area of low specific energies (to ~10 kJ/g) of interest are the studies of the rheological properties of matter, i.e. spall and shear strength, ejecta processes at shock wave release to the surface, etc. The use of EMG ensures high accuracy of control and reproducibility of loading parameters, and in some cases the recovery

of the explored samples for further metallographic analysis.

In the intermediate region of specific energy (up to hundred kilojoules per gram) it would be interesting to investigate the equations-of-state of materials (EOS) and turbulent mixing. The paper will present the experimental test bench on the basis of a small-class disk EMG, making it possible to conduct high-precision measurements of the EOS (2–3%) at shock and isentropic compression by 2–3 Mbar pressure and to add significantly the available experimental data (to $10^5 g_0$) for turbulent mixing of substances at acceleration to 10^8 – $10^9 g_0$.

Lasers are the most appropriate tool to conduct studies in the region of high (more than 1 MJ/g) energy densities. The achieved level of energy generated by Z-pinch in the X-radiation compares well with lasers. However, in view of worse organization of energy for realization of radiation temperature of 250–300 eV it is necessary to construct one order more powerful electrophysical facilities. To achieve the laser energy densities using the EMG, it is necessary to sharpen the current pulse to 100 ns. Realization of this technology will allow creating an analogue of Z facility on the basis of middle-class disk EMGs and conducting one-shot experiments with the use of super-power EMGs and with generation of Z-pinch X-rays with energy of tens MJ.

1-17

АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ЭКСПЕДИЦИИ ЗЕМЛЯ-АПОФИС-ЗЕМЛЯ

В. В. Ивашкин^{1,2}, А. Лан²

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

²Московский государственный технический университет им. Н. Е. Баумана, Москва, Россия

E-mail: ivashkin@keldysh.ru, seatu_angel@126.com

В работе определены траектории для полета космического аппарата (КА) от Земли к астероиду Апофис, движения КА и специального мини-спутника у Апофиса и возвращения КА от Апофиса к Земле. Использована схема полета, при которой выведение КА и отлет его к астероиду с низкой околоземной орбиты ожидания производится с помощью ракеты-носителя «Союз-ФГ» и блока «Фрегат». Для последующего гелиоцентрического и приастероидного полета с коррекциями, а также маневрами торможения и разгона у Апофиса используется специальный блок с ЖРД. Определены энергетически оптимальные траектории КА для экспедиции Земля-Апофис-Земля при полете в 2019–2022 гг. с общей продолжительностью экспедиции до двух лет. Выполнен также анализ для случая использования ракет «Союз-2» и «Зенит». Сделано сравнение со случаем использования электро-ракетного двигателя малой тяги.

Проанализирована также задача движения КА вокруг астероида. При этом учтено влияние трех типов возмущений: притяжения нескольких дальних небесных тел (Солнца, Земли, Луны, Венеры и Юпитера), несферичности астероида и давления солнечного света. Учтено также собственное вращение астероида вокруг его центра масс, а также возможное затенение аппарата астероидом. Рассмотрено движение у астероида для двух возможных типов КА: основного КА, который после пребывания у Апофиса в течение недели-месяца возвращается к Земле, и специального мини-спутника с длительным пребыванием у астероида с целью высокоточного уточнения орбиты астероида. Показано, что оптимальным выбором начальных орбит КА можно обеспечить их достаточно большое «время жизни» у Апофиса. При этом можно обеспечить движение мини-спутника у Апофиса в течение нескольких лет, вплоть до тесного сближения Апофиса с Землей в 2029 г., например, с 2020 г. до 2029 г.

AN ANALYSIS OF SPACE TRAJECTORIES FOR THE EARTH-ASTEROID-EARTH MISSION

V. V. Ivashkin^{1,2}, A. Lang²

¹M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia

²N. E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: ivashkin@keldysh.ru, seatu_angel@126.com

Energy optimal trajectories for the flight to asteroid Apophis, staying there during some time and following return to the Earth are investigated in the paper. The Rocket “Soyuz-FG” and the upper stage “Fregat” are proposed to be used for the spacecraft launch into initial LEO orbit and for the escape. A special chemical engine is used for the following heliocentric corrections, and maneuvers, including the deceleration as well as the acceleration near the Apophis. There are determined optimal trajectories and their characteristics for the expedition from Earth to Apophis and back for the flights during 2019–2022 years, with the flight duration up to two years. Comparative analysis with the flight using the low thrust electric-jet engines is performed.

The Spacecraft (SC) motion around the asteroid is investigated for the main SC and for a mini-satellite taking into account three perturbations: the gravitational effects of far celestial bodies (Sun, Earth, Moon, Venus, and Jupiter), non-spherical structure of Apophis and solar radiation pressure (SRP). It was shown that it is possible to choose the orbit of the main SC and the orbit of the mini-probe for which their motions will be stable long enough. In particular, it is possible to have stable motion of the mini-probe during about several years (for instance, from 2020 till approach to the Earth in 2029).

1-18

НОВАЯ МОДЕЛЬ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА И РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Х. Ф. Валиев, А. Н. Крайко

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

E-mail: akraiko@ciam.ru

На основе решения в классической и релятивистской постановках задачи о разлете в пустоту газа, сжатого «в точку» или «почти в точку», построена новая модель Большого взрыва и расширения Вселенной.

А. Эйнштейн, пытаясь описать в рамках общей теории относительности (ОТО) стационарную Вселенную, ввел константу Λ , названную «космологической постоянной». В 1922 г. А. Фридман построил нестационарное решение ОТО с $\Lambda = 0$. В нем скалярные параметры среды – функции только времени. В 1929 г. Э. Хаббл по замерам доплеровского смещения света далеких галактик сформулировал закон, согласно которому такие галактики удаляются от нас со скоростью \mathbf{u} , пропорциональной радиусу-вектору \mathbf{r} до них: $\mathbf{u} = H(t)\mathbf{r}$ с «постоянной Хаббла» $H(t)$. Если галактики разлетаются, то, имея «подходящее» решение, можно определить, когда частицы газа, из которого потом сформировались галактики «разлетелись почти из точки». После открытия Э. Хаббла в качестве «подходящего» было взято решение А. Фридмана. Возможность такого описания расширения Вселенной не вызывала сомнений до 1998 г., когда обнаружилось его несоответствие наблюдательным данным. Для устранения этого несоответствия решение А. Фридмана было обобщено на ненулевые Λ , выбор которых позволил согласовать наблюдения с этим решением. Найденные Λ приводят к эффекту антигравитации с неизвестным носителем, названным «темной энергией». За такое открытие антигравитации в 2011 г. присуждена Нобелевская премия.

В 2015 г. авторы доклада решили в классической и релятивистской постановках задачу о разлете в пустоту газа, сжатого в точку или малую ее окрестность. В обеих постановках $\mathbf{u} = \mathbf{r}/t$, т. е. $H(t) = 1/t$. Сравнения найденного решения со всеми вариантами NASA обработки последних наблюдательных данных современными космологическими теориями (Λ CDM) с темными энергией (Λ) и материей (Cold Dark Matter) показали, что оно без привлечения эмпирических постоянных описывает наблюдения не хуже этих теорий. В свете построенного решения темная энергия излишня.

A NEW MODEL OF THE BIG BANG AND THE UNIVERSE EXPANSION

A. N. Kraiko, Kh. F. Valiyev

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

E-mail: akraiko@ciam.ru

A new model of the Big Bang and the Universe expansion is constructed. It is based on the solutions in the classical and relativistic statements of the problem of the dispersion into the void of the gas, compressed «in a point» or «almost in a point».

A. Einstein, trying to describe the stationary Universe within the general theory of relativity (GTR), has introduced a constant Λ , called a cosmological constant. A. Friedman has constructed non-stationary GTR solution with $\Lambda = 0$ in 1922. Scalar parameters of the medium in it are only functions of time. E. Hubble, measuring the Doppler shift of the remote galaxies light, formulated the law in 1929, according to which these galaxies are moving away from us with a speed \mathbf{u} , which is proportional to the radius vector \mathbf{r} to them: $\mathbf{u} = H(t)\mathbf{r}$, where $H(t)$ is Hubble constant. If the galaxies fly apart, then if we have «suitable» solution, we can determine when the gas particles, from which galaxies then were created, «scattered almost from a point». After Hubble discovery Friedman solution has been taken as «suitable». The possibility of such description of the Universe expansion did not raise doubts till 1998, when its discrepancy to the observant data was discovered. For elimination of this discrepancy, Friedman solution has been generalized to non-zero Λ , the choice of which allowed to coordinate the observations with this solution. The found Λ values lead to anti-gravity effect with unknown carrier, which is called «dark energy». For such discovery of antigravity Nobel Prize is awarded in 2011.

The authors of the present report solved in 2015 in the classical and relativistic statements the problem on dispersion into the void of the gas, which is compressed in a point or in its small vicinity. In both statements $\mathbf{u} = \mathbf{r}/t$, i.e., $H(t) = 1/t$. Comparisons of the solution obtained with all treatment options NASA recent observational data with modern cosmological theories (Λ CDM) with dark energy (Λ) and matter (Cold Dark Matter) shown that it describes better than these theories without attraction of any empirical constant. In the light of the solution obtained dark energy is unnecessary

1-19

НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЛОСКИХ СЛОЕК Е. И. ЗАБАБАХИНА

Е. А. Козлов, А. В. Красильников, Д. П. Кучко,
В. Н. Ногин, О. В. Ткачев, С. А. Бричков,
Н. С. Жилияева, О. Н. Никитин

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

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

Возможность кумуляции энергии в плоских слоеных автомодельных системах была теоретически предсказана Е. И. Забабахиным [1,2]. Рассматривалось движение плоской волны в периодической системе из тяжелых и легких газовых слоев. Было продемонстрировано, что в автомодельной газовой системе давление на фронте увеличивается в постоянное число раз на каждой паре слоев.

Экспериментальное подтверждение возможности кумуляции энергии было получено К. К. Крупниковым и А. С. Козыревым с сотрудниками [3] в опытах с плоскими слоеными системами с конечным количеством пар слоев Рb-ПММА (до 10–19 пар слоев) с использованием дискретной электроконтактной методики регистрации волновых процессов.

Развитые новые экспериментальные [4, 5] и расчетные методические возможности обуславливают целесообразность возвращения к классической задаче Е. И. Забабахина о кумуляции энергии в плоских слоеных системах.

В данной работе представлены постановки и результаты 1D- и 2D-численных расчетов, а также первые результаты взрывных и ударно-волновых экспериментов с плоскими слоеными системами с $\varepsilon_T = 0,1$ и $\varepsilon_D = 0,2$ с совмещенной многоканальной лазерно-интерферометрической и рентгенографической диагностикими волновых процессов.

При варьировании соотношения плотностей и акустических импедансов материалов тяжелого и легкого слоев, числа пар слоев в анализируемой плоской системе, режимов ее контактного взрывного или ударно-волнового нагружения рассчитаны изменения во времени профилей скорости движения зондируемых участков свободной поверхности последнего тяжелого слоя, а также – положения на несколько моментов времени (времена рентгенографирования) границ всех пластин из высокоплотного материала. Расчетно проанализировано влияние на процесс кумуляции энергии волн тыльной и боковой разгрузки.

Применение многоканальной лазерно-интерферометрической диагностики позволило получить детальную недоступную ранее для дискретной электроконтактной диагностики информацию, не только по

симметрии и динамике разгона последнего тяжелого слоя, но и тонкой структуре профиля скорости свободной поверхности.

Литература

1. Е. И. Забабахин. Ударные волны в слоистых системах, ЖЭТФ, 1965, т. 49, вып. 2 (8), с.642–647.
2. Е. И. Забабахин, И. Е. Забабахин. Явления неограниченной кумуляции, М.: Наука, 1988, 172 с.
3. А. С. Козырев, В. Е. Костылева, В. Т. Рязанов. Кумуляция ударных волн в слоистых средах, ЖЭТФ, 1969, т. 56, вып. 2, с. 427–429.
4. E. A. Kozlov, S. A. Brichikov, D. P. Kuchko, N. S. Zhilyeva, L. P. Brezgina, V. N. Povyshev. Deterministic perturbations developing on steel shells under quasi-spherical explosive loading. Investigation results using laser-interferometry and gamma-tomography. Proc. US-Russian Conference on Materials Properties at Extreme Conditions, 6 LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions (Barcelona, Spain 23–28 October 2011).
5. Е. А. Козлов, С. А. Бричиков, Д. П. Кучко, А. В. Ольховский, М. А. Ральников, О. В. Ткачев. Результаты экспериментов по разгону стальных пластин с диагностикой процессов одновременно двумя лазерно-интерферометрическими методиками. ФГВ, № 6, 2014, с. 114–121.

NEW EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION METHODIC CAPABILITIES TO STUDY ZABABAKHIN'S PLANE STRATIFIED STRUCTURES

E. A. Kozlov, A. V. Krasilnikov, D. P. Kuchko,
V. N. Nogin, O. V. Tkachev, S. A. Brichikov,
N. S. Zhilyaeva, O. A. Nikitin

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

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

Feasibility of energy cumulation in plane stratified self-similar systems was theoretically predicted by E. I. Zababakhin [1, 2], when he considered the plane-wave movement in the periodic system of heavy and light gaseous layers. In the self-similar gas-system, pressure at the front was demonstrated to increase constant number of times at each pair of layers.

K. K. Krupnikov and A. S. Kozyrev et al. [3] experimentally confirmed feasibility of energy cumulation in experiments with plane stratified structures having finite number of Pb-PMMA pairs, i.e. up to 10–19 pairs of layers. The discrete electrical contact technique was used to register wave processes.

Newly developed experimental [4,5] and numerical simulation methodic capabilities make it reasonable to go back to E. I. Zababakhin's classical problem on the energy cumulation in plane stratified systems.

This paper presents experimental setups and results of 1D-, and 2D-calculations, as well as the first results of explosive and shock-wave experiments involving plane stratified systems with $\varepsilon_H = 0.1$ and $\varepsilon_L = 0.2$. These experi-

mental setups used the multi-channel laser-interferometric diagnostics of wave processes in combination with the X-ray radiography technique.

Density ratios and also ratios of acoustic impedances of materials for heavy and light layers, the number of layer pairs in a considered plane system, the number of modes of its contact-explosive or shock-wave loading were varied to calculate temporal changes in velocity profiles for the analyzed zones of the free surface in the last heavy layer, as well as changes in the position of boundaries of all high-density material plates for several times, i. e. for X-ray radiography instants. The effect of the side and rear release on the energy cumulation process was mathematically analyzed.

The multi-channel laser-interferometric diagnostics gave the detailed data, previously unmanageable with the discrete electro-contact diagnostics, not only on the symmetry and dynamics of the last heavy layer velocity, but also on the thin structure of the free-surface velocity profile.

References

1. E. I. Zababakhin. Shock waves in stratified structures, Journal of Experimental and Theoretical Physics (ZhETF), 1965, V. 49, issue 2(8), pp. 642–647. (in Russian)
2. E. I. Zababakhin., I. E. Zababakhin. Phenomena of Unlimited Cumulation (M.: Nauka, 1988), p.172 (in Russian)
3. A. S. Kozyrev, V. E. Kostyleva, V. T. Ryazanov. Cumulation of shock wave in stratified media, Journal of Experimental and Theoretical Physics (ZhETF), 1969, V. 56, issue 2, pp. 427–429. (in Russian)
4. E. A. Kozlov, S. A. Brichikov, D. P. Kuchko, N. S. Zhilyeva, L. P. Brezgina, V. N. Povyshev. Deterministic perturbations developing on steel shells under quasi-spherical explosive loading. Investigation results using laser-interferometry and gamma-tomography. Proc. US-Russian Conference on Materials Properties at Extreme Conditions, 6 LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions (Barcelona, Spain 23–28 October 2011) (in Russian)
5. E. A. Kozlov, S. A. Brichikov, D. P. Kuchko, A. V. Ol'khovsky, M. A. Ral'nikov, O. V. Tkachev. Experimental Investigation of Acceleration of Steel Plates Using Simultaneously Two Laser Interferometric Techniques, Combustion Explosion, and Shock Waves, 2014, v. 50, No 6, pp. 725–731. (in Russian)

1-20

**ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ
ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ
ШАРОВ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ
ИНИЦИИРОВАННИИ СЛОЯ ВВ.
ВЗРЫВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ
И РАСЧЕТНЫЕ ПРОГНОЗЫ ПО ДВУМЕРНОЙ
ПРОГРАММЕ МЕЧ**

Е. А. Козлов, М. Е. Васильев, В. П. Елсуков,
П. Е. Кискин, Д. А. Краснослабодцев, В. Н. Ногин

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

Осесимметричные постановки взрывных экспериментов дают важную тестовую информацию для проверки и калибровки современных прочностных упруго-вязко-пластических моделей конструкционных материалов, критериев их сдвиговых и откольных повреждений, а также – верификации и сертификации различных двумерных программных комплексов. В дополнение к [1], в данной работе представлены постановки двух взрывных экспериментов с шарами из стали 30ХГСА и 12Х18Н10Т, диаметром 60 мм, претерпевшими нагужение детонацией слоя октоген-содержащего ВВ толщиной 10 мм при его инициировании в одной точке и по одной из полусферической поверхности с наружным радиусом 40 мм. Для обеспечения сохранности образцов вся система помещалась в массивный корпус из стали или чугуна. Исследование сохраненных образцов показало, что способ подрыва ВВ существенно влияет на кумуляцию энергии и характер разрушения образцов. По двумерной программе МЕЧ [2] с привлечением различных упруго-вязко-пластических моделей и критериев откольных и сдвиговых разрушений проведено численное моделирование высокоскоростной деформации и разрушения образцов. Получено хорошее согласие формы и размеров расчетно прогнозируемых экспериментально наблюдаемых зон повреждений в шарах из стали 30ХГСА и 12Х18Н10Т.

Литература

1. Е. А. Козлов, А. Т. Сапожников, Н. С. Жилаева и др. Взрывные эксперименты в осесимметричной постановке в интересах верификации моделей сдвиговой и откольной прочности металлов и сплавов (Памяти В. А. Быченкова). XI Забабахинские научные чтения, 2012.
2. Е. Н. Аврорин, Н. Н. Анучина, В. В. Гаджиева, В. П. Елсуков, Б. П. Мордвинов. Численное моделирование взаимодействия частиц кометы Галлея с космическим аппаратом. Препринт ИПМ имени Келдыша, № 177, 1985.

**HIGH-RATE STRAIN AND FRACTURE
RESPONSE OF STEEL TO AXIALLY
SYMMETRIC HE DETONATION:
EXPERIMENTAL RESULTS AND PREDICTIONS
BY MECH CODE**

E. A. Kozlov, M. E. Vasiliev, V. P. Elsukov, P. E. Kiskin,
D. A. Krasnoslabodtsev, V. N. Nogin

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

The axially symmetric detonation experiments give valuable information for the verification and normalization of current elastic-viscous-plastic strength models for structural materials and their shear and spall damage criteria, as well as for code verification and certification. The paper continues what was presented in [1] and describes two detonation experiments with the 60-mm-diam spheres of 30ХГСА and 12Х18Н10Т steel which are loaded by the detonation of a 10 mm thick HE layer initiated at one point and along one of the hemispheres with outer radius 40 mm. To allow the test samples to recover, the entire system is placed into a steel or carbon steel case. The investigation of recovered samples shows the mode of HE initiation to be of a strong effect on energy cumulation and fracture pattern. High-rate straining and fracturing of the samples was simulated using a 2D code MECH [2] and different elastic-viscous-plastic models, and shear and spall damage criteria. The predicted shapes and size of damaged zones agree well with experimental evidence.

References

1. E. A. Kozlov, A. T. Sapozhnikov, N. S. Zhilyaeva et al. Axially symmetric detonation experiments for the verification of shear and spall strength models for metals and alloys. Zababakhin Scientific Talks – 2012.
2. E. N. Avrorin, N. N. Anuchina, V. V. Gadzhieva, V. P. Elsukov, and B. P. Mordvinov, Numerical simulation of interaction between Halley comet particles and a space craft. Keldysh Applied Mathematics Institute Preprint 177, 1985.

1-21

**ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ
ВДОЛЬ МИКРОСТРУЙ**

С. И. Кременко, К. А. Тен

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

E-mail: ten@hydro.nsc.ru, kremenko_stanislav@mail.ru

При сильном ударном воздействии на металлическую пластину с ее свободной поверхности выбрасывается поток частиц разных размеров (ударно-волновое «пыление»). Для исследования процесса пыления традиционно используют метод импульсной рентгенографии, метод пьезоэлектрического датчика, оптическую методику [1–5]. Диапазон размеров частиц от единиц мкм до сотен мкм. Предполагается, что в по-

токе есть и более мелкие частицы, но существующие методики их пока разрешить не могут.

Выход УВ на СП вещества приводит к развитию микровозмущений на СП металлов и последующему образованию мелкодисперсной фракции, распределенной в пространстве по размерам и скоростям. Развитие процесса роста неустойчивости на СП металла и, соответственно, характеристики пылевого облака зависят от фазового состояния материала, условий нагружения и т. д. В ИЯФ СО РАН на ускорительном комплексе ВЭПП-3–ВЭПП-4 построены две станции для исследования быстрых (в том числе взрывных) процессов. На станциях есть возможность измерять как проходящее излучение (поглощение), так и мало-угловое рентгеновское рассеяние (МУРР) синхротронного излучения (СИ). В качестве детектора используется прецизионный быстродействующий детектор DIMEX [6]. С помощью регистрации проходящего СИ были проведены исследования потоков микрочастиц со свободной поверхности из меди. Получены распределения массы вдоль микроструи образующихся из канавок микронного размера.

MEASUREMENT OF MASS DISTRIBUTION ALONG MICROJET

K. A. Ten, S. I. Kremenko

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics (LIH SB RAS),
Novosibirsk, Russia
E-mail: ten@hydro.nsc.ru, kremenko_stanislav@mail.ru

With a strong impact on the metal plate with its free surface is ejected a stream of particles of different sizes (shock wave «dusting»). To study the process of dusting traditionally used method of pulse radiography, the method of the piezoelectric sensor, optical methods [1–5]. The range of particle sizes from a few microns to hundreds of microns. It is assumed that the flow is and the smaller particles, but existing techniques are yet to solve can not.

The output of the SW JV substances leads to the development of microperturbations for SP metals and subsequent formation of fine fraction, distributed in space according to the sizes and speeds. The development of the process of growth volatility on SP metal and, accordingly, characteristics of dust clouds depends on the phase state of the material, loading conditions, etc. At BINP at the accelerator complex VEPP-3–VEPP-4 is constructed with two stations for the study of fast (including blasting) processes. Stations have the opportunity to measure both the transmitted light (absorption), and little-angle x-ray scattering (SAXS) of synchrotron radiation (SR). The detector uses precision high-speed detector DIMEX [6]. By registering the passing of SI studies have been conducted micro-particles flows with a free surface of copper. The resulting distribution of mass along microjet formed of grooves of micron size.

1-22

КУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЛАПСЕ КАВЕРН И СХОЖДЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН И ОБОЛОЧЕК

В. Ф. Куропатенко

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

E-mail: V.F.Kuropatenko@vniitf.ru

Проблемой кумуляции занимались многие ученые во всем мире. Выдающийся вклад в исследование явления кумуляции энергии внес Е. И. Забабахин. Признанием вклада Е. И. Забабахина является книга «Механика в СССР за 50 лет», М. Наука, 1970.

Сходящиеся ударные волны и оболочки подробно изучены теоретически. Первая работа по сходящейся автомодельной ударной волне была опубликована Гудерлеем в 1942 г., первая же работа о схлопывании сферического пузырька в несжимаемой идеальной жидкости была опубликована Рэлеем в 1917 году. Все эти задачи диктовались потребностями практики. В случае с фокусировкой пузырька в жидкости – это необходимость моделирования явления кавитации с целью предотвращения разрушения гребных винтов кораблей, в случае же фокусировки оболочек и ударных волн – это поиск условий, в которых устойчиво возникают и протекают термоядерные реакции.

Во всех без исключения работах кумуляцией называлось возникновение неограниченной концентрации энергии хотя бы в одной точке. Эффективность кумуляции энергии определялась отношением максимального значения удельной энергии к ее начальному значению. Совершенно в тени оставался вопрос о «коэффициенте полезного действия». Иными словами не учитывалась работа, которую нужно совершить над термодинамической системой, чтобы в ней хотя бы в одной точке возникла бесконечная концентрация энергии. Именно с такой точки зрения в данной работе рассматриваются задачи о фокусировке ударной волны в холодном газовом шаре, о фокусировке сферического пузырька в сжимаемой идеальной жидкости и о фокусировке сферических оболочек из сжимаемого материала. Опыт показывает, что для «разжигания» термоядерных реакций необходимо, чтобы большие плотности вещества и высокие температуры достигались бы не в точке, а в конечном объеме. Для исследования фокусирующихся пузырьков и оболочек построены решения, в которых в сжимаемой жидкости плотность остается постоянной. Показано, что организация такого течения возможна, если в веществе поглощается энергия проникающего излучения, заданного по определенному закону. Для фокусирующейся ударной волны построено решение системы уравнений механики сплошной среды, которое позволило определить работу, затраченную на сжатие холодного газового шара, и соотнести ее с энергией в окрестности фокусировки ударной волны.

ENERGY CUMULATION IN CAVITY COLLAPSE AND SHOCK AND SHELL CONVERGENCE

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 problem of energy cumulation has been of interest to many scientists throughout the world. A distinguished contribution to its solution was made by Evgeny I. Zababakhin and recognized in the book «Mechanics in the USSR over 50 years» published in 1970.

Convergent shocks and shells have theoretically been studied in rather detail. The first work on a convergent self-similar shock was published by Guderley in 1942 while the first work on bubble collapse in incompressible ideal fluid was published by Rayleigh in 1917. They were a response to actual need. Bubble collapse needed solution to prevent ship propellers from failure due to cavitation. The study of convergent shocks and shells was aimed at finding conditions where thermonuclear reactions proceed.

In every one of the works, cumulation is treated as unlimited energy concentration at one point at least. The efficiency of energy cumulation is defined by the ratio of maximal to initial specific energy. But still lives in the shadow the coefficient of efficiency or the work to be done on a thermodynamic system at rest to make it unlimitedly concentrate energy at least in one point. Just in this context the paper considers shock convergence in a cold gas sphere, bubble collapse in compressible ideal fluid, and compressible shell convergence. Experience suggests that fusion «firing» requires that high material densities and temperatures be achieved not at a point, but within a finite volume. Solutions are derived for the bubble collapse and shell convergence problems where the density of compressed fluid remains constant. Such flows are shown feasible if fluid absorbs the energy of transmitted radiation defined by a certain law. For convergent shock, a solution to continuum mechanics equations is derived and used to determine the work to be done to compress a cold gas sphere and relate it to the energy in the shock convergence region.

Явление фрагментации металлов, вызванное ударно-волновым воздействием, представляет значительный научный интерес. К настоящему времени опубликовано большое количество экспериментальных данных по разрушению и инжекции частиц с поверхности твердых металлов [1–2]. Однако совсем немного данных можно найти по фрагментации металлов, находящихся в частично или полностью расплавленном состоянии [3–5]. В литературе данный эффект называется «micro-spalling» [6], когда с поверхности жидкого металла образуются капельные фрагменты. Актуальным на сегодняшний день остается вопрос о теоретическом определении характерного размера образующихся сферических частиц. Исследование закономерностей распада тонких жидких слоев металла позволит прогнозировать размер капель, в том числе и для тех материалов, для которых отсутствуют прямые экспериментальные данные.

В данной работе проведен расчетно-теоретический анализ имеющейся на сегодня совокупности экспериментальных результатов по динамическому высокоскоростному распаду тонких слоев расплавов металлов: Au, Fe, Pb, Sn. На основе теории размерности и качественных представлений о физике процесса было определено число независимых безразмерных переменных, характеризующих данное явление. В качестве таковых можно выбрать, например, следующие:

$$\frac{d}{h}, \frac{\eta}{\rho ch}, \frac{\sigma}{\rho c^2 h},$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, ρ – плотность материала, h – толщина жидкого слоя, η – коэффициент вязкости, c – скорость звука. Проведен поиск общих закономерностей процесса.

Литература

1. L. Davison, D. Grady, M. Shahinpoor. High-Pressure Shock Compression of Solids II. Dynamic Fracture and Fragmentation. New-York: Springer – Verlag, 1996.
2. M. Meyers. Dynamic behavior of materials. New-York: John Wiley & Sons, 1994.
3. L. Signor, T. De Ressaiguier, A. Dragon, G. Roy, A. Fanget, M. Faessel. Investigation of fragments size resulting from dynamic fragmentation in melted state of laser shock-loaded tin // International Journal of Impact Engineering 37, 2010, 887–900.
4. T. De Ressaiguier, D. Loison, A. Dragon, E. Lescoute. Laser Driven Compression to Investigate Shock – Induced Melting of Metals // Metals 2014, 4, 490–502.
5. L. Signor, E. Lescoute, D. Loison, T. De Ressaiguier, A. Dragon, G. Roy. Experimental study of dynamic fragmentation of shock-loaded metals below and above melting // EPJ Web of Conferences, 39012, 2010.
6. P. Andriot, P. Chapron, V. Lambert, F. Olive. Influence of melting on shocked free surface behavior using Doppler laser interferometry and X-ray densitometry / In: Asay JR, Graham RA, Straub GK, editors. Shock waves in condensed matter – 1983, North-Holland, Amsterdam, 1984, 227–30.

1-23

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ РАСПАДА НА КАПЛИ ТОНКИХ СЛОЕВ РАСПЛАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

С. В. Михайлов, М. В. Лимонова, В. К. Баранов

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

E-mail: marina3006.91@mail.ru

DROPLET FRAGMENTATION REGULARITIES IN THIN LAYERS OF METAL MELTS

S. V. Mikhailov, M. V. Limonova, V. K. Baranov

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

E-mail: marina3006.91@mail.ru

The shock-induced metal fragmentation is of a great interest in science. Currently, there are a lot of publications of experimental data on the fragmentation and ejection of particles from solid metal surfaces [1–2]. However, there is a few data on the fragmentation of metals in partially, or completely melted state [3–5]. In literature, this effect of droplet fragments from a liquid metal surface is referred to as «micro-spalling» [6]. Today, an urgent problem is to theoretically determine a typical size of spherical particles. Studying the micro-spalling regularities in thin layers of liquid metals would allow predicting the size of drops in various metals, including those for which no experimental data is available.

The paper presents the theoretical and computational analysis of the current set of experimental results on the dynamic high-speed fragmentation of thin layers of molten metals, such as Au, Fe, Pb and Sn. Basing on the theory of dimensions and qualitative model of the process physics, the number of independent dimensionless variables characterizing the given phenomenon has been identified. For example, the following variables can be taken:

$$\frac{d}{h}, \frac{\eta}{\rho ch}, \frac{\sigma}{\rho c^2 h},$$

where σ is surface tension, ρ is material density, h is thickness of a liquid layer, η is viscosity coefficient, and c is sound speed. The searching of general regularities has been performed.

References

1. L. Davison, D. Grady, M. Shahinpoor. High-Pressure Shock Compression of Solids II. Dynamic Fracture and Fragmentation. New-York: Springer – Verlag, 1996.
2. M. Meyers. Dynamic behavior of materials. New-York: John Wiley & Sons, 1994.
3. L. Signor, T. De Ressaiguiet, A. Dragon, G. Roy, A. Fanget, M. Faessel. Investigation of fragments size resulting from dynamic fragmentation in melted state of laser shock-loaded tin // International Journal of Impact Engineering 37, 2010, 887–900.
4. T. De Ressaiguiet, D. Loison, A. Dragon, E. Lescoute. Laser Driven Compression to Investigate Shock – Induced Melting of Metals // Metals 2014, 4, 490–502.
5. L. Signor, E. Lescoute, D. Loison, T. De Ressaiguiet, A. Dragon, G. Roy. Experimental study of dynamic fragmentation of shock-loaded metals below and above melting // EPJ Web of Conferences, 39012, 2010.
6. P. Andriot, P. Chapron, V. Lambert, F. Olive. Influence of melting on shocked free surface behavior using Doppler laser

interferometry and X-ray densitometry / In: Asay JR, Graham RA, Straub GK, editors. Shock waves in condensed matter – 1983, North-Holland, Amsterdam, 1984, 227–30.

1-24

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ТОПЛИВ И СВЯЗЬ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ С МАСШТАБАМИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Е. Л. Лобода¹, О. В. Матвиенко^{1,2},
М. В. Агафонцев¹, В. В. Рейно³

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

³Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: Loboda@mail.tsu.ru

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований горения некоторых видов жидких (спирт, бензин, керосин, дизельное топливо) и твердых топлив (древесина сосны, березы, кедр и др. растительные горючие материалы), полученные с применением методов термографии в узких спектральных интервалах среднего ИК-диапазона. При помощи скоростной съемки инфракрасных изображений показаны циклические процессы в пламени, которые являются причиной пульсаций температуры. Показана связь этих пульсаций с режимом течения в пламени и масштабами турбулентности в нем. Оценка масштабов производилась двумя способами: прямым измерением на термограммах и при помощи упрощенной математической модели, позволяющей производить оценку масштабов турбулентности по характерным частотам в спектре изменения температуры в пламени.

В результате сравнения различных способов оценки масштабов турбулентности в пламени получено удовлетворительное согласование результатов. Дополнительно было проведено сопоставление экспериментальных данных с результатами математического моделирования горения дизельного топлива с оценками экспериментальных и теоретических расчетов масштабов турбулентных вихрей.

Основные выводы:

1. При диффузионном горении рассмотренных видов топлив процесс горения носит циклический характер, который возможно зафиксировать только с применением скоростных тепловизоров, работающих в узких спектральных интервалах среднего ИК-диапазона.

2. Пульсации температуры в пламени связаны с режимом течения в нем и масштабами турбулентности.

3. Удовлетворительное согласование результатов показывает приемлемость применения представленной в докладе упрощенной математической модели для оценки масштабов турбулентности в пламени по спектру изменения температуры в нем.

**THERMOGRAPHY APPLICATION
FOR DETERMINING FIELD TEMPERATURE
FLAME BURNING OF SOME TYPES OF FUELS
AND RELATION PULSATIONS TEMPERATURE
SCALE OF TURBULENCE**

E. L. Loboda¹, O. V. Matvienko^{1, 2},
M. V. Agafontsev¹, V. V. Reyno³

¹Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk,
Russia

³V. E. Zuev Institute of atmospheric optics Russian Academy
of sciences, Siberian branch, Tomsk, Russia

E-mail: Loboda@mail.tsu.ru

This paper presents the results of experimental studies of combustion of some types of liquid (alcohol, petrol, kerosene, diesel fuel) and solid fuels (wood of pine, birch, cedar, etc. vegetable combustible materials), obtained with the use of thermography techniques in narrow spectral intervals mid-IR A range. Shown cyclical processes in flames that cause temperature fluctuations with the high-speed shooting infrared images. The relationship of these fluctuations with the flow regime in the flame and the scale of turbulence in it. The rating scale was carried out in two ways: by direct measurement in the thermograms and using a simplified mathematical model to assess the scale of the turbulence on the characteristic frequencies in the spectrum of temperature change in the flame.

As a result, comparison of different ways to measure the scale of turbulence in the flame of a satisfactory agreement between the results. Additionally, we compared experimental data with the results of mathematical modeling of the combustion of diesel fuel with estimates of theoretical calculations and experimental scale turbulent eddies.

Main conclusions:

1. Reviewed fuels diffusion combustion process is cyclical, which may be detected only with the use of high-speed imagers operating in narrow spectral intervals mid-IR.

2. The pulsations flame temperature associated with the current regime in it and the scales of turbulence.

3. Satisfactory results of negotiation shows the appropriateness of the report presented in a simplified mathematical model to assess the scale of turbulence in the flame of the spectrum of temperature change it.

1-25

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
ПРИ СЖАТИИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ
ОБОЛОЧЕК В ОПЫТАХ, ПРОВЕДЕННЫХ
НА УСТАНОВКЕ NIF**

В. А. Лыков, Е. С. Бакуркина,
Н. Г. Карлыханов, Г. Н. Рыкованов,
Л. В. Соколов, В. Е. Черняков, А. Н. Шушлебин

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

E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

В работах [1, 2] опубликованы результаты экспериментов, проведенных с мишенями непрямого облучения на установке NIF с целью изучения перемешивания до атомарного уровня между топливом и оболочкой. В этих экспериментах использовались пластиковые оболочки с толщиной стенки ~ 209 мкм и диаметром ~ 2280 мкм, заполненные T₂-газом при температуре 32 К° до плотности ~ 11 мг/см³. Остаточная атомарная концентрация дейтерия в T₂-газе не превышала 0,1%. Была проведена серия опытов с мишенями, в которых слой CD толщиной 4,0 мкм граничил либо непосредственно с T₂-газом, либо был внесен внутрь СН-оболочки на различные глубины от ее внутренней границы. Мишень помещалась в цилиндрический хольраум, внутри которого под действием лазерного излучения формировалось рентгеновское излучение с максимальной температурой T_r=294±4 эВ. Спектры нейтронного излучения, зарегистрированные в этих опытах, позволили определить как выходы ДТ-, ТТ- и ДД-реакций, так и температуры ионов при которых они происходили. Было показано [2, 3], что генерация ДТ-нейтронов в опытах с оболочками, заполненными чистым T₂-газом, была возможна только в результате развития гидродинамических неустойчивостей, приводящих к перемешиванию газа и материала оболочки до атомарного уровня. По изменению отношения выхода ДТ- и ТТ- нейтронов в опытах с разной глубиной размещения CD-слоя в СН-оболочке была оценена масса аблятора, перемешанного с газом.

В докладе приведены результаты численного моделирования сжатия газонаполненных оболочек для условий опытов, проведенных на установке NIF [1, 2]. Расчеты проводились с использованием программ радиационной газовой динамики, разработанных в РФЯЦ – ВНИИТФ [см., например, 4]. Одномерные расчеты проводились по программе ЭРА с учетом спектрального переноса излучения и турбулентного перемешивания по kε-модели, ранее реализованной в программе ТУРИНБ [5]. Двумерная программа ТИГР-ОМЕГА-3Т использовалась для оценки снижения нейтронного выхода за счет асимметрии потока рентгеновского излучения хольраума, а также при

моделировании развития гидродинамических неустойчивостей на фронте абляции для наиболее опасных мод сферических гармоник $l \sim 100$. Результаты этих расчетов, в целом, подтвердили основные выводы работ [1–3].

Литература

1. V. A. Smalyuk et al. Measurements of an ablator-gas atomic mix in indirectly driven implosions at the National Ignition Facility, PRL 112, 025002 (2014).
2. D. T. Casey et al. Development of the CD Symcap platform to study gas-shell mix in implosions at the National Ignition Facility, Physics of Plasmas 21, 092705 (2014).
3. S. V. Weber, Simulations of indirectly driven gas-filled capsules at the National Ignition Facility, Physics of Plasmas 21, 112706 (2014);
4. Е. Н. Аврорин, Н. Г. Карлыханов, М. Ю. Козманов и др. Обзор теоретических работ по ИТС, проведенных в РФЯЦ – ВНИИТФ. В сб. Вопросы современной технической физики. Избранные труды РФЯЦ – ВНИИТФ. стр. 252–276. (РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск, 2002).
5. В. Е. Неуважаев и В. Г. Яковлев. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по $k\varepsilon$ -модели, ВАИТ, сер. Теоретическая и прикладная физика. вып. 1, 28–36, (1988).

NUMERICAL SIMULATION OF HYDRODYNAMIC INSTABILITIES AND MIXING UNDER COMPRESSION OF GAS-FILLED SHELLS IN EXPERIMENTS ON NIF LASER

V. A. Lykov, E. S. Bakurkina, N. G. Karlykhanov,
G. N. Rykovanov, L. V. Sokolov,
V. E. Chernyakov, A. N. Shushlebin

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

E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

Papers [1, 2] present results of experiments with indirect-drive targets performed on the NIF laser to study the fuel-shell atomic mixing. There were used plastic shells with the 209- μm wall thickness and the 2280- μm diameter that filled with T_2 -gas at 32 K° to density of $\sim 11 \text{ mg/cm}^3$. The residual atomic concentration of deuterium in the T_2 -gas was no more than 0.1%. A series of experiments were performed with targets wherein the CD-layer with the 4.0- μm thickness either adjoined the T_2 -gas, or was introduced in the CH-shell at different depths from its internal boundary. The target was placed in the cylindrical hohlraum where the laser radiation induced the X-ray with the maximum temperature $T_r = 294 \pm 4 \text{ eV}$. Recorded neutron spectra made it possible to determine yields of DT-, TT-, and DD-reactions, and also ion temperatures when these reactions proceeded. Papers [2, 3] demonstrate that generation of DT-neutrons in experiments with shells filled by pure T_2 -gas was possible only due to the development of hydrodynamic instabilities leading to atomic mixing of gas and shell materials. The mass of the ablator mixed with the gas was

estimated by the ratio of DT-, and TT-neutron yields in experiments with the CD-layer placed on different depth into the CH-shell.

The compression of gas-filled shells was numerically simulated for conditions of experiments performed on the NIF laser [1, 2] and results of these simulations are discussed in the talk. Calculations used a radiation hydrodynamics codes developed at RFNC – VNIITF [4]. The ERA code was used for one-dimensional calculations with spectral radiation transport and the turbulent mixing by the $k\varepsilon$ -model previously implemented in TURINB code [5]. Two-dimensional TIGR-OMEGA-3T code was used to estimate a decrease of neutron yield due to a possible asymmetry of the X-ray flux on target surface and also to simulate the development of hydrodynamic instabilities at the ablation front for the most dangerous mode of spherical harmonics, $l \sim 100$. Generally, the results of our calculations confirmed main conclusions published in [1–3].

References

1. V. A. Smalyuk, et a. Measurements of an ablator-gas atomic mix in indirectly driven implosions at the National Ignition Facility, PRL 112, 025002 (2014).
2. D. T. Casey, et al, Development of the CD Symcap platform to study gas-shell mix in implosions at the National Ignition Facility, Physics of Plasmas 21, 092705 (2014).
3. S. V. Weber, Simulations of indirectly driven gas-filled capsules at the National Ignition Facility, Physics of Plasmas 21, 112706 (2014);
4. Е. Н. Аврорин, Н. Г. Карлыханов, М. Ю. Козманов, В. А. Лыков, К. А. Мустафин, В. Е. Неуважаев, Л. В. Соколов, В. Д. Фролов, В. Е. Черныяков, А. Н. Шущлебин. Review of the RFNC-VNIITF theoretical work on ICF problem. Collection «Issues of up-to-date technical physics. The RFNC-VNIITF selected works. pp. 252-276. (RFNC-VNIITF, Snezhinsk, 2002). (in Russian)
5. В. Е. Неуважаев, В. Г. Яковлев. Calculation of gravitational turbulent mixing by the $k\varepsilon$ -model, VANT, series «Theoretical and applied physics. Issue 1, 28-36, (1988). (in Russian)

1-26

О ФОКУСИРОВКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ГАЗЕ

В. Ф. Куропатенко^{1,2}, Ф. Г. Магазов²,
Е. С. Шестаковская²

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

²Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: magazov_farit@mail.ru

В лагранжевых координатах построено аналитическое решение задачи о сходящейся ударной волне в цилиндрическом сосуде с непроницаемой стенкой массой M_0 и начальными при $t = t_0$ параметрами газа

$\rho_0 = \text{const}$, $P_0 = 0$, $u_0 = 0$, $E_0 = 0$, где ρ – плотность, U – скорость, P – давление, E – удельная внутренняя энергия. Лагранжевой координатой является цилиндрическая масса M . Второй независимой переменной является время t . В точке t_0 , M_0 задана отрицательная скорость границы цилиндра $U_1 < 0$. В начальный момент времени из этой точки начнет распространяться ударная волна к центру симметрии. Граница цилиндра будет двигаться по определенному закону, согласованному с движением ударной волны. В переменных r , t она движется, но в переменных M , t ее траектория является вертикальной линией. Вообще говоря, все траектории частиц являются вертикальными линиями, вдоль которых сохраняется то значение энтропии, которое возникло на ударной волне. Параметры газа между ударной волной и границей определяются системой законов сохранения Эйлера–Гельмгольца. Задание безразмерных переменных и приведение системы законов сохранения к безразмерному виду проведено по аналогии с [1–4]. Для широкого диапазона значений показателя адиабаты γ найдены коэффициенты автомодельности n^* и времена фокусировки t_f .

Литература

1. Куропатенко В. Ф. Модели механики сплошных сред. Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2007.
2. Куропатенко В. Ф., Шестаковская Е. С., Якимова М. Н. Динамическое сжатие холодного газового шара // Доклады академии наук. 2015. Т. 461, № 5. С. 530–532.
3. Куропатенко В. Ф., Шестаковская Е. С., Якимова М. Н. Ударная волна в газовом шаре // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2016. Т. 9, № 1. С. 5–19.
4. Kuropatenko V. F., Shestakovskaya E. S. Analytical solution of the problem of a shock wave in the collapsing gas in Lagrangian coordinates, AIP Conf. Proc. 1770, 030069 (2016); doi:10.1063/1.4964011.

FOCUSING CYLINDRICALLY SYMMETRIC SHOCK WAVE IN A GAS

V. F. Kuropatenko^{1,2}, F. G. Magazov²,
E. S. Shestakovskaya²

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

²South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

E-mail: magazov_farit@mail.ru

The analytical solution of the problem of converging shock waves in the cylindrical vessel with an impermeable wall with the mass M_0 and initial parameters for the gas $\rho_0 = \text{const}$, $P_0 = 0$, $u_0 = 0$, $E_0 = 0$, where ρ – density, U – velocity, P – pressure, E – specific internal energy is constructed in Lagrangian coordinates. The Lagrangian coordinate is cylindrical mass M . The second independent variable is time t . The negative velocity of the cylinder boundary $U_1 < 0$ is set at the point t_0 , M_0 . At the initial time the shock wave spreads from this point into

the center of symmetry. The cylinder boundary moves under the particular law which conforms to the movement of the shock wave. It moves in the variables r , t , but it is a vertical line in variables M , t . Generally speaking, all the trajectories of the particles are vertical lines. The value of entropy which appeared on the shock wave retains along each of this lines. Parameters of the gas between the shock wave and the boundary are determined by the system of Euler–Helmholtz conservation laws. The setting of the dimensionless variables and conversion the system of conservation laws to the dimensionless form is performed by analogy with [1–4]. The self-similar coefficients n^* and focusing times t_f were found for a wide range of adiabatic index γ .

References

1. Kuropatenko V. F. Models of Continuum Mechanics. Chelyabinsk: CSU, 2007.
2. Kuropatenko V. F., Shestakovskaya E. S. and Yakimova M. N. Dynamic Compression of a Cold Gas Sphere // Doklady Physics, 2015, Vol. 60, No 4, p. 180–182.
3. Kuropatenko V. F., Shestakovskaya E. S. and Yakimova M. N. Shock Waves in Gas Sphere // Bulletin SUSU. Series «Mathematical Modelling, Programming & Computer Software». 2016. Vol.9, No. 1, P. 5–19.
4. Kuropatenko V. F., Shestakovskaya E. S. Analytical solution of the problem of a shock wave in the collapsing gas in Lagrangian coordinates, AIP Conf. Proc. 1770, 030069 (2016); doi:10.1063/1.4964011.

1-27

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ГРОЗОПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ, МОЛНИЕЗАЩИТЫ И ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Е. А. Мареев¹, В. С. Сысоев², Ю. В. Шлюгаев¹

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, Высоковольтный научно-исследовательский центр 900, Истра, Россия

E-mail: mareev@appl.sci-nnov.ru, Syssoev467@mail.ru

Проблемы совершенствования методов грозопредупреждения и молниезащиты продолжают сохранять свою актуальность, особенно в тех отраслях, где поражающее воздействие молнии может приводить к тяжелым авариям. В связи со спорадическим возникновением опасных быстроразвивающихся метеорологических явлений, сопровождающихся грозовой активностью, эта задача представляется достаточно трудной. Особенно актуально решение этой задачи для обеспечения безопасной эксплуатации атомных станций, поскольку авария на них приводит к чрезвычайно серьезным последствиям. Особо уязвимым

звеном для поражения молниевым разрядом на них является электроэнергетическое оборудование. При этом опасным является не только прямое поражение объекта разрядом молнии, но и вторичные дистанционные эффекты от разряда молнии на удалении.

Особое отношение к обеспечению безопасности при высокой электрической активности атмосферы на атомных станциях во всем мире отражает тот факт, что в конце 2016 г. в рамках Международного Совета по крупным электрическим системам высокого напряжения СИГРЕ в его исследовательском комитете С4 создана специальная рабочая группа «Проблемы молниезащиты и управление рисками на атомных станциях».

С учетом накопленного опыта представляются необходимыми постановка и решение следующих задач:

1) Развертывание системы наукастинга опасных быстроразвивающихся метеорологических явлений, сопровождающихся грозовой активностью, в районе атомной станции. Данная задача предполагает не только развертывание региональной грозолокационной системы, но и создание адаптированной к условиям станции мезомасштабной модели развития конвективных явлений, обеспеченной соответствующими метеорологическими и радиолокационными данными.

2) Развертывание системы геофизического мониторинга, обеспечивающей непрерывные наблюдения электрического поля и магнитного поля (сети электростатических флюксметров и магнитометров) в районе станции.

3) Совершенствование систем молниезащиты оборудования атомных станций с учетом вероятности развития встречного лидера достаточно высокой интенсивности.

4) Разработка эффективных средств воздействия на электрическую структуру грозового облака для снижения вероятности развития из него особо мощных грозовых разрядов (в перспективе).

В докладе излагаются результаты работы над этими проблемами, полученными в рамках выполнения мегагранта правительства РФ под названием «Молния и грозы: физика и эффекты» в соответствии с договором от 28.06.2013 г. № 14.В25.31.0023 между Министерством образования и науки РФ и научным учреждением ФИЦ ИПФ РАН (г. Нижний Новгород). Работы выполнены в рамках лаборатории «Молния и ее эффекты», созданной в результате выполнения этого мегагранта. Одним из основных соисполнителей этих работ являлся Высоковольтный научно-исследовательский центр (ВНИЦ) Всероссийского электротехнического института (ныне – РФЯЦ – ВНИИТФ ВНИЦ 900 в г. Истра).

IMPROVEMENT OF METHODS OF THE PREVENTION OF THE THUNDER-STORM, LIGHTNING PROTECTION AND EXPEDITIOUS MONITORING OF THE DANGEROUS GEOPHYSICAL PHENOMENA

E. A. Mareev¹, V. S. Sysoev², Yu. V. Shlugaev¹

¹Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia, VNITZ 900, Istra, Russia

E-mail: mareev@appl.sci-nnov.ru, Syssoev467@mail.ru

Problems of improvement of methods of the prevention of a thunder-storm and lightning protection continue to keep the relevance, especially in those branches where the striking impact of a lightning can lead to severe accidents. In connection with sporadic emergence of the dangerous high-growth meteorological phenomena which are followed by storm activity, this task is represented rather difficult. The solution of this task is especially urgent for ensuring safe operation of nuclear power plants as accident on them leads to extremely serious consequences. Especially vulnerable link for defeat by a lightning on them is the electrical power equipment. At the same time not only direct defeat of an object lightning discharge, but also secondary remote effects of lightning discharge on removal is dangerous.

The special relation to safety at high electric activity of the atmosphere around the world reflects the fact that at the end of 2016 within the International Council for large electric systems of high voltage of CIGRE in its research committee C4 the special working group «Problems of lightning protection and risk management on nuclear power plants» is created in nuclear power plants.

Taking into account the accumulated experience statement and the solution of the following tasks are represented necessary:

1) Expansion of system of the prevention of the dangerous high-growth meteorological phenomena which are followed by storm activity around nuclear power plant. This task assumes not only expansion of regional system of a location of a thunder-storm, but also creation of the station of the mesolarge-scale model of development of the convective phenomena provided with the relevant meteorological and radar data adapted to conditions.

2) Expansion of the system of geophysical monitoring providing continuous observations of electric field and magnetic field (network of electrostatic measuring instruments of the field and magnetometers) near the station.

3) Improvement of systems of lightning protection of the equipment of nuclear power plants taking into account probability of development of the counter leader of rather high intensity.

4) Development of effective remedies of impact on electric structure of a storm cloud for decrease in probability of development from a cloud of especially powerful lightning discharges (in the long term).

In the report results of work on these problems received within performance of a megagrant of the Government of the Russian Federation under the name «A lightning and thunder-storms are stated: physics and effects» according to the contract of 28.06.2013 No. 14.B25.31.0023 between the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and the FITS IPF RAS scientific institution (Nizhny Novgorod). Works are performed within the «Lightning and Its Effects» laboratory created as a result of performance of this megagrant. One of the main collaborators of these works was the High-voltage Research Center (HVRC) of the All-Russian electrotechnical institute (nowadays – RFYaTZ All-Russian Research Institute of Technical Physics of VNITZ 900 in Istra).

1-28

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ
ИЗМЕНЕНИЙ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
В ЖЕЛЕЗНОМ МЕТЕОРИТЕ
ПОСЛЕ УДАРНО-ИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО
НАГРУЖЕНИЯ**

Р. Ф. Муфтахетдинова¹, В. И. Гроховский¹,
Е. А. Козлов², И. В. Хомская³, Г. А. Яковлев¹

¹Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

³Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: gizrozka91@bk.ru

Ранее была исследована исходная структура железного метеорита Сихотэ-Алинь (IIAB), содержащего 5–7wt.%Ni, и установлено, что вещество метеорита при вхождении в плотные слои атмосферы и при падении на Землю претерпевало ударно-волновые воздействия. В микроструктуре метеорита наблюдали следы равномерной и локализованной деформации, но изменения, связанные с образованием ГПУ ϵ -фазы высокого давления, не обнаружены. Поэтому представляло интерес использовать нагружение сферическими ударно-изэнтропическими волнами для создания амплитуды давления ≥ 13 ГПа и реализации ОЦК \rightarrow ГПУ перехода в веществе данного железного метеорита. До нагружения ударными волнами исследуемый метеорит имел объемную октаэдрическую макроструктуру, состоящую из широких монокристаллических полос α -фазы Fe(Ni,Co) образующих, так называемую видманштеттовую структуру. Средний химический состав образца (wt. %): Ni-5.94, Co-0.38, Cu-0.03, P-0.48, S < 0.28, Fe-остальное. После взрывного воздействия в шаровом образце видны структурные изменения, вызванные высокоскоростной деформацией, а также следы локализованного разрушения. Определено, что характер и распределение по радиу-

су шарового образца дефектов деформационного происхождения и областей со следами $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ превращений обусловлены геометрией ударно-волнового воздействия и исходной макро- и микроструктурой метеорита. В матричной α -фазе камасите Fe(Ni,Co) обнаружена область с необычными пластинчатыми кристаллами шириной 0,5–2 μm и длиной 3–15 μm . Кристаллы вытянуты вдоль четырех-шести направлений, то есть образуются структуры, отличающиеся от двойников. Пластинчатые кристаллы располагаются параллельно друг другу или пересекаются. Зачастую в местах пересечения наблюдается смещение кристаллов, свидетельствующее о мартенситном механизме $\alpha \rightarrow \epsilon$ превращения. Методами дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD) и локального рентгеноспектрального анализа однозначно показано, что при воздействии сферического взрывного обжатия в сплаве Fe-Ni метеоритного происхождения присутствуют области, претерпевшие полиморфные $\alpha \rightarrow \epsilon$ и $\epsilon \rightarrow \alpha$ переходы.

**STUDY OF DEFORMATION CHANGES
AND PHASE TRANSFORMATIONS
IN IRON METEORITE
AFTER SHOCK-ISENTROPIC LOADING**

R. F. Muftakhedinova¹, V. I. Grokhovsky¹,
E. A. Kozlov², I. V. Khomskaaya³, G. A. Yakovlev¹

¹Ural Federal University named after the first President of
Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

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

³M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of
RAS, Ekaterinburg, Russia

E-mail: gizrozka91@bk.ru

Previously, the initial structure of an iron meteorite Sikhote-Alin (IIAB) (containing 5–7 wt.% Ni) has been investigated. It was shown that the meteorite substance underwent a shock-wave effects during entering the dense layers of the atmosphere and fall to the Earth. Traces of uniform and localized deformation have been observed in microstructure of meteorite, but the changes associated with the formation of hcp ϵ -phase high pressure were not found. Therefore, loading by spherical shock waves to generate isentropic pressure amplitude ≥ 13 GPa and implementation of bcc \rightarrow hcp transition in the substance of an iron meteorite was of interest. Before shock loading studied meteorite had an octahedral three-dimensional macrostructure consisting of broad bands of monocrystalline α -Fe phase (Ni, Co) constituting the so-called Widmanstätten structure. The average chemical composition of the sample (mass%): Ni-5.94, Co-0.38, Cu-0.03, P-0.48, S < 0.28, Fe-rest. Structural changes caused by high-speed deformation were found after an explosive impact in a spherical sample, as well as traces of localized destruction. It was determined that the nature and distribution of deformation defects and areas with traces of $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ transformation along the radius of the

spherical sample are governed by geometry of the shock-wave action and the original macro- and microstructure of the meteorite. Unusual lamellar crystals with a width of 0.5–2 microns and 3–15 microns in length were detected in the α -phase matrix kamacite Fe (Ni, Co) region. The crystals are stretched along four to six lines, and that's mean these structures are differ from twins. Lamellar crystals are parallel to each other or intersect. Often, at the intersection of crystals demonstrate displacement, indicating the mechanism of martensitic transformation $\alpha \rightarrow \varepsilon$. Electron Backscatter Diffraction (EBSD) and the local X-ray analysis clearly show that Fe-Ni alloy of meteoric origin after action of an explosive spherical compression contain areas undergoing polymorphic $\alpha \rightarrow \varepsilon$ and $\varepsilon \rightarrow \alpha$ transitions.

1-29

КОЛЛАПС КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА В ТЯЖЕЛОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ЖИДКОСТЯХ

Р. И. Нигматулин, А. А. Аганин,
М. А. Ильгамов, Д. Ю. Топорков

ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Москва, Россия
ФГБУН Институт механики и машиностроения Казанского
научного центра РАН, Казань Россия

E-mail: nigmar@ocean.ru

Проведено сравнение коллапса кавитационного пузырька в тетрадекане при температуре около 400°C (радиус пузырька 500 мкм) с коллапсом аналогичного по размерам кавитационного пузырька в ацетоне при температуре 0°C (в обоих случаях, давление жидкости 50 бар). В начале коллапса пар в пузырьках находится в состоянии насыщения (давление насыщения равно 11,7 бар в тетрадекане и 0,1 бар в ацетоне). Есть основания полагать, что принятые для пузырька в ацетоне условия коллапса реализуются в известных экспериментах по акустической кавитации дейтерированного ацетона в центральной области сферического кластера. Для описания динамики пара и жидкости используется полная гидродинамическая модель, применяются широкодиапазонные уравнения состояния, построенные по экспериментальным данным. Учитываются процессы неравновесных испарения-конденсации на межфазной границе и нестационарной теплопроводности в жидкости и паре. Показано, что радиус пузырька в момент экстремального сжатия пара в нем оказывается примерно равным 300 мкм в случае тетрадекана и около 25 мкм в случае ацетона. Максимальная скорость уменьшения радиуса пузырька в тетрадекане значительно меньше, чем у пузырька в ацетоне (100 м/с против 1500 м/с). Несмотря на это, в финальной стадии коллапса в пузырьке в тетрадекане, как и в пузырьке в ацетоне, образуется сходящаяся ударная волна. В результате ее фокусировки в малой окрестности центра пузырька возникают сверхвысо-

кие давления, температуры и плотности. Показано также, что амплитуда малых возмущений сферичности пузырька в виде отдельных сферических гармоник при его коллапсе в тетрадекане возрастает не более 10 раз, тогда как в ацетоне – до 150 раз.

COLLAPSE OF CAVITATION BUBBLES IN HEAVY-MOLECULE LIQUIDS

R. I. Nigmatulin, A. A. Aganin,
M. A. Ilgamov, D. Y. Toporkov

P.P.Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy
of Sciences (IO RAS), Moscow, Russia
Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center,
Russian Academy of Sciences (IME KazSC RAS), Kazan,
Russia

E-mail: nigmar@ocean.ru

Comparison of collapse of a cavitation bubble in tetradecane at a temperature of about 400°C (the bubble radius is 500 microns) with collapse of a cavitation bubble of the same radius in acetone at the temperature 0°C is performed (in the both cases, the liquid pressure is 50 bar). At the beginning of collapse the vapor in the bubbles is at saturated state (the saturation pressure is 11.7 bar for tetradecane and 0.1 bar for acetone). There are some reasons to suppose that the conditions of the bubble collapse in acetone are realized in the well-known experiments on acoustic cavitation of deuterated acetone in the central region of the spherical bubble cluster. To describe the dynamics of the vapor and the liquid, the full hydrodynamic model is used, wide-range equations of state based on experimental data are applied. Non-equilibrium processes of evaporation/condensation on the interphase boundary and nonstationary heat conduction in the liquid and vapor are taken into account. It is shown that the radius of the bubble at the time of extreme compression of its vapor is approximately equal to 300 microns in the case of tetradecane and is about 25 microns in the case of acetone. The maximum velocity of the bubble radius decrease in the case of tetradecane is considerably smaller than in the case of acetone (100 m/s against 1500 m/s). In spite of this fact in the final stage of collapse a convergent shock-wave is formed inside the bubble in tetradecane as well as inside the bubble in acetone. The focusing of this wave in the vicinity of the bubble center results in the super-high pressures, temperatures and densities. It is also shown that during the bubble collapse in tetradecane the amplitude of small perturbations of the bubble sphericity in the form of single spherical harmonics increases by no more than 10 times, while during the bubble collapse in acetone it grows up to 150 times.

1-30

**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ
БЕЗУДАРНОГО СИЛЬНОГО СЖАТИЯ
ОДНОМЕРНЫХ СЛОЕВ ГАЗА С УЧЕТОМ
УСЛОВИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКЕ**

С. П. Баутин, Н. С. Новаковский

Уральский Государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург, Россия

Математическое описание процесса безударного сжатия идеального газа до любого наперед заданного значения плотности, в том числе до бесконечной плотности представляет интерес в связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза [1]. Идея безударного сжатия весьма привлекательна для получения сколь угодно больших плотностей при минимальных энергетических затратах благодаря отсутствию в течении ударных волн, т. е. сохранению в процессе сжатия начальной энтропии [2].

В работе сформулирована задача о сильном сжатии одномерного (плоского, цилиндрического или сферического) слоя идеального газа в конфигурации Р. Мизеса [3]. Следуя методу, изложенному в работе [3], численно методом характеристик строится решение задачи сильного сжатия одномерного слоя газа в обратном направлении изменения времени, то есть от момента сильного сжатия $t^* > 0$ к начальному моменту $t = 0$. Представлены результаты тестовых расчетов для случая плоской симметрии. Для случаев других симметрий приведены результаты расчетов при решении задач для разной максимальной плотности и для различных значений массы сжимаемого газа при сжатии цилиндрических и сферических слоев изнутри. То есть расчет ведется для области, радиус кривизны которой не уменьшается с течением времени. Размер сжимаемой области при этом, естественно стремится к нулю.

Для отслеживания точности численно получаемого решения для него проверяется закон сохранения. При использовании полученных решений численно восстанавливается закон движения сжимающего поршня, с помощью которого реализуется сжатие до заданных значений плотности газа. Приводятся сравнения с аналитическим законом в случае плоской симметрии.

Найденный закон движения поршня используется для построения решения при счете в прямом направлении изменения времени: от $t = 0$ к $t = t^*$. Для этой цели решается одномерная система уравнений газовой динамики в лагранжевых массовых координатах. Построение численного решения на каждом временном слое делится на две стадии. На первой – определяется положение S^+ -характеристики, разделяющей покоящийся газ и область обобщенной централизованной волны сжатия, чья траектория известна заранее. На второй стадии с помощью неявной конечно-разностной схемы «РОМБ» [4] решение строится в области между сжимающим поршнем и S^+ -характеристикой.

В работе представлены результаты расчетов вышеупомянутым методом задач с разными начальными данными. Варьировались: масса сжимаемого слоя, максимальная плотность, показатель адиабаты идеального газа.

По полученным результатам исследования сделан вывод о применимости изложенного подхода при решении одномерных задач о сильном сжатии одномерных слоев газа.

Литература

1. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988. 173 с.
2. Долголева Г. В., Забродин А. В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 71 с.
3. Баутин С. П. Математическое моделирование сильного сжатия газа. – Новосибирск: Наука, 2007. – 309 с.
4. Гаджиев А. Д., Писарев В. Н. Неявный конечно-разностный метод «Ромб» для численного решения уравнений газовой динамики с теплопроводностью. // Ж. вычисл. матем. и матем. Физ., 19:5 (1979). – С. 1288–1303.

**NUMERICAL SOLUTION
OF THE ONE DIMENSIONAL IDEAL GAS
SHOCK-FREE ULTRAHIGH COMPRESSION
PROBLEM SUBJECT TO THE CONDITIONS
ON CHARACTERISTIC**

S. P. Bautin, N. S. Novakovskiy

Ural State University of Railway Transport (USURT),
Ekaterinburg, Russia

The ideal gas shock-free, density-unlimited compression process's mathematical description is the part of investigation of controlled thermonuclear fusion challenge [1]. The shock-free compression's idea is attractive to obtain the unlimited density through the minimal energy injection because of entropy save [2].

There is the formulation of the one-dimensional (plane, cylindrical or spherical) ideal gas shock-free, density-unlimited compression problem in R. Mises configuration in this report [3]. Then the numerical solution of the problem is constructed with help of the approach [3] based on the characteristics method. The solution is constructed in case of time decreasing from $t = t^* > 0$ (strong compression time) to initial time $t = 0$. The test results in case of plane symmetry is presented. The numerical simulation's results for the problems with various maximal density, compressed mass, isentropic exponent in case of other symmetry is also presented. Computational domain's curvature radius is not decrease during the simulation process. The size of compressed domain is vanished.

We check the execution of mass preservation law to examine the solution accuracy. The law of compressing piston moving is numerically reconstructed with help of computed solutions. The piston compresses the ideal gas layer to predetermined density. The comparison of

numerical trajectory with analytical solution in case of plane symmetry is also presented in this report.

We apply the calculated piston moving law as a boundary condition in solution constructing process while the problem has been solving in case of time increasing from $t = 0$ to $t = t^*$. To investigate this aim we solve the Lagrangian one-dimensional gas dynamics equation system. There are two stages in numerical simulation process. The first step is to evaluate coordinate of the a priori known trajectory C^+ -characteristic, which divides the domain in two parts – gas at rest and general focused Riemann wave of compression. Then we apply the implicit finite-difference method «Romb» [4] to construct the solution between compressing piston and the C^+ -characteristic

There are some numerical results obtained by use of the above-mentioned method in our report. In these computations we vary the maximal density, compressed mass, isentropic exponent and symmetry parameter

Obtained results confirm the applicability of our method for solving one dimensional ideal gas shock-free ultrahigh compression problem.

References

1. Zababahin E. I., Zababahin I. E. The phenomena unlimited cumulating (in Russian) // Moscow, Nauka, 1988. 173 p.
2. Dolgoleva G. V., Zabrodin A. V. Computational construction of microtargets for shockless compression Trudy Inst. Mat. i Mekh. UrO RAN, 14:1 (2008), 31–40.
3. Bautin S. P. Mathematical modeling of gas ultrahigh compression (in Russian). – Novosibirsk: Nauka, 2007. – 309 p.
4. Gadjiev A. D., Pisarev V. N. Implicit finite-difference method «Romb» for numerical solving of gas dynamics equation system with heat-conduction. (in Russian) // Journal of comp. mathematics and Mathematical Physics, 19:5 (1979). – P. 1288–1303.

1-31

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕДИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ АЛЮМИНИЯ

В. В. Погорелко, А. Е. Майер, В. С. Красников

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: vik_ko83@mail.ru, mayer@csu.ru,
vas.krasnikov@gmail.com

В последнее время активно исследуется взаимодействие высокоскоростных атомных кластеров, нано- и микрочастиц с поверхностью твердого тела. Интерес к этим исследованиям обусловлен возможностью использования потоков таких частиц для модификации поверхности (изменение рельефа поверхности, нанесение функциональных покрытий и т. д.). Нанесение медного покрытия на поверхность алюминия широко используются для увеличения проводимости поверхностного слоя.

В работе проведено молекулярно-динамическое исследование высокоскоростного соударения наночастиц с поверхностью алюминия. Основное внимание в работе уделяется столкновениям наночастиц, ведущим либо к модификации поверхности алюминия, либо к имплантации вещества наночастиц.

При скоростях порядка 1000 м/с наблюдается интенсивная пластическая деформация материала бомбардирующих наночастиц и прилегающих к месту соударения частей мишени, что приводит к эффективному прилипанию материала наночастиц. Исследовано влияние размеров, формы и кинетической энергии наночастиц на механические свойства поверхности алюминия. Также в работе определены оптимальные параметры соударения, обеспечивающие прилипание материала наночастиц к поверхности алюминия.

MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS OF THE HIGH-SPEED COPPER NANOPARTICLES INTERACTION WITH THE ALUMINUM SURFACE

V. V. Pogorelko, A. E. Mayer, V. S. Krasnikov

Chelyabinsk state university, Chelyabinsk, Russia

E-mail: vik_ko83@mail.ru, mayer@csu.ru,
vas.krasnikov@gmail.com

Interaction of high-speed atomic clusters, nano- and micro-particles with a solid surface is actively investigated recently. Interest in these studies is due to the possibility of using such particles flow for surface modification (change of the surface relief, functional coating, etc.). As an example, a copper coating of the aluminum surface is widely used in order to increase the conductivity of the surface layer. On the other hand, action of high-speed nanoparticles can lead to a substantial plastic deformation and deformation hardening in a surface layer of substrate.

In the present work, a molecular dynamics study of a high-speed impact of nanoparticles with aluminum surface is carried out. Main attention is given to the nanoparticle impacts leading to either modification (deformation hardening) of the aluminum surface layer or implantation of the nanoparticles material. At nanoparticles velocities of about 1000 m/s, there are severe plastic deformation of material of the bombarding nanoparticles and the target parts that are adjacent to the site of the collision; which results in an efficient adhesion of the nanoparticles material. The effects of the size, shape and kinetic energy of the nanoparticles on the mechanical properties of the aluminum surface are investigated. Also, the optimal parameters of collision that provide the material adhesion of the nanoparticles material to the aluminum surface are determined.

1-32

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПОРАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
С РАЗНЕСЕННЫМИ ПРЕГРАДАМИ
И КУМУЛЯТИВНЫМИ БОЕПРИПАСАМИ**

П. А. Радченко, С. П. Батуев, А. В. Радченко

Томский государственный архитектурно-строительный
университет, Томск, Россия

E-mail: radchenko@live.ru

В работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия потока поражающих элементов с разнесенными преградами и кумулятивными боеприпасами. Моделирование проводится в трехмерной постановке с помощью авторского конечно-элементного вычислительного комплекса EFES. Рассмотрен диапазон скоростей взаимодействия 600–3000 м/с, и углов встречи от 0 до 60 градусов. Исследовано влияние скорости удара, формы поражающих элементов на разрушение конструкций. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-31-00125, проект № 16-38-00256) и гранта Президента РФ № МК-413.2017.1.

**INTERACTION OF THE STRIKING ELEMENTS
WITH THE SPACED BARRIERS
AND CUMULATIVE AMMUNITION**

P. A. Radchenko, S. P. Batuev, A. V. Radchenko

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk,
Russia

E-mail: radchenko@live.ru

In work results of numerical modeling of interaction of a stream of the striking elements with the carried barriers and cumulative ammunition are presented. Modeling is carried out in three-dimensional statement by means of the author's computing code EFES. Range of speeds of interaction 600–3000 m/sec, and angles of a meeting from 0 to 60 degrees is considered. Influence of speed of impact, a form of the striking elements on destruction of designs is investigated. Comparison with experimental data is carried out.

The work has been conducted with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (project No. 16-31-00125; project No. 16-38-00256), and of the grant of the President of the Russian Federation No. МК-413.2017.1.

1-33

**ОБ АНАЛОГИЯХ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ
ОПИСАНИИ ЯВЛЕНИЙ
КОНИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ
И ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ПРИМЕРЕ
ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ
ЖИДКОСТИ**

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 оптике хорошо известно явление конической рефракции, когда направление падающего луча света совпадает с оптической осью кристалла и на экране появляется не точка, как в других случаях, а пятно. Падающий луч рассеивается. Математически это явление описывается системой уравнений в частных производных первого порядка для функции $t = f(x, y, z)$, которая выбирается в качестве одной из независимых переменных в исходной системе уравнений в частных производных и задает характеристическую поверхность исходной системы [1]. Конусы нормалей каждого уравнения характеристик в этом случае имеют общую нормаль, но не совпадают, что приводит к рассеиванию луча.

При исследовании системы уравнений Навье–Стокса, описывающей движение вязкой несжимаемой жидкости в безразмерных переменных [2], выделяются общие моменты с описанием явления конической рефракции как при решении начальной задачи, так и при решении задачи об обтекании неподвижного тела. Каждая из рассматриваемых задач сводится к системе уравнений в частных производных первого порядка, совместной только при определенных соотношениях между давлением и скоростью движения среды в классе достаточно гладких решений системы Навье–Стокса. Если давление и скорость движения среды не согласованы, как в оптике, конусы нормалей каждого уравнения в частных производных первого порядка, имея общую часть, не совпадают. Напрашивается аналогия в поведении течения (рассеяние, перемешивание, турбулентность).

Рассмотрение линий тока для точного решения системы Навье–Стокса в случае, когда условие согласования не выполняется, показывает, что при больших числах Рейнольдса кривизна и кручение таких линий стремятся к бесконечности.

Наличие несогласованных между собой давления и движения среды может быть, по мнению авторов, причиной разрушения ламинарного течения и возникновения таких явлений, как рассеяние или турбулентность.

Литература

1. Рубина Л. И. О распространении слабых разрывов для квазилинейных систем // ПММ, 1972. Т. 36, № 3. С. 435–443.

2. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. О некоторых особенностях системы уравнений Навье–Стокса // Труды Института математики и механики УрО РАН. Т. 22., № 1, С. 245–256.

ABOUT ANALOGIES IN THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PHENOMENA CONICAL REFRACTION AND TURBULENCE ON THE EXAMPLE OF THE CURRENT OF VISCOUS INCOMPRESSIBLE LIQUID

L. I. Rubina, O. N. Ulyanov

Institute of mathematics and mechanics of N. N. Krasovsky, Ekaterinburg, Russia

E-mail: rli@imm.uran.ru, secretary@imm.uran.ru

In optics the phenomenon of a conical refraction when the direction of the falling ray of light matches an optical axis of a crystal is well known and on the screen there is not a point, as in other cases, and a spot. The falling ray dissipates. Mathematically this phenomenon is described by a system of equations in private derivatives of first order for the $t = f$ function (x, y, z) which is selected from quality of one of independent variables in the initial system of equations in private derivatives and sets a characteristic surface of the initial system [1]. Cones of normals of each equation of characteristics in this case have the general normal, but don't match that leads to dispersion of a ray.

In case of a research of a system of equations of Navier–Stokes, the viscous incompressible liquid describing movement in the dimensionless variables [2], the general moments with the description of the phenomenon of a conical refraction are selected both in case of the decision of the initial task, and in case of the decision of the task on a flow of a fixed body. Each of the considered tasks comes down to a system of equations in private derivatives of first order, joint only in case of certain ratios between pressure and motion speed of the environment in a class enough smooth solutions of system of Navier–Stokes. If pressure and motion speed of the environment aren't coordinated as in optics, cones of normals of each partial equation of first order, having a common part, don't match. Analogy in behavior of a current (dispersion, agitation, turbulence) arises.

Reviewing of lines of current for the exact solution of system of Navier–Stokes in case the condition of coordination isn't satisfied, shows that in case of large numbers of Reynolds curvature and torsion of such lines aim at infinity.

Existence uncoordinated among themselves pressure and movements of the environment can be, according to authors, a cause of destruction of a laminar current and origin of such phenomena as dispersion or turbulence.

References

1. Rubina L. I. About distribution of feeble gaps for quasilinear systems // *dishwashers*, 1972. Т. 36, No. 3. С. 435–443.
2. Rubina L. I., Ulyanov O. N. About some features of a system of equations of Navier–the Stoke // *Works of Institute of mathematics and mechanics OURO RAHN*. Т. 22., No. 1, S. 245–256.

1-34

ФРАГМЕНТАЦИЯ ПРЕГРАД ПЛОСКИМИ УДАРНИКАМИ С ОТВЕРСТИЯМИ

А. С. Мазур, А. Ю. Григорьев, Г. Г. Савенков

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Проведены исследования процесса фрагментации преград в виде дисков диаметром 92 мм и толщиной 6 мм при ударе по ним плоского ударника диаметром 56 мм толщиной и 3 мм сплошного или с отверстиями (количество от 1 до 4). Скорость удара находилась в диапазоне от 190 до 350 м/с. Материал мишеней и ударников – сталь 9ХС с пределом текучести 780 МПа и пределом прочности 820 МПа.

В результате исследования установлено, что количество фрагментов (осколков) прямо пропорционально скорости удара и количеству отверстий в ударниках, чем выше значения данных параметров, тем больше количество осколков.

Функции распределения осколков по массе имели вид от гамма-распределения при ударе сплошным диском до полимодального распределения при максимальном количестве отверстий в ударнике и максимальной скорости удара. Сделан вывод о связи полученных законов распределения с напряженно-деформированным состоянием в мишени, возникающим под действием интерференции упругопластических волн.

Исследованные крупные фрагменты имели ромбовидную или прямоугольную форму с фарфоровидным или квазихрупким видом поверхности разрушения. Доля фарфоровидного рельефа независимо от количества отверстий в ударнике увеличивалась с ростом скорости удара и при скорости удара 280 м/с и выше эта доля составляла 100%. В случае квазихрупкого рельефа излома наблюдалось от двух до четырех зон, в пределах которых менялась скорость распространения фронта разрушения и локализация сопутствующей деформации. Количество зон связано с количеством отверстий в ударнике, что опять-таки указывало на связь остановок фронта со сменой напряженно-деформированного состояния. При фарфоровидном изломе количество зон независимо от количества отверстий снижалось до двух, а в некоторых случаях до одной зоны.

FRAGMENTATION OF BARRIERS-DRUMS WITH HOLES

A. S. Mazur, A. Yu. Grigor'ev, G. G. Savenkov

Saint-Petersburg state technological Institute (technical University), Saint Petersburg, Russia

The process of fragmentation of obstacles in the form of discs with a diameter of 92 mm and a thickness of 6 mm at impact it is flat impactor with a diameter of 56 mm

thick and 3 mm solid or with holes (1 to 4). The impact speed was in the range of from 190 to 350 m/s the Material of the targets and projectiles – 9KHS steel with a yield strength of 780 MPa and a tensile strength of 820 MPa.

The study found that the number of fragments (fragments) is directly proportional to the impact velocity and the number of holes in the shock, the higher the values of these parameters, the greater the number of fragments.

The distribution function of fragments mass had the appearance of the gamma distribution when hitting a solid drive to polymodal distribution with maximum number of holes in the projectile and the maximum speed of impact. The conclusion is made about the relationship of the obtained laws of distribution of stress-strain state in the target, arising under the action of interference of elastic-plastic waves.

Investigated large fragments had a diamond-shaped or rectangular shape with a porcelain-like or quasi-brittle type of failure surface. Share porcelain-like terrain, regardless of the number of holes in the projectile was increased with increasing the impact velocity and the impact velocity of 280 m/s and above, the proportion was 100%. In the case of quasi-brittle fracture topography was observed from two to four areas within which to change the speed of propagation of the fracture and concomitant localization of deformation. The number of zones is associated with a number of holes in the firing pin, which again pointed to the connection of the front stops with the change of stress-strain state. With porcelain-like fracture the number of zones regardless of the number of holes was reduced to two, and in some cases up to one zone.

1-35

РАСЧЕТ ЭВОЛЮЦИИ СХОДЯЩИХСЯ УДАРНЫХ ВОЛН В СТАЛЬНОМ ШАРЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ

М. Ю. Сахаров, А. Ю. Ададунов, Д. М. Шалковский

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

В докладе представлены результаты расчетов по программному комплексу Град-3 [1] эволюции сходящихся ударных волн в стальном шаре (12X18H10T) при нагружении взрывом ВВ от фокусирующей системы с 12 точками инициирования в нормальном режиме и при отключении нескольких точек инициирования.

Литература

1. Брагин А. А., Сучков В. А., Шнитко А. С. Методика и комплекс программ ГРАД-3 для расчета трехмерных нестационарных течений газовой динамики в лагранжево-эйлеровых переменных. В кн.: Забабахинские научные чтения. Тезисы докладов. Челябинск-70, Кыштым, ВНИИТФ, 1992, с. 40–41.

SIMULATION OF CUMULATIVE SHOCK WAVES EVOLUTION IN STEEL SPHERE UNDER NON- SYMMETRIC INITIATION

M. Yu. Sakharov, A. Yu. Adadurov, D. M. Shalkovsky

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

The report represents numerical simulation results of cumulative shock waves evolution in steel sphere (12X18H10T) due to spherical HE blust. HE triggered from 12-point-to-sphere initiation system. Full point regime and with some points turned-off ones are represented. Simulation made with GRAD-3 program complex.

1-36

К ИЗУЧЕНИЮ ПЛАНЕТОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АСТЕРОИДОВ И ЯДЕР КОМЕТ

А. В. Зайцев¹, Д. В. Петров², В. Н. Ногин²,
В. П. Елсуков², Д. А. Краснослободцев²,
В. А. Симоненко², А. И. Сорока³

¹Некоммерческое партнерство «Центр планетарной
защиты», Химки, Россия

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

³АО «Пространственные системы информации», Москва,
Россия

E-mail: zav-y@yandex.ru; sva@snezhinsk.ru;
sorokaai@mail.ru

Важнейшим условием эффективного воздействия на опасные космические объекты (ОКО) с целью их диспергирующего разрушения или отклонения с опасной для Земли орбиты, является знание их планетофизических характеристик – размеров, формы, строения, состава и свойств слагающих их вещества. В дополнение к средствам дистанционного изучения в оптическом, инфракрасном и радиочастотном диапазонах громадные возможности открывает использования космических средств и современных средств мониторинга и диагностики, основанных на новых технологических возможностях.

В представляемом докладе обращено внимание на изучение тел, близко (на расстоянии менее нескольких радиусов орбиты Луны) пролетающих от Земли. Современный уровень развития космических и других технологий позволяет осуществлять изучение этих объектов с помощью относительно недорогих космических аппаратов (КА) малого класса. Примером может служить проект «Космический патруль», предусматривающий создание и запуск КА к пролетающим вблизи Земли астероидам. При этом могут быть реализованы экспедиции типа «Пролет», для отработки методов и средств дистанционного изучения ОКО, а также экспедиции «Удар» и «Внедрение» – для изучения характеристик ОНТ и физических процес-

сов при высокоскоростном (до 70–80 км/с) ударе. Для внедрение в грунт астероидов могут использоваться специальные зонды-пенетраторы. Некоторые из этих экспедиций могут быть совмещены в рамках выполнения экспедиций «Перехват», предназначенных для отработки КА-исследователей и КА-перехватчиков и других компонентов Системы планетарной защиты. Излагается краткий анализ возможных вариантов запуска КА с помощью различных средств выведения, включая конверсионную ракету-носитель «Днепр».

В работе представлены характеристики базового КА, служащего для осуществления проведения обсуждаемых экспедиций. Рассматривается состав исследовательской аппаратуры, включающей камеры высокого и среднего разрешения, мультиспектральные камеры видимого, ультрафиолетового и инфракрасного диапазонов, видеоспектрометр, лазерный дальномер и гравиградиентометр, а также – различные комплектации зондов-пенетраторов. Обсуждаются методы использования получаемой информации для построения инженерных моделей исследуемых объектов.

Дополнительное внимание уделяется проблеме высокоскоростного столкновения зондирующих устройств. Обсуждаются особенности процессов, сопровождающих столкновения, характеристики ударной волны, возникающей в веществе изучаемого тела, разрушение вещества, прилегающего к каналу, свойства образующегося канала, свойства вещества, истекающего из канала, возможности использования образованного канала для последующего проникновения в него.

TOWARDS THE STUDY OF PLANET PHYSICS PROPERTIES OF ASTEROIDS AND COMET CORES

A. V. Zaitsev¹, D. V. Petrov², V. N. Nogin²,
V. P. Elsukov², D. A. Krasnosolobodtsev²,
V. A. Simonenko², A. I. Soroka³

¹Non-commercial partnership «Center for planetary protection»,
Khimki, Russia

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

³JSC «Spatial information systems», Moscow, Russia

E-mail: zav-y@yandex.ru; sva@snezhinsk.ru;
sorokaai@mail.ru

Knowledge about planet physics properties of hazardous near-Earth objects (NEO) is the most important condition for efficient impact on these aimed at fragmentation or deflection from hazardous orbit. Application of spacecrafts and modern tools of monitoring and diagnostics based on new capabilities provides us with a wide range of opportunities in addition to techniques of remote examination in optical, infrared and radiofrequency band.

Current presentation is focused on study of space bodies travelling closely (at the distance of several radii of the Moon orbit) to the Earth. State of the art status of development of space and other technologies allows study of these objects with the help of relatively inexpensive

spacecrafts (SC) of small class. «Space patrol» project envisioning development and launch of SC to asteroids travelling near the Earth may be an example of such. Thus missions of «Prolyot» (Fly-by) could be implemented for development of NEO remote investigation techniques and equipment, and missions «Udar» (Impact) and «Vnedrenie» (Penetration) for study of NEO properties and the processes at high-speed (up to 70–80 km/s) collision. Special penetrating probes may be used for penetration in asteroid rocks. Some of these missions may be performed together within the «Perekhvat» (Interception) missions for development of research and intercepting SC as well as other components of planetary protection system. Brief analysis of possible options of SC launch with the help of various orbiting vehicles including defense conversion «Dnepr» carrier.

Authors of presentation discuss characteristics of basic SC used for performance of missions described above. Structure of research hardware is considered including cameras of high and medium resolution, multi-spectral cameras of visible, UV and IR band, video-spectrometer, laser range-finder and gravity gradiometer as well as various configurations of penetration probes. Techniques of obtained information utilization for designing engineering models of studied objects are discussed.

More attention is given to the problem of high-speed collision of probing devices. Specific features of the processes accompanying collisions are discussed, features of shock wave arising in the matter of studied body, failure of matter adjacent to the channel, properties of formed channel, properties of matter ejected from the channel, possibilities of channels application for subsequent penetration into it.

1-37

3D ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА ПРИ ВСПЛЫВАНИИ ТЕРМИКА В АТМОСФЕРЕ

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

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

В работе описывается решение задачи о превращении в вихревое кольцо легкого (нагретого) облака при его всплывании в более тяжелой (холодной) атмосфере. Частным примером такой задачи является подъем облака воздушного ядерного взрыва или взрыва горючего газа. В этом случае после ухода ударной волны на значительное расстояние от точки взрыва на месте взрыва остается шар горячего воздуха (облако взрыва). Облако начинает всплывать и превращается в вихревое кольцо. За несколько секунд облако достигает максимальной скорости подъема, затем скорость постепенно уменьшается. В начале подъема облако

деформируется, принимая грибообразную форму, а затем превращается в тор. На начальной стадии на границе облака развивается турбулентность, вызванная гравитационной и сдвиговой неустойчивостями; однако на стадии вихревого кольца возникающее циркуляционное течение подавляет турбулентность.

В работе предложена модель образования и движения вихревых колец в поле тяжести, не содержащая (в отличие от известных моделей других авторов) каких-либо эмпирических коэффициентов. Модель основывается на результатах двумерных газодинамических расчетов и известных аналитических исследованиях круговых вихрей.

В данной работе задача исследовалась методом прямого 3D численного моделирования по методике ЭГАК. Результаты численных 3D расчетов сравниваются с указанной теоретической моделью. Получено хорошее согласие расчетных данных с теоретическими предсказаниями.

3D NUMERICAL SIMULATIONS OF VORTEX RING FORMATION BY A THERMAL PLUME RISING IN THE ATMOSPHERE

O. G. Sin'kova, V. P. Statsenko, Yu. V. Yanilkin

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

E-mail: sinkova.og@mail.ru, n.yanilkina@mail.ru

The paper describes the procedure of solving the problem of vortex ring formation by a light (heated) cloud rising in the heavier (cold) atmosphere. A particular case of this problem is a rising cloud produced by a nuclear air burst or explosion of combustible gas. In this case, when the shock wave travels far enough from the point of explosion, it leaves behind a sphere of hot air (explosion cloud). The cloud starts rising and transforms into a vortex ring. In a few seconds, the cloud reaches the maximum rising velocity, which then gradually decreases. Early in the rising phase, the cloud transforms into a mushroom later turning into a torus. In the initial phase, a turbulent layer forms at the cloud boundary driven by gravitational and shear instabilities; in the vortex-ring phase, however, the turbulence is suppressed by an emerging circulation flow.

In the paper we propose a gravitational vortex ring formation and drift model, which is free (as distinct from the known models of other authors) of any empirical coefficients. The model is based on the results of two-dimensional gas dynamic simulations and known analytical studies of vortex rings.

In this paper, this problem is explored using the 3D direct numerical simulation approach by the EGAK code. The results of the 3D numerical simulations are compared with the above theoretical model. The computational data are in good agreement with the theoretical predictions.

1-38

ИССЛЕДОВАНИЕ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ЛУЧ» КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ АСТЕРОИДОПОДОБНЫХ ТЕЛ РАЗНОЙ ФОРМЫ, СОСТАВА, МИКРОСТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Ю. Аристова, В. А. Денисова, В. С. Дрожжин,
А. А. Краюхин, В. В. Мисько, В. Г. Рогачёв,
П. В. Стародубцев, С. Н. Стёпушкин, Ю. В. Скорочкин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики
Институт лазерно-физических исследований, Саров,
Россия

E-mail: oefimova@otd13.vniief.ru

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

С целью обосновать использование лазерного излучения для моделирования ядерного взрыва проведены теоретические расчеты, в которых показано подобие газодинамических процессов, происходящих в нагружаемых телах.

Проведена серия экспериментов по облучению астероидоподобных хондритных мишеней разной микроструктуры, формы и прочности на сжатие. Плотность мишеней составляла от 2,0 до 2,42 г/см³, размер варьировался от 4 до 8 мм, масса от 0,1 г до 0,7 г. Использовалось излучение на длине волны 527 нм, длительность импульса составляла 2 нс. Энергия лазерного импульса варьировалась от 100 до 500 Дж.

Процесс разрушения фиксировался теньевым способом в режиме девятикадровой съемки [2] и оптогетеродинным способом с регистрацией отраженного излучения от движущихся частиц на осциллограф [3].

Для сферических мишеней с разной прочностью на сжатие получены критерии разрушения: при прочности на сжатие 65 кгс/см² около 500 Дж/г, при 225 кгс/см² – 650 Дж/г и при 1341 кгс/см² – 1000 Дж/г.

В сферической мишени с использованием каверны смоделирован случай заглубленного ядерного взрыва, получено разрушение мишени при снижении на 25% удельной энергии, введенной в мишень. Проведено исследование по выбору оптимальной точки прицеливания с использованием ассиметричных мишеней. Испытывались эллипсоидные хондриты с отношением осей 1:2. Показана бесперспективность многократных слабых воздействий (как одновременных, так и последовательных) на хондритную мишень по сравнению с однократным сильным воздействием. Проведены предварительные эксперименты по разрушению мощным импульсным излучением мишеней имитирующих железные и ледяные астероиды.

Литература

- 1 Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И., и др. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс. Квантовая электроника, 2005 г., том. 35, стр. 299–301.
- 2 А. Г. Кравченко, Д. Н. Литвин, В. В. Мисько, и др. Фотохронографическая методика исследования динамики развития плазменных образований. Физика плазмы, 2006 г., том № 2, стр. 1–4.
- 3 В. К. Баранов, А. Г. Голубинский, Д. А. Ириничев, др. Оптогероидное измерение скорости нескольких быстро движущихся объектов. Доклад на XII-х ежегодных Харитоновских чтениях по проблеме физики высоких плотностей энергии. г. Саров, 19–29 апреля 2010 г.

RESEARCH ON LASER AGGREGATE «LUCH» CRITERION OF DESTRUCTION BODY SUCH AN ASTEROID WITH VARIOUS OF IT'S FORMS, COMPOSITION, MICROSTRUCTURE AND STRENGTH BY COERCION ON IT POWERFUL PULSE EMISSION

A. U. Aristova, V. A. Denisova, V. S. Drozgin,
A. A. Krauhin, V. V. Mis'ko, V. G. Rogachev,
P. V. Starodubcev, S. N. Stepushrin, U. V. Skorochkin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics
The Institute of laser physical research, Sarov, Russia
E-mail: oefimova@otd13.vniief.ru

Stand was assembled on aggregate «Luch» [1] for holding test of destruction model of asteroids by powerful pulse laser emission, which emits effect of nuclear explosion on real space object.

For base use of laser emission for modelling of nuclear blast theoretical calculation was prosecuted, in which gas-dynamic process similarity was revealed, which happen in load body.

Series of experiment for irradiation of chondrite target such an asteroid with different microstruction? Forms and compression strength. Density of target was anywhere from 2,0 to 2,42 g/cm³, size was varied from 4 to 8 millimeters, mass – from 0,1 to 0,7 g. Energy of laser pulse was varied from 100 to 500 J.

Process of destruction was recorded by shadow method in conditions of nine-frame photography [2] and opticheterodyne method with registration on oscillography of emission reflect from moving particles [3].

For spherical target with different compression strength criteria of destruction was receive: when compression strength was 65 kilogram-force/cm² – near 500 J/g, when 225 kilogram-force/cm² – 650 J/g and when 1341 kilogram-force/cm² – 1000 J/g.

Subsurface nuclear blast was simulated in spherical target by used of cavern, target destruction was gave with получено lowering of specific energy on 25 percent, which was input in target. Research of aiming optimal aiming point was prosecuted with non-central target. Elipsoidal chondrite was used with axial ratio 2:1. Absence

of any prospect of multiplex weak influence (simultaneous and successive) was show as compared with single strong influence. Preliminary experiment of destruction of target, which imitate ferrous and icy asteroid, by powerful pulse emission was prosecuted.

References

- 1 Garanin S. G., Zareckiy A. I., Ilkaev R. I., et al. Canals of powerful aggregate «Luch» for laser thermonuclear synthesis with energy of impulse 3,3 kilojoule and pulse duration 4 ns. Quantum electronics, 2005 year., tome 35, page 299–301.
- 2 A. G. Kravchenko, D. N. Litvin, V. V. Misko, et al. Phonograph procedure research of dynamics evolution plasma formation. Physics off plasma, 2006, tome № 2, page 1–4.
- 3 V. K. Baranov, A. G. Golubinskiy, D. A. Irinichev, et al. Optical metrology velocity of several high-speed object. Report on XII-x yearly Chariton's reading of problem physics of high density energy. Sarov, 19–29 April 2010.

1-39

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ КВАНТОВ ДО 3,8 МэВ С ТОНКИМИ (≤1 мм) МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛЕНКАМИ

В. Н. Смирнов, М. Ю. Столбиков, А. Н. Власов,
Д. А. Железкин, В. А. Пашенцев, К. В. Халдин

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

Импульсная радиография – одна из наиболее наглядных методик диагностики низкоплотных металлических выбросов с поверхности при выходе на нее ударной волны. По рентгенограмме эксперимента возможно определение контура облака и средней плотности в направлении луча. Рентгеновская диагностика пыления осуществляется в условиях взаимодействия излучения с веществом при энергии фотонов 10–100 кэВ, что обусловлено малой плотностью пылевого облака ($\leq 0,1$ г/см³). Для этой области энергии доминирующим процессом взаимодействия излучения с веществом является поглощение фотонов электронами (фотоэффект). Наличие фотоэффекта потребовало учета не только массовой толщины ρh облака, но и номера атомов Z материала пыли.

В докладе представлены экспериментально-расчетные результаты исследований затухания излучения в металлах толщиной <1 мм, плотностью 8–20 г/см³, $Z = 26–82$, имитирующих массовую толщину (г/см²) пылевого облака:

- изучение спектра рентгеновского излучения, сформированного торможением на тангле потока электронов с граничной энергией 0,5 МэВ и 3,8 МэВ;
- исследование затухания излучения в мишени $N/N_0 = f(Z^k \rho h)$, h – толщина (см), ρ – плотность (г/см³), Z – атомный номер вещества (безразмерная величина),

$k > 0$ – безразмерный подгоночный параметр, N_0 и N – падающее и прошедшее γ – излучение;

– определение массовой толщины (г/см^2) взрывозащитной экранировки, при которой пылевое облако еще сохраняет рентгенографическую заметность.

В расчетах по программе «Призма» использовались спектры рентгеновского излучения, сформированные торможением электронов на танталовом аноде диаметром 4 мм. Используемые в расчетах спектры определены разными методами: с учетом экспериментально измеренной вольтамперной характеристики диода ускорительной трубки, с учетом только моноэнергетичных электронов с граничной энергией 0,5 МэВ, 3,8 МэВ, а также методом свинцовых фильтров по данным дозиметрии.

Для экспериментов в качестве источника рентгеновского излучения использовалась установка ИГУР-3,5. Достоинство данной установки заключается в возможности варьирования энергии излучения в интересующих нас пределах 0,3–4 МэВ.

INTERACTION OF UP TO 3.8 MeV QUANTUM-ENERGY RADIATION WITH THIN METAL FILMS (≤ 1 mm)

V. N. Smirnov, M. Yu. Stolbikov, A. N. Vlasov,
D. A. Zhelezkin, V. A. Pashentsev, K. V. Khaldin

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

Flash X-ray radiography is a most demonstrative technique used for diagnostics of low-density metal ejecta from the surface after the shock-wave arrival thereat. Cloud contours and its average density along the X-ray beam can be determined from X-ray images recorded in the experiment. X-ray diagnostics of ejecta was performed in conditions of the radiation-matter interaction with the photon energy being 10–100 keV due to the low density of the ejecta cloud ($\leq 0.1 \text{ g/cm}^3$). Within this energy range, the dominant process of the radiation-matter interaction is the absorption of photons by electrons, i. e. photoeffect that required not only the mass thickness of the cloud, ρh , but also Z -number of the ejecta material to taken into account.

The paper presents results of experimental and numerical simulation study of radiation attenuation in metals with < 1 mm thickness, $8\text{--}20 \text{ g/cm}^3$ density, and $Z = 26\text{--}82$, which model the unit length mass (g/cm^2) of the ejecta cloud. The paper also gives results of:

– Studying the x-ray spectrum formed by deceleration on tantalum of the electron flow with the energy limit of 0.5 MeV and 3.8 MeV;

– Studying the radiation attenuation in the target $N/N_0 = f(Z^k \rho h)$, h – thickness (cm), ρ – density (g/cm^3), Z – atomic number of the material (dimensionless quantity), $k > 0$ – dimensionless adjustable parameter, N_0 and N – incident and transmitted γ – radiation;

– Determining the explosion-proof shield mass (g/cm^2) that still allows the ejecta cloud to be radiographically visible.

PRIZMA code calculations used x-ray spectra formed due to electron deceleration on the tantalum anode with the 4-mm diameter. These spectra were determined taking into account the experimentally measured volt-ampere characteristics of the accelerating tube diode, taking account of only energy-homogeneous electrons with the energy limit of 0.5 MeV and 3.8 MeV, and also using the lead-filter method according to the dosimetry data.

IGUR-3/5 facility was used as the X-radiation source in our experiments. It is advantageous that this facility can vary radiation energy within 0.3–4 MeV of interest to us.

1-40

ИЗУЧЕНИЕ ВЫБРОСА МИКРОЧАСТИЦ ИЗ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К. А. Тен^{1,2}, Э. Р. Прууэл^{1,4}, А. О. Кашкаров^{1,4},
И. А. Рубцов^{1,4}, Л. И. Шехтман^{2,4}, В. В. Жуланов^{2,4},
Б. П. Толочко³, А. К. Музыря⁵, К. М. Просвирнин⁵,
Е. Б. Смирнов⁵, В. Н. Смирнов⁵, М. Ю. Столбиков⁵

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

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

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Россия

⁴Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

⁵Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Выход сильной ударной волны на свободную поверхность (СП) металлической пластины приводит к развитию неустойчивостей и последующему образованию потока мелкодисперсной фракции (ударно-волновое «пыление»). Поток частиц имеет распределение в пространстве по размерам и скоростям. Развитие процесса роста неустойчивости на СП металла и, соответственно, характеристики потока микрочастиц зависят от степени неоднородности пластины (размера канавок и выступов), от фазового состояния материала, условий нагружения и т. д.

Для исследования процесса пыления традиционно используют метод импульсной рентгенографии, метод пьезоэлектрических датчиков, оптические методики (включая голографические). Измеренные размеры микрочастиц составляют от единиц мкм до сотен мкм. Предполагается, что в потоке есть и более мелкие частицы, но существующие методики их пока разрешить не могут.

В данной работе представлены результаты исследования процессов пыления с использованием синхротронного излучения (СИ). Эксперименты проводи-

лись на ускорительном комплексе ВЭПП-3 – ВЭПП-4 (ИЯФ СО РАН), регистрация СИ проводилась прецизионным быстродействующим детектором DIMEX. Исследовались потоки микрочастиц со свободной поверхности из меди и олова. Получены распределения массы вдоль микроструй образующихся из канавок микронного размера.

**STUDYING THE SYNCHROTRON
EMISSION-INDUCED EJECTA
OF MICROPARTICLES FROM
INHOMOGENUITIES IN SHOCK-LOADED
METALS**

K. A. Ten^{1,2}, E. R. Pruehl^{1,4}, A. O. Kashkarov^{1,4},
I. A. Rubtsov^{1,4}, L. I. Shekhtman^{2,4}, V. V. Zhulanov^{2,4},
B. P. Tolochko³, A. K. Muzyrya⁵, K. M. Prosvirnin⁵,
E. B. Smirnov⁵, V. N. Smirnov⁵, M. Yu. Stolbikov⁵

¹Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, RAS Siberian Branch,
Novosibirsk, Russia,

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

³Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry,
RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia,

⁴Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia,

⁵Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Arrival of the strong shock wave at the free surface of the metal plate causes the instability development and the follow-on formation of the fine fraction flow (shock-wave “ejection”). The particle flow is spatially distributed in size and velocities. Progress of instability growth at the free surface of the metal and, respectively, the microparticle flow characteristics depend on the plate inhomogeneity (size of grooves and asperities), phase state of the material, and loading conditions, etc.

Flash radiography, piezoelectric gauge piezoelectric gauges, and optical methods (including holographic ones) are traditionally used to study the ejection process. Sizes of microparticles are measured to range from units to hundreds of μm . It is assumed that the flow includes even finer particles though the available techniques fail to resolve them.

Ejection processes were investigated using the synchrotron emission and results of this investigation are presented. Experiments used the accelerator facilities VEPP-3 – VEPP-4 (Budker Institute of Nuclear Physics, RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia). DIMEX precise fast detector was used to record the synchrotron emission. Microparticle flows from the free surface of tin and copper were also studied. Mass distributions along microjects formed from micron-size grooves are obtained.

1-41

**ЭВОЛЮЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
ВОЗМУЩЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ ГАЗОВ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
РЭЛЕЯ–ТЭЙЛОРА**

А. А. Тяктев, А. В. Павленко, Ю. А. Пискунов,
И. Л. Бугаенко, С. С. Мокрушин

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

E-mail: dep5@vniitf.ru (с пометкой для Тяктева)

На вертикальной многофункциональной ударной трубе с сечением канала $138 \times 138 \text{ мм}^2$ проведены эксперименты при ускоренном движении разноплотных газовых систем с числами Атвуда 0,2 и 0,67. В верхней части трубы находился легкий газ над тяжелым при нормальных условиях. Газы разделялись жидкой разделительной мембраной синусоидальной формы амплитудой $\sim 4 \text{ мм}$ и длиной волны $\sim 28 \text{ мм}$. Нижняя часть трубы была отделена от верхней лавсановой мембраной и перед экспериментом вакуумировалась. После разрыва лавсановой мембраны волны разрежения распространялись вверх по каналу трубы, разрушали жидкую разделительную мембрану и ускоряли исследуемую газовую систему. В результате нестационарного расширения в вакуум, под действием неустойчивости Рэлей–Тэйлора, происходил рост периодических возмущений на границе разноплотных газов. Интегральные параметры развития возмущений определены с использованием скоростной шпирен видеосъемки. Методом «лазерный лист» получены фотоизображения внутренней структуры неустойчивого течения.

**DEVELOPMENT OF PERIODIC
PERTURBATIONS AT THE GASES INTERFACE
UNDER RAYLEIGH–TAILOR INSTABILITY**

А. А. Тяктев, А. В. Павленко, Ю. А. Пискунов,
И. Л. Бугаенко, С. С. Мокрушин

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

The experiments at accelerated motion of different-density gas systems with Atwood numbers 0.2 and 0.67 were carried out using a multi-purpose vertical shock tube of the cross section $138 \times 138 \text{ мм}^2$. In the upper compartment of the shock tube, a light gas was contained above a heavy one at normal conditions. The gases were separated by a sinusoidal-shape liquid separation membrane of the amplitude $\sim 4 \text{ мм}$ and wavelength $\sim 28 \text{ мм}$. To separate the lower compartment from the upper one, a lavsan membrane was used. Before the experiment, the lower compartment was also evacuated. When the lavsan membrane was ruptured the rarefaction waves propagated

upwards along the shock tube channel and accelerated the studied gas system. As a result of nonstationary expansion into vacuum, the periodical perturbations built up at the different-density gas interface under the effect of Rayleigh–Taylor instability. The integral parameters of the perturbations development were specified using the fast schlieren technique. Images of the internal structure were obtained using the «laser sheet» method.

1-42

ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СХОЖДЕНИИ СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

А. Э. Хейфец¹, В. И. Зельдович¹, Н. Ю. Фролова¹,
С. М. Долгих², К. В. Гаан², Е. В. Шорохов²

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

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

E-mail: kheifetz@imp.uran.ru

Исследованы фазовые и структурные превращения в низкоуглеродистой стали в условиях высокоскоростной деформации при схлопывании толстостенной цилиндрической оболочки под действием заряда взрывчатого вещества; проведены расчеты деформации и температуры, выполнен расчет перераспределения температур в образце после нагружения с течением времени. Проведенные расчеты согласуются с результатами металлографических и электронно-микроскопических исследований микроструктуры образца.

Показано, что на стадии инерционного схождения оболочки деформация, скорость деформации и температура плавно увеличиваются при движении вдоль радиуса к оси полученного в результате схлопывания оболочки цилиндра. Это приводит к формированию в средней части цилиндра необычной структуры баротермической закалки, микротвердость которой соответствует микротвердости закаленной стали (~3500 МПа). Необычность данной структуры состоит в следующем: с одной стороны, в феррите наблюдаются следы цикла $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ превращений, с другой стороны, сохраняются перлитные колонии, то есть растворение цементитных пластин не происходит.

Формирование структуры баротермической закалки объяснено селективностью теплового эффекта высокоскоростной деформации по отношению к различным структурным составляющим нагружаемого материала. Структурные составляющие исходной феррито-перлитной структуры деформировались независимо. Феррит, имеющий низкую твердость, деформировался и, следовательно, нагревался значительно сильнее (вплоть до попадания в γ -область Т-Р диаграммы), чем перлит. То есть, различные структурные составляющие стали (феррит и перлит) в ходе экспе-

римента подвергались разному воздействию и пересекали разные области Т-Р диаграммы. Необходимо отметить, что данный эффект может наблюдаться лишь в тех случаях, когда скорость деформации столь высока, что выравнивание температур между структурными составляющими не успевает произойти за время протекания эксперимента.

Таким образом, на примере стали 20 показана принципиальная возможность использования «дифференцированного» теплового эффекта высокоскоростной деформации для получения новых структурных состояний.

Работа выполнена в рамках темы «Структура» (№ 01201463331) и при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-17-2-24).

EFFECTS OF TEMPERATURE AND STRAIN AT CONVERGENCE OF THE CYLINDRICAL STEEL SHELL

A. E. Kheifets¹, V. I. Zeldovich¹, N. Yu. Frolova¹,
С. М. Dolgikh², К. V. Gaan², E. V. Shorokhov²

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

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

E-mail: kheifetz@imp.uran.ru

The phase and structural transformations in low-carbon steel in the conditions of high-speed deformation at the collapse of a thick-walled cylindrical shell under the action of an explosive charge were investigated; calculations of strain, temperature and temperature field spreading after loading have been made. The calculations are consistent with the results of metallographic and electron microscopy studies of the sample microstructure.

It was shown, that at the stage of inertial converging of the shell deformation, temperature and deformation rate gradually increases when moving along a radius to the axis of the cylinder formed at collapse of the shell. This leads to the formation of the untypical structure of barothermal hardening in middle zone of the cylinder. Microhardness of this structure corresponds to the microhardness of hardened steel (~3500 MPa). The singularity of this structure is as follows: on the one hand, the cycle $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ transformation traces in the ferrite are observed, on the other hand, the pearlite colonies persist, i. e. cementite plates dissolution does not occurs.

Forming of the barothermal structure was explained by selectivity of the thermal effect of high speed deformation respect to the different structural components of the loaded material. Structural components of the original ferrite-pearlite structure deformed independently. Ferrite having a low hardness is deformed and thus heated much stronger (up to reaching the γ -region of T-R diagram) than pearlite. That is, the structural components of steel (ferrite and pearlite) in the course of the experiment reached the different areas of the T-P diagram. It should be noted that this effect can only occur when the strain

rate is so high that the temperature equalization between the structural components is not time to take place during the course of the experiment.

Thus, the possibility of using of the «differentiated» thermal effect of high-speed deformation to produce new structural states is shown for steel 20.

This work was supported by RAS theme «Structure» (g. r. 01201463331) and partially supported by Ural Division of RAS (project No 15-17-2-24).

1-43

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН И ФОРМИРОВАНИЯ НОЖКИ МАХА В МЕТАЛЛАХ

Жан Чонгъю, Ху Хайбо, Ван Сян,
Чень Йонтао, Тан Тьеган

Лаборатория исследования ударно-волновой
и детонационной физики,
Институт гидродинамики, КАИФ, Мьяньян, Китай

Динамическое поведение различных металлов при нагружении скользящей детонационной волной и фронтально сталкивающимися ударными волнами было исследовано при помощи малофокусной многоканальной методики PDV. Данные по скоростям свободной поверхности свидетельствуют о различных откликах меди, свинца и вольфрама около поверхности столкновения, включая регулярное отражение и формирование ножки Маха из двух сталкивающихся ударных волн, когда они выходят на свободную поверхность изнутри материала. Эти экспериментальные данные могут послужить для более детальной интерпретации явлений, зафиксированных высокоскоростной фотографией и радиографией по высокоскоростным выбросам материала в области столкновения двух ударных волн.

EXPERIMENTAL STUDY ON COLLIDING SHOCK WAVES AND MACH STEM FORMATION IN METALS

Hu Haibo, Zhang Chongyu, Wang Xiang,
Chen Yongtao, Tang Tiegang

Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, China 621900

The dynamic behavior of different metals under sliding detonation loading and head-on colliding shock waves is studied by using small spot multi-channel PDV. The free surface velocity data have shown different responses of Cu, Pb and W near the colliding surface including the regular reflection and the formation of Mach stem of two colliding shock waves when shock waves comes out from inside on free surface. These experimental data can be

used to give more detailed interpretation of the phenomena recorded by high speed frame photography and radiography of the high speed mass spiking in the collision region of two shock waves.

1-44

О СХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНЕ В ГАЗЕ ДЛЯ БОЛЬШИХ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ

В. Ф. Куропатенко^{1,2}, Е. С. Шестаковская²

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

²Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

E-mail: leshest@list.ru

Рассматривается ударная волна в сферическом сосуде с непроницаемой стенкой в лагранжевых координатах. Ударная волна возникает в начальный момент времени на стенке – границе газа. Она фокусируется в момент времени t_f в точку $M = 0$. Траектория ударной волны в лагранжевых координатах задается. Параметры газа между ударной волной и границей определяются законом сохранения массы, уравнением движения и уравнением траектории материальной частицы. Значения энтропии определяются из условий на фронте ударной волны. Поскольку ударная волна движется к центру симметрии, то энтропия зависит от лагранжевой координаты и она возрастает по мере уменьшения координаты ударной волны. В качестве искомым функций выбираются $R = r^3$ и $C = r^2 U$. Переход от исходных уравнений к двум системам уравнений для функций, зависящих только от t , и для функций, зависящих от автомодельной переменной ξ , совершается по аналогии с [1, 2]. Анализ построенного аналитического решения показывает, что для каждого значения γ существует значение коэффициента автомодельности n_* , которое разделяет решение задачи на два типа. В случае, когда $0 < n < n_*$, условие существования решения выполнено для любого значения n из указанного промежутка. В решениях этого типа фокусировка ударной волны сопровождается коллапсом газового шара – его объем стремится к нулю. При $n > n_*$ решение построено между ударной волной и характеристикой, которая начинается на границе и фокусируется одновременно с ударной волной. Течение газа за характеристикой не влияет на параметры ударной волны.

Задача решена в лагранжевых координатах и принципиально отличается от ранее известных постановок задачи о схождении автомодельной ударной волны к центру симметрии и ее отражении от центра, которые построены для бесконечной области в эйлеровых координатах [3–7] для единственного для каждого γ значения показателя автомодельности.

Литература

1. Куропатено В. Ф. Модели механики сплошных сред. Челябинск: ИЗД-во ЧелГУ, 2007.
2. Куропатенко В. Ф., Шестаковская Е. С., Якимова М. Н. Динамическое сжатие холодного газового шара // Доклады академии наук. 2015. Т. 461, № 5. С. 530–532.
3. Крайко А. Н. Быстрое цилиндрически и сферически симметричное сильное сжатие идеального газа // Прикладная математика и механика. 2007. Т. 71, № 5. С. 744–760.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Москва: Наука, 1986.
5. Станюкович К. П. Неустойчивые движения сплошной среды. Москва: Наука, 1971.
6. Брушлинский К. В., Каждан Я. М. Об автомодельных решениях некоторых задач газовой динамики // Успехи математических наук. 1963. Т. 18, Вып. 2. С. 3–23.
7. Guderley G. Starke kugelige und zylindrische Verdichtungsstöße in der Nahe des Kugelmittelpunktes bzw. der Zylinderachse // Luftfahrtforschung. 1942. Bd. 19. Lfg. 9. P. 302–312.

**CONVERGENT SHOCK
IN A GAS FOR LARGE VALUES
OF A SELF-SIMILAR COEFFICIENT**

V. F. Kuropatenko^{1,2}, E. S. Shestakovskaya²

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

²South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

E-mail: leshest@list.ru

We consider a shock in a spherical vessel with an impermeable wall in Lagrangian coordinates. The shock appears at the initial time on the wall – gas boundary. It focuses at the time t_f to the point $M = 0$. The shock trajectory is given in Lagrangian coordinates. Between the shock and the boundary the gas parameters are defined by the law of conservation of mass, the equation of motion and the equation of the particle trajectory. The values of entropy are determined by the conditions at the shock front. Since the shock moves to the center of symmetry, the entropy depends on the Lagrangian coordinates, and it increases with the shock coordinate decreases. $R = r^3$ and $C = r^2 U$ are selected as desired functions. The conversion from the initial equations to the two systems of equations for the functions depending only on t , and for functions depending on the self-similar variable ξ is performed by analogy with [1, 2]. Analysis of constructed analytical solution shows that for each value γ the self-similar coefficient n_* exists. It separates the solution of two types. In the case when $0 < n < n_*$ the condition of existence of solution fulfilled for any value n from the specified region. In the solutions of this type the shock focusing is followed by the collapse of a gas sphere – its volume approaches zero. When $n > n_*$ the solution is constructed between the shock wave and characteristic which starts at the border and focuses with the shock wave at the same time. Behind the characteristic the gas flow doesn't affect the shock wave parameters.

Thus the problem is solved for Lagrangian coordinates. It is fundamentally different from previously known formulations of the problem of the self-convergence of the self-similar shock wave to the center of symmetry and its reflection from the center which were constructed for the infinite area in Euler coordinates [3–7] for a unique self-similar coefficient for each value γ .

References

1. Kuropatenko V. F. Models of Continuum Mechanics. Chelyabinsk: CSU, 2007.
2. Kuropatenko V. F., Shestakovskaya E. S. and Yakimova M. N. Dynamic Compression of a Cold Gas Sphere // Doklady Physics, 2015, Vol. 60, No 4, p. 180–182.
3. Kraiko A. N. Rapid cylindrically and spherically symmetric strong compression of a perfect gas. // Applied Mathematics and Mechanics. 2007. Vol. 71, No. 5. P. 676–689.
4. Landau L. D., Lifshitz E. M. Theoretical Physics. Moscow: Nauka, 1986.
5. Stanyukovich K. P. Unsteady Motion of a Continuous Medium. Moscow: Nauka, 1971.
6. Brushlinskii K. V., Kazhdan Ja. M. On Auto-models in the solution of certain problems of gas dynamics // Russian Mathematical Surveys. 1963. Vol. 18, No. 2. С. 1–22.
7. Guderley G. Starke kugelige und zylindrische Verdichtungsstöße in der Nahe des Kugelmittelpunktes bzw. der Zylinderachse // Luftfahrtforschung. 1942. Bd. 19. Lfg. 9. P. 302–312.

1-45

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОСТИ
В ЗОНЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
С ВЫСОКИМИ ЧИСЛАМИ РЕЙНОЛЬДСА
В ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ**

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

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

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований коэффициента гетерогенности и спектральных характеристик зоны турбулентного перемешивания. Исследования проводились на ударной трубе, после прохождения отраженной ударной волны через зону турбулентного перемешивания. В экспериментах использовались разноплотные газы: воздух – углекислый газ (число Атвуда $A = 0,2$) и гелий – воздух (число Атвуда $A = 0,8$). Визуализация процесса развития турбулентного перемешивания проводилась методом «лазерный лист». С помощью калибровочных зависимостей определены абсолютные концентрации тяжелого газа в зоне турбулентного перемешивания для различных безразмерных координат ξ . По результатам экспериментов определены профили безразмерной плотности, коэффициенты гетерогенности и спектральные характеристики зоны турбулентного перемешивания.

RESEARCH INTO HETEROGENEITY IN TURBULENT MIXING ZONE AT HIGH REYNOLDS NUMBERS IN REFLECTED SHOCK WAVE

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

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

The paper presents results of experimental research into heterogeneity factor and spectral characteristics of turbulent mixing zone. Research was conducted using shock tube at the moment when reflected shock wave passed through turbulent mixing zone. Gases with various densities were used in the experiments, they were: air – carbon dioxide (Atwood number = 0.2) and helium – air (Atwood number $A = 0.8$). «Laser sheet» method was used to visualize evolution of turbulent mixing. Gauge dependences were used to determine absolute concentrations of heavy gas in turbulent mixing zone with respect to dimensionless coordinates ξ . In the course of the experiments we determined dimensionless density profiles, heterogeneity factor, and spectral characteristics of turbulent mixing zone.

1-46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МИШЕНЕЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ СТРУКТУРУ ВЕЩЕСТВА КАМЕННЫХ АСТЕРОИДОВ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ 10^{11} – 10^{13} ВТ/СМ²

И. Н. Бурдонский^{1,2}, К. Л. Губский³, А. П. Кузнецов³,
А. Г. Леонов¹, К. Н. Макаров^{1,2}, А. М. Рамазанов³,
И. С. Тимофеев¹, В. Н. Юфа^{1,2}

¹Московский физико-технический институт
(государственный университет), Москва, Россия

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

³Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

Экспериментальные исследования генерации ударных волн в мишенях проводились на мощной Nd-лазерной установке «Сатурн» при значениях интенсивности в пределах 10^{11} – 10^{13} Вт/см². Приведена величина критерия разрушения каменных мишеней из поликристаллического андезита и, изготовленных в РФЯЦ – ВНИИЭФ, хондритовых мишеней различной формы и прочности, которые по структуре и своему составу моделируют каменные астероиды. Обосновано применение теоретической модели трансформации энергии импульсного лазерного источника

в энергию ударной волны при абляционном процессе на поверхности мишени в режиме гидродинамического воздействия. Для оценки величины абляционного давления была использована модель Р. Мора. Измеренная температура плазмы позволила провести верификацию модели. Показано, что при интенсивности лазерного излучения $I \sim 10^{11}$ – 10^{13} Вт/см² абляционное давление P_a находится в диапазоне от 0,1 до 4 Мбар. Исследованы продукты разлета вещества мишеней из плазменного факела и ее тыльной стороны.

С помощью PDV регистратора измерена зависимость величины скорости ударной волны от размеров и прочности мишени.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TARGET DESTRUCTION, MODELLING THE STRUCTURE OF MICROMETEORITE SUBSTANCE UNDER THE ACTION OF LASER PULSE WITH INTENSITY 10^{11} – 10^{13} W/cm²

I. N. Burdonskiy^{1,2}, K. L. Gubskiy³, A. P. Kuznetsov³,
A. G. Leonov¹, K. N. Makarov^{1,2}, A. M. Ramazanov³,
I. S. Timofeev¹, V. N. Yufa^{1,2}

¹Moscow Institute of physics and technology (state University),
Moscow, Russia

²State scientific center Troitsk Institute for innovation and
fusion research, Troitsk, Russia

³National research nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

The research of generation of shocks wave in the targets was carried out at the high-power laser Nd-facility «Saturn». The criterion of destruction of polycrystalline andesite and chondritic targets was measured. The chondritic targets of different forms and strength were made at VNIIEF and model stone asteroids. The use of abstract model of transformation of laser pulse energy into shock wave energy during ablative process on the target surface under hydrodynamic influence was proved.

A model proposed by P. Mora was used to calculate the ablation pressure. The plasma flame temperature was measured and made it possible to verify the model. Theoretical calculations showed the value of ablation pressure within the range from 0.1 Mbar to 4 Mbar for laser radiation intensity $I \sim 10^{11}$ – 10^{13} W/cm². The material ejected from the plasma flame and the spall crater was studied.

The dependence of shock wave velocity from the size and strength of target was measured with PDV method. The shock wave velocity in the targets with thickness from 400 μ m to 3.8 mm was 1.25 to 2.4 km/s under the action of laser pulse intensity $5 \cdot 10^{11}$ W/cm² and focal spot diameter 300 μ m.

1-47

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ k - ε МОДЕЛИ
ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЗАДАЧИ
ГРАВИТАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
ЛЕГКОГО СЛОЯ**

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

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

Как и в любой феноменологической модели турбулентности, в k - ε модели имеется набор полуэмпирических коэффициентов. Обычно их находят, обращаясь к простейшим задачам, имеющим автомодельную стадию. Одна из таких задач – известная задача о турбулентном перемешивании в легком плоском слое [1].

Для рассматриваемой задачи (автомодельного режима перемешивания в легком слое) на основе уравнений k - ε модели получено аналитическое решение автомодельной стадии задачи. Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, приведены способы решения этой системы. Решения системы, полученные численно, дают результаты, согласующиеся с полученным нами [2] приближенным аналитическим решением и результатами 2D расчетов с применением k - ε модели.

Также проведено прямое численное моделирование задачи по 3D коду с вариацией сетки. В расчетах происходит выход на автомодельный режим, при этом тем быстрее, чем подробнее счетная сетка. Результаты 3D расчетов на автомодельной стадии близки к экспериментальным данным.

Литература

1. Гужова А. Р., Павлуни А. С., Стаценко В. П. Уточнение констант k - ε модели турбулентности на основе результатов прямого численного моделирования простейших турбулентных течений и измерений // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2005. Вып. 3. С. 37–48.
2. V. P. Statsenko, Yu. V. Tret'yachenko, Yu. V. Yanilkin. Solution of Self-Similar Equations of the k - ε Model in the Shear Turbulent Mixing Problem and Its Numerical Simulation. Journal of Physical Science and Application, 5 (6), 2015, 377–395, doi: 10.17265/2159–5348/2015.06.001.

**ANALYTICAL AND NUMERICAL SOLUTIONS
OF THE GRAVITATIONAL LIGHT LAYER
MIXING PROBLEM USING
THE k - ε TURBULENCE MODEL**

Yu. V. Yanilkin, O. G. Sin'kova, V. P. Statsenko

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

Like any phenomenological turbulence model, the k - ε model involves a set of semi-empirical coefficients. They are generally found by solving elementary problems with a self-similar phase. One of such problems is the known case of turbulent mixing in a light plane layer [1].

For the problem under consideration (self-similar mixing in a light layer), an analytical solution based on the k - ε model equations has been developed for the self-similar phase of the problem. A system of ordinary differential equations is obtained, and approaches to system solution are presented. Numerical system solutions give results matching our [2] approximate analytical solution and 2D k - ε simulation results.

In addition, respective direct numerical simulations have been done using a 3D variable-mesh code. The process in the simulations becomes self-similar, and this happens the faster the higher is the mesh resolution. Results of the 3D simulations of the self-similar phase are close to the experimental data.

References

1. Guzhova A. R., Pavlunin A. S., Statsenko V. P. Revision of the constants in the k - ε turbulence model based on the results of direct numerical simulations of elementary turbulent flows and measurements // VANT. Ser. Theoretical and Applied Physics. 2005. Issue 3. P. 37–48.
2. V. P. Statsenko, Yu. V. Tret'yachenko, Yu. V. Yanilkin. Solution of Self-Similar Equations of the k - ε Model in the Shear Turbulent Mixing Problem and Its Numerical Simulation. Journal of Physical Science and Application, 5 (6), 2015, 377–395, doi: 10.17265/2159–5348/2015.06.001.

1-48

**МЕТЕОРИТ ЧЕЛЯБИНСК:
ТВЕРДОФАЗОВЫЕ УДАРНЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И УДАРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ**

Д. Д. Бадюков¹, А. В. Игнатиев²

¹Институт геохимии и аналитической химии
им. В. И. Вернадского РАН, Москва, Россия

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Владивосток, Россия

E-mail: badyukov@geokhi.ru, ignatiev@fegi.ru

Метеорит Челябинск (падение 15 февраля 2013 г.) относится к обыкновенным хондритам (LL5) с умеренной степенью ударной нагрузки. Фрагменты этого метеоритного дождя подразделяются на светлые и темные разности. Основываясь на интенсивности проявления ударного метаморфизма, для ряда образцов были оценены воздействовавшие на них ударные нагрузки. Образцы светлых разностей демонстрируют спектр нагрузок, лежащих в области 20–30 ГПа. Материал темных разностей был подвергнут ударным нагрузкам в области 25–30 ГПа, однако претерпел отжиг, что привело к его «почернению» и уменьшению

наблюдаемой степени ударного метаморфизма. Выделяются две разности «неравновесного» ударного расплава – тонкие черные прожилки, присутствующие в светлой и темной разностях, и более массивные жилы импактного расплава в темной разности. Мы полагаем, что они сингенетичны и являются результатом фрикционного плавления по границам блоков, возникших при дроблении вещества на фронте ударной волны. Предполагается, что кристаллизация расплава в черных прожилках началась в волне разгрузки. Расплав в жилах и центральных частях черных прожилков кристаллизовался после сброса давления. Прогрев материала вокруг жил расплава привел к его почернению и отжигу эффектов ударного метаморфизма. Исходя из полученной ударной адиабаты метеорита Челябинск, были рассчитаны пост-ударные и ударные температуры в широком диапазоне давлений. Согласно этим расчетам, в процессе ударного события метеорит нагрелся на 65–135 градусов. Плавление LL хондритов из-за высоких «равновесных» пост-ударных температур начинается с нагрузок ~100 ГПа, а давления в районе 140 ГПа вызывают полное плавление вещества.

calculated shock and post-shock temperatures in a broad range of shock pressures. According the calculations the post-shock temperatures of the Chelyabinsk meteorite lie in range of 65–135 C°. Onset of melting of LL chondrites due to high «equilibrium» post-shock temperatures starts at ~100 GPa and the total melting occurs at 140 GPa.

THE CHELYABINSK METEORITE: THE SOLID-STATE TRANSFORMATIONS AND IMPACT MELTING

D. D. Badyukov¹, A. V. Ignatiev²

¹V. I. Verndasky Institute of geochemistry and analytical chemistry RAS, Moscow, Russia

²Far-East Geological Institute FED of RAS, Vladivostok, Russia

E-mail: badyukov@geokhi.ru, ignatiev@fegi.ru

The Chelyabinsk meteorite (fall on 15 February 2013) was classified as an ordinary chondrite (LL5) with moderate (S4) shock stage. Fragments of the meteorite shower are divided on light and dark colored varieties. We estimated levels of a shock for some samples of the meteorite used developed «shock barometers» for minerals. The light varieties demonstrate different shock loadings in range of 20–30 GPa. The dark varieties were shocked in range of 25–30 GPa but were annealed that resulted in their «blackened» and decreasing of the apparent shock degree. There are two types of «non-equilibrium» shock melts that are thin black veins present in the both light and dark varieties and more thick dikes of an impact melt in the dark varieties. I suppose that they were formed simultaneously and are the result of friction melting due to slipping of rock blocks that were formed by splitting up on a shock wave front. There are some petrographical reasons that crystallization of the melt of the thin black veins started by high pressure, may be in the rarefaction wave, whereas a melt of the thicker dikes crystallized after release of the shock pressure. Heating of a matter around the melt dikes resulted in their blackened and annealing of effects of shock metamorphism. Based on the artificial Hugoniot of the Chelyabinsk meteorite I

Секция 2

**ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ
ЯВЛЕНИЯ**

Section 2

**EXPLOSION AND DETONATION
PHENOMENA**

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОТКЛИКИ КОМПОНЕНТОВ ПЛАСТИЧНЫХ ВВ (РВХ-6)

Да-Юань Гао^{1,2}, Цзижань Лю^{1,2}, Вей Као^{1,2},
Лу-Ся Као^{1,2}, Цзин-Мин Ли^{1,2}, Цзинь-Шань Ли¹,
Йон Хань^{1,2}, Кай-Юань Тань^{1,2}

¹Институт Химических Материалов, КАИФ, Мянъян
621900, Китай

²Центр Мощных Боеприпасов, КАИФ, Мянъян 621900,
Китай

E-mail: gaodayuan@caep.cn

РВХ-6 является взрывчатым веществом с полимерным связующим, полученным из НМХ, ТАТВ, связующего вещества и флегматизатора. РВХ-6 имеет лучшее синтетическое свойство, используется в вооружении и боеприпасах. Для того, чтобы понять влияние теплового раздражителя на безопасность взрывных компонентов, создавались методы для взрывного порошка, взрывного цилиндра и взрывного компонента полусферы, методы взрывного точечного теста и термического неограниченного и ограниченного взрывного теста, тест с быстрым и медленным нагревом. Проводились экспериментальные исследования для взрывных образцов РВХ-6 различного масштаба, характеристик отклика взрывного компонента РВХ-6 при различных термических эффектах, а затем анализировались с помощью сравнения. Результаты показывают, что взрывная температура с задержкой в 5 с и критической температуры в 1000 сек РВХ-6 составили 330 °С и 255 °С, соответственно, термическая чувствительность находится между НМХ и ТАТВ. Критические температуры цилиндра из РВХ-6 с $\varnothing 10 \times 10$ мм, $\varnothing 20 \times 20$ мм и $\varnothing 30 \times 30$ мм составили 208,0 °С, 200,2 °С и 197,5 °С, соответственно, когда были получены с помощью термического взрывного теста. Используя линейное моделирование, выводятся уравнения, которые описывают отношение термического взрывного критического параметра δ , радиуса цилиндра r и критической температуры T_m , а также отношение между временем задержки t и критической температуры T_m . Время дефлаграции укорачивается, температура дефлаграции снижается, степень повреждения поверхности взрывного устройства становится больше, термическая безопасность взрывного устройства при быстром нагреве уменьшается с увеличением времени старения компонентов РВХ-6 при тесте с быстрым нагревом. Время дефлаграции компонентов РВХ-6 укорачивается, температура дефлаграции повышается, градиент реакции дефлаграции становится выше с повышением скорости нагрева в тесте с медленным нагревом.

Ключевые слова: взрывная механика, взрывчатое вещество РВХ-6, точка взрыва, термический взрыв, нагрев до начала взрывного превращения (cook-off), термический отклик.

THERMAL RESPONSES OF PBX-6 EXPLOSIVES COMPONENTS

Dayuan Gao^{1,2}, Zijian Lyu^{1,2}, Wei Cao^{1,2}, Luoxia Cao^{1,2},
Jingming Li^{1,2}, Jinshan Li¹, Yong Han^{1,2}, Kaiyuan Tan^{1,2}

¹Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900,
China;

²Robust Munitions Center, CAEP, Mianyang 621900, China

E-mail: gaodayuan@caep.cn

PBX-6 is a polymer bonded explosive made from HMX, TATB, binder and desensitizer. It has better synthetical property, and has been actual used for armament and ammunition. To understand the effects of thermal stimulus on the safety of explosive components, for explosive powder, explosive cylinder and explosive component of half sphere, the methods of explosion point test, and thermal explosion test of unlimited and limited, cook-off test of fast and slow were constituted respectively. Experimental researches were conducted for PBX-6 explosive samples of different scales, response characteristics of PBX-6 explosive component at various thermal effects were analyzed comparatively. The results show that the 5s delay explosion temperature and 1000s critical temperature of PBX-6 explosive were 330 °C and 255 °C respectively, the thermal sensitivity are between HMX and TATB. The critical temperatures of PBX-6 explosive cylinder of $\varnothing 10 \times 10$ mm, $\varnothing 20 \times 20$ mm and $\varnothing 30 \times 30$ mm were 208.0 °C, 200.2 °C and 197.5 °C respectively, which were obtained by thermal explosion test. By linear simulation the equations that describe the relation of the thermal explosive critical parameter δ , the cylinder radius r and the thermal explosion critical temperature T_m , as well as the relation between the thermal explosion delay time t and the critical temperature T_m were derived. The deflagration time shortens and the deflagration temperature decreases, the breach degree of the bomb crust and the cylinder becomes bigger, the thermal safety of fast cook-off bomb decreases with the increasing of the aging time of PBX-6 explosive components in fast cook-off test. The deflagration time of PBX-6 explosive components shortens and the deflagration temperature increases, the grade of deflagration reaction bigger with the heating rate rises in slow cook-off test.

Key words: explosion mechanics; PBX-6 explosive; explosion point; thermal explosion; cook-off test; thermal responses.

2-2

**СВОЙСТВА НАНО ЧАСТИЦ
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ,
ЗАКЛЮЧЕННЫМ В КАПСУЛЫ,
ПОГЛОЩАТЬ МИКРОВОЛНЫ**

Хао Йинь^{1,*}, Цухуа Ду¹, Пенвань Гень², Маошен Као³¹Институт проектирования систем, Китайская Академия Инженерной Физики, Мяньян 612900, провинция Сычуань, Китай²Государственная Главная Лаборатория Исследований и Технологий Взрывов, Пекинский Технологический Институт, Пекин 100081, Китай³Школа Материаловедения и Техники, Пекинский Технологический Институт, Пекин 100081, Китай

*E-mail:412yinh@caep.cn

Нано частицы на основе железа с углеродом, заключенным в капсулы, были получены при детонации смесей взрывчатых веществ и тристеарата железа в вакуумной камере. Массовое соотношение взрывчатого вещества относительно тристеарата железа, приводящее к различным давлениям и температурам детонации, играло важную роль в формировании нано частиц на основе железа с углеродом, заключенным в капсулы. С увеличением массового соотношения уменьшались количество графитных покровных слоев и размер нано частиц с углеродом, заключенным в капсулы. Количество покровных слоев и размер нано частиц являются двумя важными факторами, которые влияют на диэлектрическую проницаемость и потерю отражения синтезированных образцов. Нано частицы на основе железа с углеродом, заключенным в капсулы, демонстрируют свойства поглощения электромагнитной волны ($R \leftarrow 10$ дБ) в диапазоне 3,2–18 ГГц и минимальную потерю отражения (–43,5 дБ) при 9.6 ГГц со слоем толщиной 3,1 мм.

Ключевые слова: углерод, заключенный в капсулы, свойства поглощения микроволны, массовой соотношение.

**MICROWAVE ABSORPTION PROPERTIES
OF THE CARBON-ENCAPSULATED
IRON-BASED NANOPARTICLES**

Hao Yin^{1,*}, Qiuhua Du¹, Pengwan Chen², Maosheng Cao³¹Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 612900, Sichuan Province, China²State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China³School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

*E-mail:412yinh@caep.cn

Carbon-encapsulated iron-based nanoparticles were produced by detonation of mixtures of high explosive and iron tristearate in a vacuum chamber. The mass ratio of high explosive to iron tristearate, leading to different det-

onation pressures and temperatures, has played an important role in the formation of carbon encapsulated nanoparticles. With the increase of the mass ratio, the number of the graphitic coating layers and the size of carbon encapsulated nanoparticles decreases. The number of the coating layers and the size of nanoparticles are two important factors affecting the dielectric permittivity and reflection loss of as-synthesized samples. Carbon-encapsulated iron-based nanoparticles exhibit strong EM-wave absorption properties ($R \leftarrow 10$ dB) in the 3.2–18 GHz range and a minimum reflection loss (–43.5 dB) at 9.6 GHz with a 3.1 mm thick layer.

Key words: carbon-encapsulated, microwave absorption properties, mass ratio.

2-3

**СВЯЗЬ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ
С КРИВИЗНОЙ ФРОНТА ДЕТОНАЦИОННОЙ
ВОЛНЫ ВВ ТАТБ**

И. А. Ахлюстин, О. В. Костицын, Ю. А. Беленовский,
Е. Б. Смирнов, К. М. Просвирнин, К. М. Мирошкин,
В. Н. Щербakov, А. Ю. ГармашевРоссийский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе представлены результаты исследования процесса распространения фронта детонационной волны в цилиндрических образцах различного диаметра из ВВ ТАТБ. В экспериментах регистрировалась форма и скорость детонационного фронта. Исследование скорости детонации ВВ проводилось с использованием электроконтактной методики на участке стационарного распространения детонации. С помощью высокоскоростного фоторегистратора с линейной щелевой разверткой регистрировались временные профили выхода детонационной волны на торцевую поверхность исследуемых образцов.

Полученные данные демонстрируют однозначную связь скорости детонации с кривизной детонационной волны для исследуемого ВВ.

**CONNECTION OF DETONATION VELOCITY
WITH DETONATION WAVE FRONT FOR TATB**

I. A. Akhlyustin, O. V. Kostitsyn, Yu. A. Belenovsky,
E. B. Smirnov, K. M. Prosvirnin, K. M. Miroshkin,
V. N. Shcherbakov, A. Yu. GarmashevRussian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The paper presents the results of investigation into the process of detonation wave front propagation in cylindrical samples of various diameters made of TATB. Experiments registered the shape and velocity

of detonation front. Investigation into HE detonation velocity was performed by electro-contact technique on a section of stationary detonation propagation. With the help of high velocity photo register with linear slot sweep, time profiles were registered for the arrival of detonation wave on the edge surface of the samples under study.

The obtained data demonstrate clear connection of detonation velocity with detonation wave curvature for explosive under study.

2-4

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯЧЕЙСТОЙ
ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С ОБЛАКОМ
ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ**

И. А. Бедарев, А. В. Фёдоров

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

Известно, что детонационная волна в газовых и гетерогенных горючих смесях имеет ячеистую структуру. Также установлено, что добавление во взрывоопасную смесь инертных частиц способствует подавлению детонации. Исследования взаимодействия детонационных волн и инертных частиц в основном проводятся в одномерной постановке и позволяют сделать оценки влияния объемной концентрации, диаметра частиц, их теплофизических свойств на способность ослабления и подавления детонации. Однако неоднородная структура детонационной ячейки, несомненно, оказывает влияние на параметры смеси взрывчатого газа с химически инертными частицами и на предельные характеристики детонации. Таким образом, исследования параметров детонационной волны и оценка размера детонационной ячейки в смесях горючих газов и инертных частиц представляют научный и практический интерес.

В работе рассмотрено взаимодействие детонационной волны с облаком инертных неподвижных частиц. Такая постановка задачи возможна в случае взаимодействия с относительно крупными частицами (диаметром больше 100 мкм), когда за время прохождения детонационной волны скорость и температура частиц меняются не слишком сильно, в пределах 20% от скорости и температуры потока за детонационной волной. Газодинамика процесса моделировалась системой уравнений Навье–Стокса, описывающей движение вязкого сжимаемого теплопроводного газа, с учетом многокомпонентности газовой смеси и химической кинетики. Система дополнялась источником членом, учитывающим сопротивление взаимодействию с неподвижными сферическими частицами.

В результате разработана и верифицирована по времени задержки воспламенения и скорости детонационной волны простейшая модель приведенной кинетики для описания детонации водорода в воздухе.

Создана методология расчета детонационных течений в ANSYS Fluent с использованием приведенной кинетики. Приведенная кинетика верифицирована по размеру детонационной ячейки в водородовоздушной смеси. Разработана технология расчетов двумерных детонационных течений в системе реагирующая газовая смесь – инертные частицы для анализа вопросов, связанных с подавлением ячеистой детонации. Получены значения объемной концентрации частиц, приводящие к срыву детонационной волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-19-00010).

**NUMERICAL SIMULATION OF CELLULAR
DETONATION WAVE INTERACTION WITH
CLOUDS OF INERT PARTICLES**

I. A. Bedarev, A. V. Fedorov

Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics
SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: bedarev@itam.nsc.ru, fedorov@itam.nsc.ru

It is known that a detonation wave in gas and heterogeneous combustible mixtures has cellular structure. It is also found that the addition of inert particles in explosive mixture helps to suppress detonation. Research of interaction of detonation waves and the inert particles are mainly carried out in one-dimensional formulation and make it possible to estimate the influence of volume concentration, particles diameter, their thermal properties on ability of detonation attenuation and suppression. However, the multidimensional structure of the detonation cell undoubtedly has influence on the parameters of explosive gas mixtures with chemically inert particles and on critical detonation characteristics. Thus, the investigation of detonation wave parameters and estimation of the detonation cell size in mixtures of combustible gases and inert particles are of scientific and practical interest.

The interaction of the detonation wave with a motionless cloud of inert particles was considered. This formulation of the problem is possible in the case of detonation wave interaction with the relatively large particles (greater than 100 microns in diameter), when at the interaction time the particles velocity and temperature does not vary too much, within 20% of flow velocity and temperature behind the detonation wave leading front. Gas dynamics of the process was modeled using the Navier-Stokes equations describing the motion of a viscous compressible heat-conducting gas, taking into account the multi-component gas mixture and chemical kinetics. The system was supplemented by the source term, which take into account the resistance of the interaction with motionless spherical particles.

As a result, simplest model of reduced kinetics was developed and verified by the ignition delay time and detonation wave velocity which describe the detonation of hydrogen in air. Methodology for calculating the detonation flows in ANSYS Fluent with reduced kinetics was created. Reduced kinetics was verified by the detonation cell size

in the hydrogen-air mixture. The technology of calculation of two-dimensional detonation flows in the system of reacting gas mixture – inert particles for the analysis of questions related to the suppression of cellular detonation. The values of the particle volume concentration leading to the detonation wave suppression were obtained.

The work was supported by RSF (project No. 16-19-00010).

2-5

РАСЧЕТ ВЫХОДА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В КАНАЛ С РЕАГИРУЮЩИМ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

И. А. Бедарев, В. М. Темербеков, А. В. Фёдоров

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

В работе проведены исследования взаимодействия ячейистой детонационной волны со сверхзвуковым реагирующим потоком. Разработана математическая модель взаимодействия детонационной волны со сверхзвуковым потоком и создана математическая технология для ее реализации. Математическая модель включает в себя осредненные по Фавру уравнения Навье–Стокса для многокомпонентной газовой смеси с учетом химических реакций, дополненные SST модификацией моделью турбулентности. Для моделирования химической кинетики в работе была использована приведенная кинетическая схема, включающая одну брутто-реакцию горения водорода в воздухе. В качестве решателя использован программный комплекс ANSYS Fluent. Для аппроксимации по времени используется неявная схема второго порядка, а для аппроксимации по пространству – схема расщепления вектора потоков AUSM с противопоточной схемой второго порядка точности.

Было проведено сравнение полей течения для детальной и приведенной кинетики, которое обосновывает применимость упрощенной кинетической схемы для описания газодинамических характеристик. Показана возможность использования явления детонации для интенсификации воспламенения в канале с реагирующим сверхзвуковым потоком. Выявлено, что для идеализированной постановки задачи с подачей на входе в канал с каверной предварительно перемешанной смеси достаточно одного импульса детонационной волны для воспламенения и дальнейшего стационарного горения смеси по всей ширине канала. Выполнен расчет взаимодействия ДВ с предварительно не перемешанной смесью воздуха и водорода. Выявлена возможность влиять на процесс смешения водородо-воздушной смеси при помощи детонационной трубки. Оценено влияние размеров трубки на интенсификацию смешения водорода с воздухом в потоке канала с каверной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 16-19-00010.

CALCULATION OF DETONATION WAVE OUTPUT TO THE CHANNEL WITH REACTIVE SUPERSONIC FLOW

I. A. Bedarev, V. M. Temerbekov, A. V. Fedorov

Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics
SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: bedarev@itam.nsc.ru, fedorov@itam.nsc.ru

In the paper studies of the interaction of cellular detonation wave with supersonic reacting flow were carried out. The mathematical model of the interaction of the detonation wave and supersonic flow was developed and the mathematical technique for its implementation was made. The mathematical model includes Favre averaging Navier-Stokes equations for a multicomponent gas mixture taking into account chemical reactions, complemented by a modification of SST turbulence model. For chemical kinetics simulation the reduced kinetic scheme which includes one reaction of hydrogen combustion in air was used. ANSYS Fluent software package was used as solver. For time approximation the implicit second-order scheme was used, and for the spatial approximation – AUSM flux vector splitting scheme with second order accuracy upwind scheme was used.

Comparison of flow fields for detailed and the reduced kinetics which proves the applicability of the simplified kinetic scheme for the description of the gas-dynamic characteristics was carried out. The possibility of using the detonation phenomenon for the intensification of ignition in channel with supersonic reacting flow was shown. It was revealed that for an idealized problem formulation of premixed mixture injection at the inlet of the channel with a cavity only one detonation pulse is enough to ignite and to further stationary combustion of the mixture across the width of the channel. Calculations of detonation wave interaction with non-premixed mixture of hydrogen and air was made. The possibility to influence on the mixing process of the hydrogen-air mixture by means of a detonation tube was identified. The effect of the tube size on the intensification of hydrogen mixing with air in the flow channel with a cavity was estimated.

The work was supported by RNF (project No. 16-19-00010).

2-6

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКСТУР,
ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЗРЫВНОЙ
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНОК СУРЬМЫ,
МЕТОДОМ ДИФРАКЦИОННОЙ
ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ
МИКРОСКОПИИ**

В. Ю. Колосов, А. О. Бокуняева,
Л. М. Веретенников, А. А. Юшков

Уральский Федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
E-mail: Kolosov@urfu.ru

Сурьма известна своей огромной, так называемой «взрывной», кристаллизацией [1] в тонких пленках. Образец тонкой пленки сурьмы был синтезирован вакуумным напылением. Микроструктура исследована методами ПЭМ (просвечивающей электронной микроскопией), СПЭМ (сканирующей ПЭМ), СЭМ, МРА (микрорентгеновский анализ), а также оригинальным методом изгибных экстинкционных контуров для анализа ориентировок и разориентировок решетки в микрокристаллах и наноструктурах [2] на микроскопах JEM-2100 и LVEM-5 (при ускоряющих напряжениях (200 Кв, 80 Кв и 5 Кв). Идентифицированы основные ориентировки: зоны [001], [122], [241], [111], [425], [211], [223] и другие, некоторые направления, такие как (-210), (-312), (101), (-102), (-2-12), (110) и другие. По вышеперечисленным ориентировкам и стереопроекции был составлен атлас для сурьмы (стереографическая проекция с контурами на месте плоскостей и с наложением зонно-осевых картин, взятых из экспериментальных микрофотографий). Показано, что с помощью метода изгибных экстинкционных контуров можно более точно и локально, чем другими методами, определять кристаллографические ориентировки, поля ориентировок, особенности текстуры и т. п. Для идентификации и описания ориентировок и текстур удобно использовать цветные карты (аналог orientational mapping).

Литература

1. Solis J., Afonso C. N. Ultrashort-laser-pulse-driven rewritable phase-change optical recording in Sb-based films // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2003. – Т. 76. – №. 3. – С. 331–338.
2. Bolotov I. E., Kolosov V. Yu. Electron Microscope Investigation of Crystals Based on Bend-Contour Arrangement. I. Relationship between Bend-Contour Arrangement and Bend Geometry // *Physica status solidi (a)*. – 1982. – Т. 69. – №. 1. – С. 85–96.

**RESEARCH OF TEXTURES,
WHICH FORMS DURING “EXPLOSIVE”
ANTIMONY FILMS CRYSTALLISATION
BY THE METHOD TEM**

V. Yu. Kolosov, A. O. Bokunyaeva,
L. M. Veretennikov, A. A. Yushkov

Ural Federal University named after the first President of
Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
E-mail: Kolosov@urfu.ru

Antimony is known to have so-called “explosive” crystallization in thin films. The antimony thin film sample was synthesized by vacuum evaporation. The microstructure was investigated by TEM, SEM, STEM, EDX (energy dispersed X-ray), the extinction bend contour method for analysis of microcrystals and nanostructures lattice’s orientations and disorientations using microscopes JEM-2100 и LVEM-5 (with accelerating voltage 200 Kv, 80 Kv, 5 Kv). The main orientations have been identified: [001], [122], [241], [111], [425], [211], [223] and others, such traces of lattice planes as (-210), (-312), (101), (-102), (-2-12), (110) and others. Under above-mentioned orientations and the stereo projection the atlas for antimony was composed. It represents as a stereographic projection with contours in place of planes and with an overlap of zones axis patterns, which have been taken from experimental micrographs. It was demonstrated, that use of the bend extinction contour method made the determination crystallographic orientations, fields of orientations, structural peculiarities, etc. more precise and more local. It is convenient to apply color maps for identification and orientation’s characterization (the analogue of the orientational mapping).

References

1. Solis J., Afonso C. N. Ultrashort-laser-pulse-driven rewritable phase-change optical recording in Sb-based films // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2003. – Т. 76. – №. 3. – С. 331–338.
2. Bolotov I. E., Kolosov V. Yu. Electron Microscope Investigation of Crystals Based on Bend-Contour Arrangement. I. Relationship between Bend-Contour Arrangement and Bend Geometry // *Physica status solidi (a)*. – 1982. – Т. 69. – №. 1. – С. 85–96.

2-7

**СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ
В ПЛАСТИФИЦИРОВАННОМ ТЭНЕ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

А. В. Воробьёв, В. И. Таржанов, Е. А. Козлов,
А. Н. Еськов, Д. П. Кучко,
М. А. Ральников, А. Е. Ширококов

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

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

В 1981–1983 гг. Л. В. Альтшулером и Г. С. Дорониным с сотрудниками был обнаружен режим недожатой детонации во флегматизированных взрывчатых составах (ВС). Особенность режима – наличие за прифронтовым пиком давления и массовой скорости автомодельно расширяющейся области постоянного течения. Цель данной работы – изучить детали режима. С использованием лазерно-интерферометрической методики VISAR и лазерно-гетеродинамической методики (PDV) исследовался пластифицированный тэн с содержанием инертного пластификатора 15%. Диаметр зарядов ВС – $\varnothing 60$ мм, длина – 10, 20, 30, 60, 120 мм. Регистрировалась скорость контактной границы ВС – окно (LiF) при выходе плоской детонационной волны, сформированной иницирующей системой, состоящей из взрывной линзы, шашки ТГ $\varnothing 60 \times 10$ мм, медного экрана толщиной 5 мм. На зондируемую поверхность LiF наносилось покрытие из алюминия толщиной 2,5 мкм. Длина волны зондирующего излучения в методике VISAR составляла 532 нм, в ЛГМ – 1550 нм. Диаметр пятна зондирования – 0,3 мм. Зарегистрированы временные профили с прифронтовым пиком и плато с последующим спадом. Максимальные значения регистрируемой скорости на фронте профилей – 1,4–1,56 км/с. Максимальное значение регистрируемой скорости на плато $1,32 \pm 0,05$ км/с. Обнаружено снижение со временем значений регистрируемой на плато скорости до 1,16 мм/мкс на заряде длиной 120 мм. Скорость роста ширины плато – 0,46 мм/мкс. Уклон плато – 0,13 мм/мкс/мкс. Переход к параметрам в ВС и его продуктах взрыва на волновом луче $p = \rho D_{II}$ ($\rho = 1,525$ г/см³, $D = 7,8$ км/с) дает значения давления в максимумах на фронте профилей 22–24 ГПа. Эти значения несколько ниже значения в точке Жуге пластифицированного тэна (25,63 ГПа), полученного А. В. Фёдоровым с сотрудниками на зарядах с диаметром 120 мм. Отсюда следует, что максимумы на профилях данной работы соответствуют состояниям Жуге исследуемого ВС.

**DETONATION WAVE STRUCTURE
IN PLASTICIZED PETN ACCORDING TO
LASER-INTERFEROMETRIC MEASUREMENTS**

A. V. Vorobyov, V. I. Tarzhanov, E. A. Kozlov,
A. N. Eskov, D. P. Kuchko,
M. A. Ralnikov, A. E. Shirobokov

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

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

In 1981–1983, L. V. Altshuler and G. S. Doronin with their colleagues observed the mode of undercompressed (weak) detonation in phlegmatized explosive compositions. A specific feature of this mode is the self-similar expanding region of the steady-state flow behind the near-front peak of the pressure and mass velocity. The focus of this effort is studying mode details. The VISAR technique and the laser-heterodyne technique (PDV-technique) was used to study the plasticized PETN with the 15% content of inert plasticizer. Explosive composition charges were 60 mm in diameter and 10, 20, 30, 60, and 120 mm in length. The «explosive composition–lithium fluoride (LiF)» interface velocity was recorded at the time by exit of the plane detonation wave. Initiating system has included the explosive lens, TNT-RDX booster ($\varnothing 60 \times 10$ mm), and the 5-mm thick copper base-plate. The LiF surface to be probed was coated by 2.5- μ m thick aluminum. The probing radiation wavelength in VISAR technique was 532 nm and in PDV-technique – 1550 nm. The probing spot diameter was 0.3 mm. We recorded time profiles having a near-front peak and a plateau with the follow-on dip. The maximum velocity at the profile was 1.4–1.56 km/s. The maximum velocity registered on the plateau was 1.32 ± 0.05 km/s. The velocity on the plateau was noted to decrease with time down to 1.16 mm/ μ s for the charge having 120 mm in length. The velocity grow of plateau width was observed to of 0.46 mm/ μ s. The plateau slope was 0.13 mm/ μ s/ μ s. Transition to parameters in the explosive composition and its explosion products on the wave line $p = \rho D_{II}$ ($\rho = 1.525$ g/cm³, $D = 7.8$ km/s) gives pressures of 22–24 GPa in the maximums at the front of profiles. These values are somewhat lower than that at the Jouget point of the plasticized PETN (25.63 GPa), which was reported by A. V. Fedorov and its colleagues for charges with the 120-mm diameter. It follows therefrom that our maximums on the profiles correspond to the Jouget state of the test explosive composition.

2-8

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УПРУГИХ И АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТАТБ

М. А. Воробьева, А. А. Рыкунов

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

E-mail: m.a.vorobyova@vniitf.ru

Получение экспериментальной информации об упругих свойствах молекулярных кристаллов взрывчатых веществ (ВВ) сопряжено с многочисленными трудностями как чисто технического, так и фундаментального характера. Это обуславливает актуальность исследования упругих свойств монокристалла ВВ в рамках различных теоретических подходов. Одним из важных с практической точки зрения «проблемных» соединений является 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензол (ТАТБ) – малочувствительное ВВ, образующее слоистые кристаллы, характеризующиеся триклинной пространственной группой симметрии $P\bar{1}$.

Ранее из первых принципов нами было рассмотрено влияние давления на упругие свойства ТАТБ [1]. Целью данной работы является исследование упругих и акустических свойств ТАТБ в зависимости от температуры. Решение этой задачи в рамках неэмпирических подходов требует либо расчетов фоновых спектров, либо моделирования методами квантовой молекулярной динамики. Оба эти приближения являются ресурсозатратными в случае супер-ячеек молекулярных кристаллов, содержащих значительное количество атомов. Поэтому расчеты упругих констант проводились в программе LAMMPS с использованием классического силового поля, реализованного нами на основе аналитических выражений, представленных в работах [2, 3].

Для вычисления упругих констант ТАТБ использованы два метода: прямой метод и метод независимых деформаций [4]. Полученные упругие константы отражают анизотропию механических свойств кристалла ТАТБ. Коэффициенты, рассчитанные двумя методами, хорошо согласуются между собой и с первопринципными расчетами [1]. С использованием процедуры усреднения были рассчитаны модули упругости ТАТБ и скорости звука для диапазона температур 0–500 К. Эти значения согласуются с первопринципными расчетами [1], а значение объемного модуля – также и с имеющимися экспериментальными данными.

Литература

1. A. A. Rykounov J. Appl. Phys. 117, 215901 (2015).
2. D. Bedrov, O. Borodin, G. D. Smith, T. D. Sewell, D. M. Dattelbaum, L. L. Stevens J. Chem. Phys. 131, 224703 (2009).
3. M. P. Kroonblawd, T. D. Sewell J. Chem. Phys. 139, 074503 (2013).
4. R. Yu, J. Zhu, H. Q. Ye Comput. Phys. Comm. 181 (3), 671–675 (2010).

TEMPERATURE DEPENDENCE OF TATB ELASTIC AND ACOUSTIC PROPERTIES

M. A. Vorobyova, A. A. Rykounov

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

E-mail: m.a.vorobyova@vniitf.ru

The lack of experimental data on elastic properties of high explosives (HE) molecular crystals is due to numerous problems of both technical and fundamental character. Therefore, the actuality of investigations into HE single-crystal elastic properties under various theoretical approaches increases. One of the practically important «problem» substances is 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene (TATB) – a low-sensitive HE that crystallizes in a layered structure with triclinic symmetry in the $P\bar{1}$ space group.

Earlier we carried out ab initio investigations into pressure impact on TATB elastic properties [1]. Present work aims to research the temperature dependence of TATB elastic and acoustic properties. Solving of this problem by non-empirical approaches requires either the calculation of phonon spectra or simulation by quantum molecular dynamic methods. Both approximations are computationally expensive for the molecular crystal super-cells containing a considerable number of atoms. Therefore we carried out the calculations of elastic constants with classical force field introduced in LAMMPS program code basing on the analytical expressions from [2, 3].

Two methods were used for calculation of TATB elastic constants: a direct one and a method of independent deformations [4]. The resulting elastic constants attest the anisotropy of TATB mechanical properties. The sets of elastic constants obtained by both methods agree with each other and ab-initio calculations [1]. Using averaging procedures we calculated TATB elastic moduli and sound speeds for the temperature range 0–500 K. The obtained values agree with ab initio calculations [1], and the bulk module also agrees with the available experimental data.

References

1. A. A. Rykounov J. Appl. Phys. 117, 215901 (2015).
2. D. Bedrov, O. Borodin, G. D. Smith, T. D. Sewell, D. M. Dattelbaum, L. L. Stevens J. Chem. Phys. 131, 224703 (2009).
3. M. P. Kroonblawd, T. D. Sewell J. Chem. Phys. 139, 074503 (2013).
4. R. Yu, J. Zhu, H. Q. Ye Comput. Phys. Comm. 181 (3), 671–675 (2010).

2-9

ПЕРВИЧНЫЕ МЕХАНИЗМ РАЗЛОЖЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ПЕРХЛОРАТОВ ТЕТРАЗОЛАТОАММИНОВ КОБАЛЬТА(III)

В. К. Голубев^{1,2}, М. А. Илюшин³

¹Независимый эксперт, Нижний Новгород, Россия

²Университет Людвиг-Максимилиана, Мюнхен, Германия

³Химико-технологический университет,

Санкт Петербург, Россия

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

Работа является продолжением серии исследований свойств ряда перхлоратов тетразолатоамминов кобальта(III) [1, 2], которые используются в качестве основных составляющих в первичных инициирующих и светочувствительных взрывчатых веществах, применяемых, в частности, в системах лазерного инициирования. В данной работе представлены результаты большого числа квантово-химических расчетов изолированных молекулярных комплексов таких веществ, как перхлораты 2-(5-цианотетразolato-N²) тетраамминокобальта(III) (CP), (5-нитротетразolato-N²) пентаамминокобальта(III) (NCP), цис-бис-(5-нитротетразolato-N²) тетраамминокобальта(III) (BNCP) и бис-(1-метил-5-аминотетразол-N³,N⁴) тетраамминокобальта(III) (TCP). Рассмотрены также продукты их возможных первичных стадий разложения. Молекулярные свойства рассмотренных взрывчатых веществ определялись для изолированных молекулярных комплексов с использованием методов квантовой химии, реализованных в программе Gaussian 09. Гибридный функционал B3LYP и базовый набор электронных функций 6-31+G(d) использовались в большинстве выполненных расчетов. Для выполнения большого числа предварительных и вспомогательных расчетов использовался более простой базисный набор 3-21G. В особенности этот базисный набор был полезен при чрезвычайно большом числе расчетов различных путей реакций разложения. Расчеты выполнялись для молекулярных комплексов не только в основном, но и в возбужденном и заряженных, положительно и отрицательно, состояниях. Были рассчитаны все геометрические и энергетические характеристики рассматриваемых объектов и определены основные первичные механизмы их разложения. К числу таких полученных характеристик можно отнести полные электронные энергии молекулярных комплексов, энергии их нулевых колебаний, энергии атомизации, ВЗМО-НСМО энергетические зазоры, распределения малликеновских зарядов на атомах и некоторых молекулярных группах. Получены и представлены также все геометрические параметры рассмотренных молекулярных комплексов, распределения в них электронной плотности и структуры высшей занятой и низшей свободной молекулярных орбиталей. Рассчитаны также инфракрасные спектры для всех молекулярных комплексов и образовавшихся в процессе

разложения фрагментов. Рассмотрены все возможные механизмы разложения, однако, в качестве преобладающего, имеющего наиболее низкие показатели по энергиям активации и диссоциации, рассматривался, прежде всего, отрыв от комплекса молекулы аммиака. Этот механизм, кроме всего прочего, сопровождается в большинстве случаев одновременной перестройкой оставшегося молекулярного фрагмента. Энергии активации и диссоциации были рассмотрены и для других возможных, более высокоэнергетических первичных механизмов разложения, таких как отрыв от молекулярных комплексов различных молекулярных фрагментов и разрыв тетразольного кольца по наиболее слабой связи. Такие механизмы разложения в принципе также могут иметь место при определенных высокоинтенсивных условиях нагружения.

Литература

1. Golubev V.K., Ilyushin M.A. Analysis of primary decomposition events in nitrotetrazolatoammines of cobalt. Proceedings of the XIX International Seminar «New Trends in Research of Energetic Materials». Pardubice, Czech Republic. 2016. P. 535–545.
2. Голубев В. К. Некоторые свойства и взрывное воздействие на преграды светочувствительных взрывчатых веществ CP и BNCP. Тезисы докладов XXVIII симпозиума «Современная химическая физика». Туапсе, 2016. С. 187.

PRIMARY DECOMPOSITION MECHANISMS OF SEVERAL EXPLOSIVE TETRAZOLATOAMMINE COBALT(III) PERCHLORATES

V. K. Golubev^{1,2}, M. A. Ilyushin³

¹Freelance, Nizhniy Novgorod, Russia

²Ludwig-Maximilian University, Munich, Germany

³University of Chemical Technology, Saint-Petersburg, Russia

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

The work is a continuation of a series of studies on the properties of a number of tetrazolatoamine cobalt (III) perchlorates [1, 2], which are used as the main components in primary initiating and light-sensitive explosives utilized in particular in laser initiation systems. Results of a large number of quantum-chemical calculations of isolated molecular units of such substances as 2-(5-cyanotetrazolato-N²) tetraamminecobalt (III) perchlorate (CP), (5-nitrotetrazolato-N²) pentaaminecobalt (III) perchlorate (NCP), cis-bis-(5-nitrotetrazolato-N²) tetraamminecobalt (III) perchlorate (BNCP) and bis-(1-methyl-5-aminotetrazole-N³, N⁴) tetraamminecobalt (III) perchlorate (TCP) are presented in the paper. The products of their possible primary stages of decomposition are considered too. Molecular properties of considered explosives were determined for isolated molecular units using quantum chemistry methods implemented in the Gaussian 09 computer program. The B3LYP hybrid functional and the 6-31+G(d) basis set of electron functions were used in most of performed calculations.

A simpler 3-21G basis set was utilized for performing a large number of preliminary and auxiliary calculations. In particular, this basis set was useful for an extremely large number of calculations of various ways of decomposition reactions. The calculations were performed for the molecular complexes not only in the basic but also in excited and charged, positively and negatively, states. All geometric and energetic characteristics of considered objects were calculated and the main primary mechanisms of their decomposition were determined. Such obtained characteristics as total electron energy of molecular complexes, their zero-point energy, atomization energy, the HOMO-LUMO energy gap, the distribution of Mulliken charges on atoms and some molecular groups can be attached to these characteristics. All the geometrical parameters of the considered molecular complexes, the distributions of electron density in them and the structures of the highest occupied and lowest unoccupied molecular orbitals were obtained and presented. The infrared spectra for all molecular complexes and fragments formed during decomposition were calculated too. All possible decomposition mechanisms were considered but tearing off an ammonia molecule from the molecular unit had the lowest levels of activation and dissociation energies and was accepted as the prevailing one. This mechanism among other things was accompanied in most cases by simultaneous molecular rearrangement of the remaining fragment of the molecular unit. The activation and dissociation energies were examined for this and other possible more energetic primary decomposition mechanisms such as tearing off various molecular fragments from the molecular units and rupture of the weakest link in a tetrazole ring. Such decompositions mechanisms can in principle also take place under certain conditions of intensive loading.

References

1. Golubev V. K., Ilyushin M. A. Analysis of primary decomposition events in nitrotetrazolatoamines of cobalt. Proceedings of the XIX International Seminar «New Trends in Research of Energetic Materials». Pardubice, Czech Republic. 2016. P. 535–545.
2. Golubev V. K. Some properties and explosive action on the barriers of light-sensitive CP and BNCP explosives. Abstracts of the XXVIII Symposium «Modern Chemical Physics». Tuapse, 2016. P. 187.

2-10

ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ИНИЦИИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ НЕСКОЛЬКИХ НОВЫХ ПЕРВИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. К. Голубев^{1,2}, Т. М. Клапётке²

¹Независимый эксперт, Нижний Новгород, Россия

²Университет Людвиг-Максимилиана, Мюнхен, Германия

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

Работа является продолжением серии исследований физико-химических и детонационных свойств, а также взрывного действия новых взрывчатых веществ [1, 2], синтезируемых и изучаемых в группе энергетических материалов химического факультета университета Людвиг-Максимилиана. В данном случае рассматриваются несколько новых, полученных в последнее время и обладающих целым рядом положительных качеств первичных взрывчатых веществ. Эти вещества детально исследуются в плане их последующего практического применения в разного рода приложениях. В данной работе представлены результаты изучения таких иницирующих первичных взрывчатых веществ, как 4-диазо-2,6-динитрофенол (DDNP), 6-диазо-3-гидокси-2,4-динитрофенол (DHDNP), диазидоглиоксим (DAGL), кальций 5-нитриминотетразолат (CaNAT), калий 1,5-динитраминотетразолат (K2DNAT) и калий 1,1'-динитрамино-5,5'-бистетразолат (K2DNABT). Все эти вещества характеризуются рядом свойств, полученных на основании результатов низкотемпературной рентгеновской дифрактометрии, инфракрасной и рамановской спектроскопии, ядерной магнитно-резонансной спектроскопии, элементного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии, а также значениями их чувствительности к удару, трению и электрическому разряду. Молекулярные свойства рассмотренных взрывчатых веществ определялись для изолированных молекул и молекулярных комплексов с использованием методов квантовой химии, реализованных в программе Gaussian 09. Гибридный функционал B3LYP и базовый набор электронных функций 6-31+G(d) использовались в большинстве выполненных расчетов. Были рассчитаны все геометрические и энергетические характеристики этих объектов и определены основные первичные механизмы их разложения. Рассчитывались также их инфракрасные и рамановские спектры. Теплоты образования взрывчатых веществ рассчитывались с использованием метода полного базисного набора CBS-4M. Все параметры детонационных волн и уравнения состояния продуктов детонации в форме Джонса-Уилкинса-Ли определялись с использованием программы EXPLO5 V.6.02. Эти расчеты проводились для различных исходных плотностей взрывчатых веществ и для различных концентраций связующих добавок. Расчеты взрывного действия зарядов изучаемых веществ на преграды в различных условиях нагружения проводились с использованием программы ANSYS Autodyn. Для общего сопоставительного анализа использовались преграды из меди, а для сопоставления иницирующего действия различных первичных взрывчатых веществ рассматривались преграды из различных вторичных взрывчатых веществ, прежде всего, из гексогена. Проведен полный обобщающий анализ полученных результатов и выполнено их сравнение с аналогичными результатами, полученными для нескольких классических первичных взрывчатых веществ. На основании этого анализа даны рекомендации для практического использования новых, разработанных и исследованных

в университете Людвига-Максимилиана первичных взрывчатых веществ.

Литература

1. Golubev V. K., Klapötke T. M. Properties and exploding action of several explosive nitrates. Proceedings of the XIX International Seminar «New Trends in Research of Energetic Materials». Pardubice, Czech Republic. 2016. P. 546–554.
2. Голубев В. К., Клапётке Т. М. Физико-химические свойства и взрывное действие нескольких новых инициирующих взрывчатых веществ. Тезисы докладов XXVIII симпозиума «Современная химическая физика». Туапсе, 2016. С. 54.

DETONATING PROPERTIES AND INITIATING ACTION OF SEVERAL NEW PRIMARY EXPLOSIVES

V. K. Golubev^{1,2}, T. M. Klapötke²

¹Freelance, Nizhniy Novgorod, Russia

²Ludwig-Maximilian University, Munich, Germany

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

The work is a continuation of a series of studies of physical-chemical and detonation properties as well as exploding action of new explosives synthesized and studied in the Energetic Materials Team of the Department of Chemistry at Ludwig-Maximilian University [1, 2]. In this case several new primary explosives obtained lately and possessing a lot of good properties are considered. These substances are investigated in detail in the way of their subsequent practical application in all sorts of military and civilian applications. The results of a study of such primary explosives as 4-diazo-2,6-dinitrophenol (DDNP), 6-diazo-3-hydroxy-2,4-dinitrophenol (DHDNP), diazidoglyoxime (DAGL), calcium-5-nitraminotetrazolate (CaNAT), potassium 1,5-di(nitramino)tetrazole (K2DNAT) and potassium 1,1'-dinitramino-5,5'-bistetrazolate (K2DNABT) are presented in the paper. All these substances are characterized by a number of properties derived from the results of low-temperature X-ray diffraction, infrared and Raman spectroscopy, nuclear magnetic resonance spectroscopy, elemental analysis and differential scanning calorimetry as well as by the values of their sensitivity to shock, friction and electric discharges. Molecular properties of considered explosives were determined for isolated molecules and molecular units using quantum chemistry methods implemented in the Gaussian 09 computer program. The B3LYP hybrid functional and the 6-31+G(d) basis set of electron functions were used in most of performed calculations. All the geometric and energetic characteristics of these objects were calculated and the main primary mechanisms of their decomposition were determined. Their infrared and Raman spectra were calculated too. The heats of formation of the explosives were calculated using the CBS-4M method of complete basis set. All parameters of detonation waves and the equations of state for detonation products in the form of Jones-Wilkins-Lee were determined using the EXPLO5

V.6.02 program. Such calculations were performed for different initial densities of explosives and for various concentrations of binding additives. The calculations of exploding action of examined explosive charges on barriers under different loading conditions were conducted using the ANSYS Autodyn program. Copper barriers were used for a common comparative analysis, and the barriers of various secondary explosives, RDX first of all, were considered for the comparison of initiating action of different primary explosives. A complete comparative analysis of obtained results was conducted and their comparison was made with similar results obtained for several classic primary explosives. On the basis of this analysis, recommendations were made for the practical use of the new primary explosives developed and studied at Ludwig-Maximilian University.

References

1. Golubev V. K., Klapötke T. M. Properties and exploding action of several explosive nitrates. Proceedings of the XIX International Seminar «New Trends in Research of Energetic Materials». Pardubice, Czech Republic. 2016. P. 546–554.
2. Golubev V. K., Klapötke T. M. Physicochemical properties and exploding action of several initiating explosives. Abstracts of the XXVIII Symposium «Modern Chemical Physics». Туапсе, 2016. P. 54.

2-11

ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ВЗРЫВНОЕ ДЕЙСТВИЕ РЯДА НОВЫХ МОЩНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. К. Голубев^{1,2}, Т. М. Клапётке²

¹Независимый эксперт, Нижний Новгород, Россия

²Университет Людвига-Максимилиана, Мюнхен, Германия

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

Работа является продолжением серии исследований физико-химических и детонационных свойств, а также взрывного действия новых взрывчатых веществ [1, 2], синтезируемых и изучаемых в группе энергетических материалов химического факультета университета Людвига-Максимилиана. В данном случае рассматриваются наиболее мощные и стабильные вторичные взрывчатые вещества, полученные в последнее время. Эти вещества детально исследуются в плане их последующего практического применения в разного рода военных и гражданских приложениях. В работе представлены результаты изучения более 20 таких вторичных взрывчатых веществ. Это, например, бистетразолиламин (H₂ВТА), диаминоурониум 5-нитриминотетразолат (DAU-NiT), 1-амино-3-нитрогуанидин (ANQ), 1,7-диамино-1,7-динитримино-2,4,6-тринитро-2,4,6-триазагептан (APX), дигидроксиламмоний 5,5'-бистетразол-1,1 диолат (TKX-50), бис 3,3'-динитро-5,5'-бис-1,2,4-триазол-1,1'-диолат (MAD-X1), бис(гидразиниум) 4,4'-динитра-мино-3,3'-бифу-

разан ((Hy)₂DNABF), бис(3,4,5-тринитропиразолил)метан (BTNPM), бис(3,5-динитро-4-аминопиразолил)метан (BDNAPM), 5,5'-бис-(2,4,6-тринитрофенил)-2,2'-би-(1,3,4-оксадиазол) (TKX-55) и некоторые другие взрывчатые вещества. Все эти вещества характеризуются рядом свойств, полученных на основании результатов низкотемпературной рентгеновской дифрактометрии, инфракрасной и рамановской спектроскопии, ядерной магнитно-резонансной спектроскопии, элементного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии, а также значениями их чувствительности к удару, трению и электрическому разряду. Молекулярные свойства рассмотренных взрывчатых веществ определялись для изолированных молекул и молекулярных комплексов с использованием методов квантовой химии, реализованных в программе Gaussian 09. Гибридный функционал B3LYP и базовый набор электронных функций 6-31+G(d) использовались в большинстве выполненных расчетов. Были рассчитаны все геометрические и энергетические характеристики этих объектов и определены основные первичные механизмы их разложения. Рассчитывались также их инфракрасные и рамановские спектры. Теплоты образования взрывчатых веществ рассчитывались с использованием метода полного базисного набора CBS-4M. Все параметры детонационных волн и уравнения состояния продуктов детонации в форме Джонса-Уилкинса-Ли определялись с использованием программы EXPLO5 V.6.02. Эти расчеты проводились для различных исходных плотностей взрывчатых веществ, а в некоторых случаях и для различных концентраций связующих добавок. Расчеты взрывного действия зарядов изучаемых веществ на преграды в различных условиях нагружения проводились с использованием программы ANSYS Autodyn. Для общего сопоставительного анализа рассматривались преграды из меди, а в некоторых случаях использовались также преграды из разных материалов в широком диапазоне изменения их динамических свойств. Проведен полный сопоставительный анализ полученных результатов и выполнено их сравнение с аналогичными результатами, полученными для нескольких классических вторичных взрывчатых веществ, таких как RDX, HMX, HNS и CL-20. На основании этого анализа даны рекомендации для практического использования новых разработанных и исследованных в университете Людвига-Максимилиана мощных вторичных взрывчатых веществ.

Литература

1. Golubev V. K., Klapötke T. M. Comparative analysis of TKX-50, MAD-X1, RDX and HMX blasting performance in one-, two- and three-dimensional geometry. Proceedings of XVII International Seminar «New Trends in Research of Energetic Materials». Pardubice, Czech Republic, 2014. P. 220–227.
2. Голубев В. К., Клапётке Т. М. Физико-химические и детонационные свойства и взрывное действие новых мощных высокоазотистых взрывчатых веществ TKX-50, MAD-X1 и APX. Тезисы докладов международной конференции

«XII Забавихинские научные чтения». Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 2014. С. 81–82.

DETONATING PROPERTIES AND EXPLODING ACTION OF A NUMBER OF NEW POWERFUL EXPLOSIVES

V. K. Golubev^{1,2}, T. M. Klapötke²

¹Freelance, Nizhniy Novgorod, Russia

²Ludwig-Maximilian University, Munich, Germany

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

The work is a continuation of a series of studies of physical-chemical and detonation properties as well as exploding action of new explosives synthesized and studied in the Energetic Materials Team of the Department of Chemistry at Ludwig-Maximilian University [1, 2]. In this case the more powerful and stable secondary explosives obtained lately are considered. These substances are investigated in detail in the way of their subsequent practical application in all sorts of military and civilian applications. The results of a study of more than 20 of such secondary explosives are presented in the paper. They are bistetrazolylamine (H₂BTA), diaminouronium 5-nitriminotetrazolate (DAU-NiT), 1-amino-3-nitro-guanidine (ANQ), 1,7-diamino-1,7-dinitrimino-2,4,6-trinitro-2,4,6-triazaheptane (APX), dihydroxylammonium 5,5'-bistetrazole-1,1'-diolate (TKX-50), bis 3,3'-dinitro-5,5'-bis-1,2,4-triazole-1,1'-diolate (MAD-X1), bis(hydrazinium) 4,4'-dinitramino-3,3'-bifurazane ((Hy)₂DNABF), бис(3,4,5-тринитропиразолил)метан (BTNPM), бис(3,5-динитро-4-аминопиразолил)метан (BDNAPM), 5,5'-бис(2,4,6-тринитрофенил)-2,2'-би(1,3,4-оксадиазол) (TKX-55) and some other explosives. All these substances are characterized by a number of properties derived from the results of low-temperature X-ray diffraction, infrared and Raman spectroscopy, nuclear magnetic resonance spectroscopy, elemental analysis and differential scanning calorimetry as well by the values of their sensitivity to shock, friction and electric discharges. Molecular properties of considered explosives were determined for isolated molecules and molecular units using quantum chemistry methods implemented in the Gaussian 09 computer program. The B3LYP hybrid functional and the 6-31+G(d) basis set of electron functions were used in most of performed calculations. All the geometric and energetic characteristics of these objects were calculated and the main primary mechanisms of their decomposition were determined. Their infrared and Raman spectra were calculated too. The heats of formation of the explosives were calculated using the CBS-4M method of complete basis set. All parameters of detonation waves and the equations of state for detonation products in the form of Jones-Wilkins-Lee were determined using the EXPLO5 V.6.02 program. Such calculations were performed for different initial densities of explosives and in several cases for various concentrations of binding additives. The calculations of exploding action of examined explosives charges on barriers under different

loading conditions were conducted using the ANSYS Autodyn program. Copper barriers were used for a common comparative analysis, and in the several cases, the barriers of various materials in a wide range of changing dynamical properties were considered too. A complete comparative analysis of obtained results was conducted and their comparison was made with similar results obtained for several classic secondary explosives such as RDX, HMX, HNS and CL-20. On the basis of this analysis, recommendations were made for the practical use of the new powerful secondary explosives developed and studied at Ludwig-Maximilian University.

References

1. Golubev V. K., Klapötke T. M. Comparative analysis of TKX-50, MAD-X1, RDX and HMX blasting performance in one-, two- and three-dimensional geometry. Proceedings of XVII International Seminar «New Trends in Research of Energetic Materials». Pardubice, Czech Republic, 2014. P. 220–227.
2. Golubev V. K., Klapötke T. M. Physicochemical and detonation properties and explosive action of new powerful high-nitrogen explosives TKX-50, MAD-X1 and APX. Abstracts of International Conference «XII Zababakhin Scientific Talks». Snezhinsk: RFNC – VNIITF, 2014. P. 81–82.

2-12

АНАЛИЗ РАВНОВЕСНОЙ ОГРАНКИ КРИСТАЛЛОВ ВВ ПО ДАННЫМ СОВМЕЩЕННОГО ТЕОРЕТИКО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

А. В. Станкевич, А. Н. Грецова, Б. Г. Лобойко,
О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов

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

Морфология и форма кристаллов определяет многие свойства порошков ВВ, в том числе и технологические. Исследовательские возможности современных экспериментальных и расчетных методик все в большей степени позволяют приблизиться к пониманию природы формирования той или иной петрографической системы кристаллов ВВ.

В данной работе приведен совмещенный теоретико-экспериментальный анализ равновесной огранки кристаллов некоторых ВВ. Определены основные морфометрические характеристики: ориентировка молекулярных фрагментов, относительные размеры граней, габитус, равновесный форм-фактор, а также и петрографические характеристики. Теоретические расчеты выполнены квантовыми методами в рамках теории функционала плотности с учетом правила Браве и классическими методами BFDH и TTDN. Экспериментальные исследования проводились методами оптической и электронной микроскопии для различных полиморфных модификаций ВВ.

ANALYZING THE EQUILIBRIUM CUTTING OF EXPLOSIVE CRYSTALS ACCORDING TO THE DATA OF THE COMBINED THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY

A. V. Stankevich, A. N. Gretsova, B. G. Loboilko,
O. V. Kostistyn, N. P. Taibinov

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

Morphology and shape of crystals determines many properties of powdered explosive materials including technological ones. Capabilities of the up-to-date experimental and simulation techniques allow us to increasingly understand the nature how a certain petrographic HE crystal system is formed.

This paper presents the combined theoretical and experimental analysis of the equilibrium cutting of certain HE crystals. Basic morphometric characteristics are determined, i.e. orientation of molecular fragments, relative sizes of crystal faces, habitus, the equilibrium form-factor, as well as petrographic characteristics. Quantum methods were used for theoretical computations in the framework of the density functional theory with the regard for the Bravais rule just as classical BFDH-, and TTDN-methods. Experiments used the optical and electronic microscopy to study different polymorphous modifications of explosive materials.

2-13

ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА МЕТАЛЛОВ

О. Б. Дреннов

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

Рассмотрена экспериментальная схема по нагружению плотноупакованного пакета металлических пластин косою ударной волной. В опытах зарегистрирована потеря устойчивости плотноупакованной контактной границы. Периодические волнообразные возмущения формируются при развитии неустойчивости Кельвина–Гельмгольца за время ударноволнового разворота контактной границы. За фронтом ударной волны за счет развития интенсивных пластических деформаций происходит кратковременное разрушение вещества, обусловленное гетерогенным характером деформирования. Реализуется значительный (~до 4 мм/мкс), но кратковременный (~до 0,2 мкс) градиент скорости вещества вдоль границы раздела, что, в свою очередь, порождает рост возмущений. Конечная амплитуда и длина волн возмущений определяется шириной разрушенного слоя, участвующего в пластическом течении.

OBLIQUE WAVE IMPACT ON METALS INTERFACE

O. B. Drennov

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

This work presents experimental scheme of close-packed package of metallic plates by oblique shock wave. Experiments registered the loss of contact boundary stability. Periodical wavy perturbations are formed with the development of Kelvin–Helmholtz instability within the time of shock-wave rotation of contact boundary. At the cost of intensive plastic deformations, behind shock front, one observes short-time matter softening, which is conditioned by heterogeneous deformation character. There is a realization of sufficient (\sim up to 4 mm/ μ s), but short-term (\sim up to 0.2 μ s) substance velocity gradient along interface that in its turn generates perturbation growth. The final amplitude and length of perturbation waves are determined by the width of softened layer that participates in plastic flow.

2-14

О МЕТАНИИ ТРУБОК И ПЛАСТИН ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВВ

В. Ю. Давыдов, А. С. Губин,
Ф. С. Загрядцкий, М. Н. Терещенко

Научно-исследовательский машиностроительный институт
им. В. В. Бахирева, Москва, Россия

E-mail: vitadavidov@yandex.ru

Целью настоящей работы является изучение метания в осевом и радиальном направлении тел из различных материалов, осуществляемое при детонации ВВ, в том числе содержащих дисперсный алюминий. Методом рентгено-импульсной съемки [1] измерены скорости взрывного метания трубок с внутренним диаметром 20 мм и толщиной 2 мм, а также пластин диаметром 20 мм и толщиной 2 мм, изготовленных из стали 45 и меди М1. Полученные результаты сравнивали с ранее полученными данными [2] для термообработанной стали 45.

Было установлено, что для трубок длиной 40 мм, наполненных флегматизированным гексогеном ФГ, повышение пластичности стали (сталь без термообработки) приводит к повышению скорости трубок на 25%. При этом скорость пластин изменяется в противоположном направлении – снижается на 3%. Для трубок, наполненных смесью ФГ с 10% Al (ФГА-10) повышение скорости трубок при использовании пластичной стали составило 15%, а скорость пластин не изменилась.

Эффект от добавки Al по скорости метания трубок для пластичной стали снижается более, чем в 2 раза

(с + 17% [2] до +8%). В то же время, абсолютные значения скоростей метания трубок, наполненных ФГА-10 для пластичной стали на 7% выше, чем для термообработанной стали. При увеличении длины трубки из стали 45 в 3 раза (с 40 мм до 120 мм), скорость трубок наполненных ФГ возрастает на 6%, а для трубок, наполненных ФГА-10 на 3%. Эффект от добавки Al по скорости метания трубок при увеличении их длины дополнительно снизился и составил $\leq 6\%$.

Замена стали на медь приводит к снижению скорости трубок длиной 120 мм на 3–4%, однако энергия метаемых трубок возрастает в различных сечениях на 10–14%. Эффект от добавки Al по скорости метания медных трубок снизился до нуля.

Таким образом, изменение физико-механических свойств материала метаемых трубок и пластин существенно влияет на энергию взрыва, передаваемую в осевом и радиальном направлениях.

Литература

1. Давыдов В. Ю., Губин А. С. // Химическая физика. 2011. Т. 30, № 8. С. 44-51.
2. Давыдов В. Ю., Козмерчук В. В., Мурышев Е. Ю., Голловлев И. Д. // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 3. С. 96–99.

ON DIFFERENT MATERIAL TUBES AND PLATES ACCELERATION, PRODUCED BY EXPLOSIVES

V. Y. Davydov, A. S. Goubin,
F. S. Zagryadtskiy, M. N. Tereshchenko

Bakhyrev Research Institute of Mechanical Engineering,
Moscow, Russia

E-mail: vitadavidov@yandex.ru

The aim of present work is to study the explosive acceleration in axial and radial directions of bodies with different physical and mechanical properties, produced by detonation of explosives, including dispersed Al-containing explosives. The accelerations of tubes, having internal diameter 20 mm and 2 mm thick and plates, having 20mm diameter and 2 mm thick, made of steel 45 and copper M1, were measured by flash x-ray radiography [1]. The results were compared with previously received data for heat-treated steel 45 [2].

It was revealed, that for tubes 40mm long, filled by phlegmatized RDX (RDXph) the increase of steel plasticity (steel without heat-treatment) led to enhance of tube velocities by 25%. At the same time, the plate velocities change in the contrary direction – it decreased by 3%. For the tubes, filled by RDXA-10 the increase of tube's velocities consisted 15% and plate's velocities did not change.

The Al addition effect on tube's velocities for plastic steel decreases more than 2 times (from 17% to 8%). At the same time, absolute values of velocities for tubes, filled by RDXA-10 for plastic steel by 7% higher, than for heat-treated steel. The Al effect on plate velocities, which

consisted -3% [2], for steel 45 without heat-treatment consisted 0%.

Replacement of steel by copper led to decrease of tube velocities by 3–4%, but tubes energy increased by 10–14% in different sections of the tube. The Al addition effect on tube's velocities (compared to steel tubes) decreased to zero. Thus the change of physical and mechanical properties of accelerated tubes and plates essentially influence on the explosion energy transferred to axial and radial directions, including the part of dispersed Al burning energy transformed in acceleration job.

References

1. Davydov V. Y., Goubin A. S. / *KhymicheskayaFyzyka*, 2011, Vol. 30, No 8, pp.44–51. (in Russian)
2. Davydov V. Y., Kozmerchouk V. V., Mourishev E.Yu., Golovlev I. D // *Combustion, Detonation and Shock Waves*, 1988, Vol. 24, No 3, pp. 124–128. (in Russian)

2-15

СТРУКТУРА ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ В НИЗКОПЛОТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

А. П. Ершов, Э. Р. Прууэл, Н. П. Сатонкина,
А. О. Кашкаров, И. А. Рубцов,
А. С. Юношев, А. В. Пластинин

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

Измерены профили скорости границ раздела между зарядом взрывчатого вещества (ВВ) и инертным окном из полиметилметакрилата с применением двух диагностик: оптической VISAR и электромагнитного метода. Для электромагнитных измерений применен малогабаритный датчик с рабочим плечом площади около 0,5 мм², что близко к площади пятна VISAR. Это позволило фиксировать не только осредненное течение, но и флуктуации, вызванные дисперсной структурой заряда. Магнитное поле создавалось импульсной одноразовой катушкой Гельмгольца. Результаты обоих методов находятся в разумном согласии.

Исследованы три ВВ: гексоген, октоген и тэн при плотностях, близких к плотности естественной свободной засыпки. Результаты демонстрируют важность размера частиц ВВ. Для мелкодисперсных материалов (размер частиц десятки мкм) получены довольно гладкие профили с явным пиком Неймана. В штатных крупнодисперсных ВВ (сотни мкм) также мог наблюдаться химпик, с повышенным уровнем шума, что естественно следует из существенно хаотического характера течения в резко неоднородной среде. В части экспериментов с крупнодисперсными ВВ вместо классических профилей Зельдовича – Неймана – Деринга наблюдались резкие колебания сигнала

ла вокруг уровня, приблизительно соответствующего состоянию Чепмена – Жуге. Такие необычные результаты могут указывать на неклассический механизм распространения детонации. В зарядах с заметной долей пустот вероятен, в частности, конвективный механизм за счет фильтрации струй газа по порам (взрывное горение по А. Я. Апино). Могут существовать и переходные варианты. Например, детонация может переключаться с ударной на струйную моду и назад в одном и том же заряде.

DETONATION FRONT STRUCTURE IN LOW DENSITY EXPLOSIVES

A. P. Ershov, E. R. Prueel, N. P. Satonkina,
A. O. Kashkarov, I. A. Rubtsov,
A. S. Yunoshev, A. V. Plastinin

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

Velocity histories of the interface between the high explosive and an inert polymethyl methacrylate window were measured using two diagnostics, i. e. VISAR and electromagnetic method. For electromagnetic measurements a small gauge was used of working area (about 0.5 mm²) which was close to that of the VISAR spot. As a result, both the average flow and the pulsations produced by the porous structure of the charges could be registered. The magnetic field was produced by the expendable Helmholtz coil. The results of both methods were in reasonable agreement.

Three high explosives were tested: RDX, HMX and PETN at initial densities around those of natural loose-packed ones. Importance of the explosive grain size is demonstrated. In fine grained materials (several tens of micrometers) quite smooth profiles were obtained, with the pronounced von Neumann spikes. In the commercial coarse grained explosives (several hundreds of micrometers) the spike was also possible, but the noise level was higher, which is a natural consequence of the chaotic flow in a heterogeneous medium. In some experiments with coarse explosives violent pulsations were observed around the Chapman – Jouguet level instead of the classical chemical spike. Such unusual records can indicate a non-classical propagation mechanism. For the charges in which the volume fraction of voids is substantial, a convective mechanism based on the penetration of the gas jets through the pores (explosive burning suggested by A. Ya. Apin). There may exist also transitional variants, e.g. the detonation might switch from the shock-driven to convective mode and vice versa in the same charge.

2-16

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ
БЕНЗОТРИФУРОКСАНА**

А. П. Ершов^{1,2}, Н. П. Сатонкина^{1,2},
И. А. Рубцов^{1,2}, Э. Р. Прууэл^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mail: snp@hydro.nsc.ru

В сохраненных продуктах детонации конденсированных взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом найдены разные модификации углерода – графит, алмаз, аморфная форма. Средний размер отдельных частиц порядка единиц нм. Для БТФ характерен значительно больший размер частиц – десятки нм. Так как ранее наблюдалась корреляция электропроводности и содержания углерода, можно было ожидать, что при детонации БТФ распределение электропроводности будет сильно отличаться от распределения при детонации других ВВ. БТФ имеет и другую особенность – в его составе нет водорода, поэтому в продуктах детонации ВВ нет воды, диссоциацией которой на ионы ранее объяснялась электропроводность за фронтом детонации [1].

Разработанным ранее методом высокого разрешения получено распределение электропроводности при детонации БТФ. Профиль резко неоднороден, максимальное значение составило около 15 1/(Ом см), в волне Тейлора $\sigma \approx 0,5$ 1/(Ом см). Эти величины близки к полученным для ВВ обычного состава (CHNO). Таким образом, показано, что вода или водород не являются определяющими для электропроводности.

Литература

1. Антипенко А. Г., Дремин А. Н., Якушев В. В. О зоне электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ // Доклады АН СССР, 1975. Т. 225, № 5. С. 1086–1088.

**SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRIC
CONDUCTIVITY AT THE DETONATION OF
BENZOTRIFUROXANE**

A. P. Ershov, N. P. Satonkina, I. A. Rubtsov, E. R. Prueel

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

E-mail: asnp@hydro.nsc.ru

Various modifications of carbon – graphite, diamond, and amorphous forms were found in the solid detonation products of condensed explosives of negative oxygen

balance. The typical size of the individual carbon particles usually is about several nanometers. Benzotrifuroxane (BTF) differs in that since it produces significantly larger particles, around tens of nanometers.

Previous observations have shown the correlation between electric conductivity and carbon content in high explosives. One might expect that the distribution of the electrical conductivity in the detonation wave of BTF will be quite different from that in other detonating explosives. BTF has one more distinctive feature: it does not contain any hydrogen in its molecule. Therefore the detonation products of BTF do not contain water which was supposed to explain the electrical conductivity behind the detonation front [1].

A high resolution method developed previously was applied to measure the distribution of electric conductivity in the detonating BTF of about 1.9 g/cc initial density. The conductivity profile is highly heterogeneous. The maximum value behind the shock was around 15 1/(Ohm cm), while in the rarefaction Taylor wave the conductivity was about 30 times less. These values are close to those obtained for conventional explosives of the usual CHNO composition like RDX or HMX. Thus, it was shown that hydrogen and water are not critical to conductivity.

References

1. Antipenko A. G., Dremmin A. N., Yakushev V. V. About conductivity zone in the detonation of condensed explosives // Doklady AN SSSR, 1975. V. 225, № 5. P. 1086–1088.

2-17

**ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЕТРАНИТРАТА
ПЕНТАЭРИТРИТА, СОДЕРЖАЩЕГО
НЕПРОЗРАЧНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ,
ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ
ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ МОЩНОСТИ**

А. С. Зверев, А. Ю. Митрофанов, Н. Н. Ильякова,
А. В. Ханефт, А. Г. Кречетов, А. В. Тупицын

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
Кемерово, Россия

Энергетические материалы это важный инструмент достижения широкого круга прикладных задач от добычи минерального сырья, строительства и оборонной промышленности до медицинского применения. Вопрос безопасности использования энергетических материалов является приоритетным для всех видов применения. Наличие чувствительных энергетических материалов в устройствах инициирования является источником основных рисков. Таким образом, поиск путей применение исключительно низкочувствительных энергетических материалов представляет огромный интерес для исследования. Лазерное инициирование энергетических материалов может решить эту задачу. Основной проблемой для реализации лазерного инициирования энергетических

материалов является их прозрачность для лазерного излучения. Самым распространенным подходом к решению этой проблемы является введение в объем энергетического материала светопоглощающих частиц (горячих точек). Примером таких добавок могут служить сажа (углерод) и нанодисперсные порошки металлов. Другой подход заключается в нанесении на поверхность энергетического материала тонкой непрозрачной пленки взрываеваемой лазером.

В настоящей работе представлены исследования инициирования тетранитрата пентаэритрита (ТЭН) лазерным излучением основной частоты YAG:Nd, работающего в режиме модулированной добротности, и волоконного квазинепрерывного иттербиевого лазера. Образцы ТЭНа были сенсибилизированы добавкой в объем материала технического углерода и наноалюминия. В независимости от источника лазерного излучения зависимость пороговой энергии зажигания от концентрации добавки имеет вид кривой с минимумом. Возрастание пороговой энергии зажигания в области больших концентраций добавки связано с возрастанием показателя экстинкции и уменьшением толщины поджигаемого слоя до величин недостаточных для инициирования всего образца. Также было обнаружено влияние способа гомогенизации композиций, содержащих технический углерод, на их пороговую энергию зажигания наносекундными лазерными импульсами.

Исследовано зажигание двухкомпонентной системы, из тонкого слоя оксида меди (II) нанесенного на поверхность таблетки ТЭНа, излучением волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1070 нм, длительностью 20 мс и плотностью мощности 3,6 кВт/см². Было обнаружено, что образование экзотермическая реакционная зона не всегда приводит к инициированию всего образца. Разработана аналитическая модель, описывающая инициирование реакции экзотермического разложения в поверхностном слое образца. Эффективность инициирования взрыва уменьшается с увеличением толщины поглощающего слоя.

INITIATION OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE CONTAINING OPAQUE INCLUSIONS BY VARYING POWER LASER PULSES

A. S. Zverev, A. Y. Mitrofanov, N. N. Ilyakova,
A. V. Khanef, A. G. Krechetov, A. V. Tupitsyn

Kemerovo State University, Russia

Energetic materials are an important tool to solve a wide range of tasks, from extraction of mineral raw materials and construction to medical use. The issue of energetic materials safety using is priority for all kinds of application. Presence of sensitive energetic materials in initiating devices is the cause of major risk. Laser initiation of energetic materials can solve this problem. The key problem of laser initiation of energetic materials is their transparency to laser radiation. Commonly this problem

is solved by the introduction of intensively absorbing particles into the material. Initiation of energetic materials due to laser light action on an opaque film adjacent to the energetic material is an alternative solution.

This paper presents the study of pentaerythritol tetranitrate (PETN) initiation due laser radiation of Q-switched YAG:Nd laser. PETN samples were prepared by addition of carbon black, nanosized aluminum. Regardless of the source of laser the threshold ignition energy as a function of additive concentration is a function with minimum. The increase of the ignition energy threshold at high concentrations of the additive due to the increase in the extinction index decreases the thickness of ignited layer to a value insufficient to initiate the entire sample. It has also been found to influence of method of homogenization on the ignition threshold energy by nanosecond laser pulses composites containing carbon black.

Laser ignitability of a two-component system constituted of a copper (II) oxide layer and a PETN tablet was studied. An ytterbium fiber laser with 1070 nm wavelength, 20 ms pulse duration and 3.6 kW/cm² power density was used. The threshold of launching of exothermic reaction as a function of the light absorbing coating layer thickness was studied. An analytical model describing the initiation of the exothermic decomposition reaction in the surface layer of the sample was developed. The effectiveness of the initiation of the explosion decreases with the increase in the thickness of the absorbing layer.

2-18

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЖИГАНИЯ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ МОДЕЛЬНЫХ ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ

Д. П. Касымов, В. П. Зима

Национальный Исследовательский Томский
государственный университет, Томск, Россия

E-mail: denkasymov@gmail.com

Исследование путей возникновения, распространения и тушения природных пожаров по-прежнему актуально из-за огромных экологических и экономических потерь. Как показывают исследования, пожары на смешанной природно-урбанизированной территории первоначально возникают в растительных комплексах. Без знания механизма перехода того или иного типа пожара различной интенсивности на торфяники и постройки, выполненные, в частности, из древесины, невозможно разработать систему оценки степени риска и инструменты для снижения потерь при этих пожарах.

В работе приводится краткое описание испытательного комплекса, методика проведения исследований по воздействию модельного низового лесного пожара слабой интенсивности на образцы торфа и на

образцы древесины, часто встречающиеся при строительстве деревянных конструкций в населенных пунктах. Экспериментально исследован процесс заглупления фронта тления в слой торфа различного ботанического состава, типичного для Томской области. В результате лабораторных исследований с использованием термопарного метода получены и проанализированы зависимости изменения температуры в массе образцов торфа от времени, а также оценены скорости тления в горизонтальной и вертикальной плоскости. Проанализирован механизм распространения тления по поверхности торфа. В качестве методики измерения использованы методы ИК-термографии. Новизной данного подхода является возможность получить распределение поля температуры на поверхности исследуемого образца торфа с высоким пространственным и временным разрешением. Используя программное обеспечение по работе с тепловизором, были получены графики распределения температуры на поверхности исследуемого образца для различных временных интервалов при воздействии локального источника зажигания в виде спирали накаливания, расположенной под ним. Полученные на данном этапе данные могут быть в дальнейшем использованы для определения горизонтальной скорости распространения фронта торфяного пожара в зависимости от внешних условий среды. Экспериментально исследовано воздействие очага горения на плоские и оцилиндрованные образцы из березы и сосны термопарным методом и методом ИК-диагностики.

Полученные экспериментальные результаты позволяют более целенаправленно проводить исследования в области пожарной безопасности и соответственно создавать новые приборы и методы борьбы с природными пожарами различной интенсивности.

Литература

1. Grishin A. M., Zima V. P., Kuznetsov V. T., Filkov A. I. Testing system for the simulation of forest, steppe and peat fires. Patent RF, no. 237/220, 27.10.2009 (in Russian).

LABORATORY INVESTIGATION OF NATURAL MATERIALS IGNITION BY MODEL HEARTH OF BURNING

D. P. Kasymov, V. P. Zima

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: denkasymov@gmail.com

Studying the initiation, propagation and suppression of wildfires is still an urgent problem due to huge environmental and economic losses. The studies show that wildland–urban interface fires initially appear in plant complexes. The lack of knowledge of the mechanism for the transition of different type fires with a different intensity on peatlands and wood constructions does not allow a risk assessment system and tools to be developed to reduce the losses during these fires. The paper provides a brief description of the test complex [1] and an experi-

mental procedure for the study of a model ground wildfire with a weak intensity acting on peat and wood samples. The penetration of the smouldering front into the peat layer was experimentally studied depending on the different botanical peat composition. The laboratory tests using the thermocouple method allowed the temperature of peat samples to be obtained and analyzed as a function of time, as well as the smouldering rate to be estimated in the horizontal and vertical planes. The mechanism for the propagation of smouldering over the surface of peat was analyzed. The infrared thermography methods were used as a measurement method. The novelty of this approach is the possibility to obtain the temperature field distribution on the surface of peat samples with a high spatial and temporal resolution. The data obtained at this stage can be used to determine the horizontal rate of the peat fire front propagation, depending on the external conditions of the environment. The combustion source acting on the flat and cylinder-shaped samples of birch and pine was experimentally investigated using the thermocouple method and the infrared diagnostic technique. The experimental results obtained allow the fire safety investigations to be conducted more specifically and, thus, new tools and methods to be developed for fighting of wildfires with a different intensity.

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16-38-00190, No. 15-01-00513_a).

References

1. Grishin A. M., Zima V. P., Kuznetsov V. T., Filkov A. I. Testing system for the simulation of forest, steppe and peat fires. Patent RF, no. 237/220, 27.10.2009 (in Russian).

2-19

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНЫХ ВВ НА ОСНОВЕ ТЭНА И ГЕКСОГЕНА В МАЛЫХ ДИАМЕТРАХ ПО ДАННЫМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ

А. О. Кашкаров^{1,3}, Э. Р. Прууэл^{1,3}, К. А. Тен¹,
И. А. Рубцов^{1,3}, К. М. Просвирнин²,
А. Н. Киселёв², И. Э. Косолапов²

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

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

³ФГБОУ ВПО «Новосибирский национальный
исследовательский государственный университет»,
Новосибирск, Россия

E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

В работе приводятся результаты исследования распространения детонации в пластичных ВВ на основе тэна и гексогена 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. Использование нового детектора проходящего излучения позволило улучшить временное разрешение, по сравнению с ранними работами авторов, в 4 раза до 0,124 мкс между кадрами.

Детонационные характеристики определялись для цилиндрических зарядов диаметрами: 5, 10 и 15 мм. Ширина луча синхротронного излучения составляет примерно 16 мм, что позволяет контролировать симметричность распространения детонации по заряду и подробно регистрировать разлет продуктов детонации вблизи поверхности исходного образца.

**DETONATION CHARACTERISTICS
OF PLASTIC EXPLOSIVES BASED ON PETN
AND RDX AT SMALL DIAMETERS OF CHARGES
ACCORDING TO THE SYNCHROTRON
DIAGNOSTICS EXPLOSIVE PROCESSES**

A. O. Kashkarov^{1,3}, E. R. Prueel^{1,3}, K. A. Ten¹,
I. A. Rubtsov^{1,3}, K. M. Prosvirnin²,
A. N. Kiselev², I. E. Kosolapov²

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics (LIH SB RAS),
Novosibirsk, Russia

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

³Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia
E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

We present the recent results of study the propagation of detonation plastic explosives based on PETN and RDX obtained using the synchrotron diagnostics explosive processes. The method allows measuring the distribution of mass on the beam of synchrotron radiation passing through the experimental assembly along the charge with spatial resolution of 0.1 mm. The use of the new detector of the transmitted radiation made it possible to improve the temporal resolution compared to earlier works by authors in 4 times up to 0.124 microsecond between frames.

The detonation characteristics of the explosives were measured for cylindrical charges of diameters: 5, 10 and 15 mm. At the same, the beam width is 16 millimeters. This allowed us to monitor the symmetry of propagation of detonation in the charge and to register the expansion of the detonation products near the sample surface in detail.

2-20

**ЗАВИСИМОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕВЫХ ЛИТЬЕВЫХ
ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ ОТ СОДЕРЖАНИЯ
И СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ**

Ю. М. Милёхин, В. Н. Куликов, А. А. Матвеев,
А. Н. Осавчук, Н. И. Шишов

Федеральное государственное унитарное предприятие
«ФЦДТ «Союз»», Дзержинск, Россия
E-mail:soyuz@fcdt.ru

Многокомпонентные литые взрывчатые составы (ВС) разрабатываются и широко используются в различных отраслях народного хозяйства и в военной технике [1–4]. Их основными компонентами являются: бризантное ВВ, металлическое горючее, окислитель и полимерное связующее. Известно, что они являются детонационноспособными и данный процесс в подобных системах является неидеальным – для него характерно наличие увеличенной в сравнении с индивидуальным ВВ зоны реакции и догорание компонентов вне нее [1–3, 5]. В связи с этим исследование детонационных характеристик (скорость детонации, критический диаметр, чувствительность к ударно-волновому возбуждению) ВС являются актуальной задачей, как с научной точки зрения, так и с практической.

В работе приведены результаты исследований по определению влияния на значения детонационных характеристик ВС типа и содержания компонентов – ВВ, алюминиевого порошка с размером частиц ≈ 5 мкм, окислителя – перхлората аммония (ПХА) с размером частиц, в основном, 160–315 мкм, активного или инертного связующего. Скорость детонации (D_{exp}) ВС в эксперименте регистрировали с помощью непрерывной фотографии процесса на отвержденном заряде диаметром (d), равном 40 мм, на участке $2,5-7 d$ и сопоставляли с расчетной скоростью для идеального варианта процесса. Определение критического диаметра и давления ударно-волнового возбуждения ($P_{\text{кр}}$) составов проведено по ГОСТ.

Проведенные экспериментальные исследования детонационных свойств многокомпонентных ВС показывают, что значения их характеристик (особенно D_{exp}) зависят от типа и содержания компонентов. Полученные зависимости скорости детонации от рецептурных параметров позволят в дальнейших исследованиях прогнозировать свойства взрывчатых композиций различного назначения, а также быть полезными при создании теоретической модели детонационного процесса в подобных системах.

Литература

1. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970. – 164 с.
2. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е, в 2 т. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.

3. М. Б. Талавар, Р. Сивабалан, М. Анниппан, Г. М. Горе, С. Н. Астана, Б. Р. Гандхе. Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов // Физика горения и взрыва, 2007. Т. 43. № 1. С. 72–85.
4. Энергетические конденсированные системы / Под ред. Академика Б.П. Жукова – Москва, «Янус-К», 1999.
5. А. А. Матвеев, В. Н. Куликов, А. Н. Осавчук, Н. И. Шишов Исследование влияния содержания алюминия и окислителя в многокомпонентных литеввых системах на их взрывчатые характеристики и дробящее действие / Горение и взрыв. Выпуск 6 / Под ред. С. М. Фролова. – М.: ТОРУС ПРЭСС, 2013. С. 297–301.

**DEPENDENCE OF DETONATION
CHARACTERISTICS OF MIXED CAST
EXPLOSIVE COMPOSITIONS
ON THE CONTENT AND PROPERTIES
OF THE COMPONENTS**

Yu. M. Milekhin, V. N. Kulikov, A. A. Matveev,
A. N. Osavchuk, N. I. Shishov

Federal State Unitary Enterprise «FCDT «Soyuz»»,
Dzerzhinsky, Russia
E-mail: soyuz@fcdt.ru

Composite cast explosive compositions (EC) are developed and widely used in various spheres of national economy and military technology [1–4]. Their main components are: high explosive, metallic fuel, oxidizer and polymer binder. It is known that they are detonable, and this process in such systems is not perfect – it is characterized by the presence of extended, in comparison with a singlecomponent explosive, reaction zone and by the afterburning of components outside of it [1–3, 5]. In this connection detonation characteristics studies (detonation velocity, critical diameter, sensitivity to shock wave excitation) of explosives are a crucial task, both from a scientific and practical perspective.

The work lists the results of research on the effects of the type and components content on the explosive detonation characteristics values – explosives, aluminum powder with particle sizes: ≈ 5 micron, oxidant – ammonium perchlorate (AP) with particle sizes, mostly 160...315 μm , active or inert binder. EC detonation velocity (D_{exp}) during the experiment was recorded using continuous photography of the process on at the cured charge of diameter (d) 40 mm, at 2.5...7 (d) region and compared it with the calculated velocity for the perfect version of the process. Determination of critical diameter and pressure of shock wave excitation (P_{cr}) of compositions is held according to the State Standard.

Conducted experimental research of composite EC detonation properties indicates that their properties values (especially D_{exp}) depend on the type and content of the components. Obtained dependencies of detonation velocity on formulation parameters allow to predict the properties of explosive compositions in further research of various purposes, and also be useful when creating theoretical model of detonation process in such systems.

References

1. Dremnin A. N., Savrov S. D., Trofimov V. S., Shvedov K. K. Detonation waves in condensed media. Moscow, Nauka, 1970. (in Russian)
2. Physics of explosion / L. P. Orlenko (ed). – 2 vol. – Moscow, Fizmatlit, 2002. (in Russian)
3. М. В. Талавар, Р. Сивабалан, М. Анниппан, Г. М. Горе, С. Н. Астана, Б. Р. Гандхе. New trends in development of promising high-energy materials // FGV, 2007. vol. 43. No 1. pp. 72-85. (in Russian)
4. High-energy condensed systems / B. P. Zhukov (ed.). Moscow, Yanus-K, 1999. (in Russian)
5. А. А. Матвеев, В. Н. Куликов, А. Н. Осавчук, Н. И. Шишов. Influence of aluminum and oxidizer content in multi-component cast systems on explosive properties and shattering effect / Горение и взрыв. Iss. 6 / S. M. Frolov (ed). – Moscow, TORUS PRESS, 2013. pp. 297–301. (in Russian)

2-21

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ
ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛЕ
С ЛИНЕЙНЫМ РАСШИРЕНИЕМ**

А. В. Фёдоров, Т. А. Хмель, С. А. Лаврук

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

E-mail: lavruks@mail.ru

В работе исследовалось распространение волны гетерогенной детонации в канале с постепенным расширением, заполненном стехиометрической смесью алюминиевых частиц и кислорода. Плоская детонационная волна (режим ЧЖ) инициируется в левой части канала, исследуется дальнейшее ее распространение в канале с расширением. Диаметр частиц варьировался в диапазоне ($d_p = 0,5\text{--}3,5$ мкм). Угол расширения канала изменялся от 15° до 60° .

Для исследования используется математическая модель двухскоростной, двухтемпературной континуальной модели механики реагирующих многофазных сред. Горение алюминия описывается приведенной реакцией, инициируемой по достижении критической температуры, которая учитывает неполное сгорание частиц. Переход от диффузионного к кинетическому режиму горения частиц алюминия описывался степенной зависимостью времени горения от диаметра частиц вида $d^{0,3}$ на интервале $500 \text{ нм} < d < 3,5$ мкм.

В ходе моделирования распространения детонации были получены ее различные режимы распространения, а именно: закритический (с непрерывным распространением детонации), критический (с частичным срывом и реинициацией детонационной волны) и докритический (с полным срывом детонации). Проведен анализ волновых картин и сравнение с аналогичными течениями при распространении ударных и детонационных волн в газах. Анализируется влияние формирующихся на фронте поперечных волн на распространение и срыв детонации.

Так же было рассмотрено влияние основных факторов, таких как ширина канала, угол расширения и диаметр частиц. Построены карты режимов в плоскости параметров: ширина канала, угол расширения для различных диаметров частиц. Параметры, влияющие на распространение детонации были нанесены на карту режимов течения и график максимального давления.

Работа была поддержана Российским научным фондом (№16-19-00010).

PROPAGATION OF HETEROGENEOUS DETONATION WAVE IN A LINEAR EXTENSION CHANNEL

A. V. Fedorov, T. A. Khmel and S. A. Lavruk

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

E-mail: lavruks@mail.ru

In this study the heterogeneous detonation wave propagation was investigated in channels with the linear extension, which was filled with stoichiometric mixture of aluminum particles and oxygen. Detonation plane (CJ type) was initiated at the left side of the calculation domain and regimes of further propagation was studied. In this paper the diameter of the particles was varying in submicron range ($d_p = 0.5\text{--}3.5 \mu\text{m}$). Angle extension value was varied in the range from 15° to 60° .

The mathematical model is based on the concept of a two-velocity two-temperature continuum of the mechanics of heterogeneous media. Aluminum combustion is described as a reduced reaction initiated after the particle achieves a critical temperature that accounts for incomplete particle combustion. The transition from diffusion to kinetic regime of aluminum particle combustion was taken into account with burning time power dependence on particle diameter as $d^{0.3}$ in the interval $500 \text{ nm} < d < 3.5 \mu\text{m}$.

During simulation following detonation regimes of propagation were determined: the supercritical regime (with a continuous propagation of detonation), the critical regime (with a partial failure and detonation re-initiation) and the subcritical (with a complete detonation failure). Flow pattern of the detonation was analyzed and comparison with similar flows of the shock waves and detonation waves in pure gas phase were done. Influence of the transverse waves on the leading front propagation and detonation failure was analyzed

The effects of the main factors such as channel width, angle of extension and diameter of particles were investigated too. Detonation regime maps were presented in planes channel width – angle of extension for different particles diameters. Parameters that influence on detonation propagation were plotted on detonation regime map and plot of maximum pressures.

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant №16-19-00010).

2-22

ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ТРЕХМЕРНЫХ КАНАЛАХ ЗА СЧЕТ ЭНЕРГИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА

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

Научно-исследовательский институт механики МГУ
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: markov@mi.ras.ru

Представлены результаты численного исследования формирования детонации в трехмерных сверхзвуковых потоках горючей газовой смеси за счет ее кинетической энергии. Иницирование детонации в потоке происходит без объемного подвода энергии от внешних источников. Расчеты выполнены на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов». Исследование проводится модифицированным методом С. К. Годунова, реализованном в оригинальном программном комплексе, предназначенном для решения широкого круга одномерных, двумерных и трехмерных задач нестационарной динамики газообразных горючих смесей. Рассматривается пропановоздушная смесь, горение которой описывается одностадийной кинетикой.

Рассмотрены течения в трехмерных каналах нескольких различных конфигураций. Исследован процесс формирования детонации в трехмерном канале, входное сечение которого является прямоугольником, через который поступает комбинированный сверхзвуковой поток. Одна часть потока – стехиометрическая пропановоздушная смесь, другая – воздух. На некотором расстоянии от входного сечения располагается уступ, перекрывающий часть канала и продолжающийся вниз по потоку, образуя канал меньшего поперечного сечения.

Представлены результаты расчетов в трехмерном канале квадратного поперечного сечения, изменяющегося по гармоническому закону в продольном направлении. Согласно расчетам, при недостаточной скорости потока наблюдается эффект запирания и движения детонационной волны ко входному сечению благодаря тепловыделению.

В случае винтового канала эллиптического сечения обнаружен режим стационарной детонации, формирующейся вблизи поверхности канала.

Проведено исследование течения в цилиндрическом канале с набором из семи криволинейных лопастей. Сечения лопастей плоскостями, перпендикулярными оси канала, являются параболическими, а ненулевой угол наклона лопастей к набегающему потоку обеспечивается равномерным «вращением» парабол при перемещении вдоль канала. Изучены процессы при различных скоростях набегающего потока U . Найдены два критических значения скорости – U_1 и U_2 . При $U < U_1$ детонации нет. При $U_1 < U < U_2$ формируется нестационарная детонация, распространяющаяся ко входному сечению канала. При $U > U_2$ возникает течение со стационарной детонацией.

**FORMATION OF DETONATION
IN THREE-DIMENSIONAL CHANNELS DUE
TO THE ENERGY OF A SUPERSONIC FLOW**

V. A. Levin, I. S. Manuylovich, V. V. Markov

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

E-mail: markov@mi.ras.ru

The results of numerical investigation of detonation formation in three-dimensional supersonic flows of combustible gas mixture are presented. The initiation of detonation in the flow occurs without energy input from outside sources, but due to kinetic energy of the flow. The calculations were performed on supercomputer of Moscow State University «Lomonosov». The study was carried out using modified method of S. K. Godunov, implemented in the original software package designed to solve a wide range of one-, two- and three-dimensional problems of unsteady dynamics of gaseous fuel mixtures. A mixture of air and propane is considered, combustion of which is described by single-stage combustion kinetics.

Three-dimensional flows in channels of several different configurations are considered. The process of detonation formation in three-dimensional channel of rectangular inlet cross section, through which combined supersonic stream flows, is investigated. One part of the stream is formed by stoichiometric mixture of air and propane, the other – by the air. At some distance from the inlet section a step is located, which overlaps a part of the channel and is extended downstream to form a smaller cross section channel.

The results of calculations in three-dimensional channel of square cross section with harmonically varying size in the longitudinal direction are presented. According to the calculations, for insufficient flow velocity the locking effect is observed and the detonation wave moves to the input cross section due to heat release.

In the case of helical channel with elliptical cross section stationary detonation mode is discovered, emerging near the surface of the channel.

A study of the flow in a cylindrical channel with a set of seven curved blades was conducted. The sections of blades by planes perpendicular to the axis of the channel are parabolic, and a non-zero angle of the blades to the incoming flow is provided by uniform «rotation» of parabolas with simultaneous moving along the channel. The processes at different flow velocities U were analyzed. Two critical values of velocity – U_1 and U_2 – were found. For $U < U_1$ no detonation occurs. When $U_1 < U < U_2$, unsteady detonation propagating to the inlet cross section of the channel is generated. For $U > U_2$ the flow with stationary detonation arises.

2-23

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТРЕХМЕРНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ
ДЕТОНАЦИИ**

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

Научно-исследовательский институт механики МГУ
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: markov@mi.ras.ru

Сформулирована задача, моделирующая процесс инициирования и сгорания смеси в трехмерной детонационной волне, вращающейся в пространстве между коаксиальными цилиндрами. Сформулирована модель инициирования детонации подводом энергии, и в последующих численных экспериментах выбраны необходимые для формирования вращающейся детонации параметры инициатора. Инициатор позволяет выбирать направление вращения. Реализована система подачи смеси в камеру сгорания, учитывающая соотношение давления в резервуаре и статического давления в камере сгорания на входе в нее. Проведен цикл расчетов, позволивший получить оптимальные значения параметров инициаторов вращающейся детонации. Проведено численное исследование параметров нестационарного потока при вращении волны детонации в камере сгорания при подаче горючей смеси по всему ее торцу.

Установлено, что в камере сгорания формируется вращающаяся детонационная волна, направление вращения которой задается расположением зоны энергосделения инициатора относительно продольной твердой стенки, которая исчезает (сгорает) за определенное время.

С целью исследования поведения вращающейся детонации при изменении условий подачи смеси в камеру сгорания рассмотрены два процесса с линейными законами убывания термодинамических параметров в резервуаре с покоящейся горючей смесью – один при уменьшающемся давлении и постоянной температуре, а второй – при убывающей температуре и постоянном давлении. Установлено, что при изменяющихся со временем параметрах торможения горючей смеси в камере сгорания формируется вращающаяся детонационная волна. Согласно расчетам, при переменном давлении в резервуаре вращающейся детонация существует до момента времени, когда давление торможения в резервуаре становится равным критическому значению. Таким образом, установлено существование минимального критического давления торможения, при котором вращающаяся детонация прекращается. В случае переменной температуры оказалось, что в течение длительного времени вращающаяся детонация не прекращается.

В обоих случаях получены зависимости от времени газодинамических параметров в 11 точках камеры сгорания и получены данные, позволяющие построить поля газодинамических параметров в различные

моменты времени. По значениям полного давления вычислены средние за период колебаний величины, необходимые для определения прироста полного давления по сравнению с давлением в резервуаре.

Полученные графики зависимости газодинамических параметров от времени показывают, что процесс имеет сложный периодический колебательный характер. Согласно расчетам, максимумы и минимумы статического и полного давления в контрольных точках внутри камеры сгорания существенно изменяются со временем в колебательном режиме.

Полученные значения отношения полного давления к давлению торможения, усредненные по периоду колебаний, плавно колеблются в обоих случаях в течение всего процесса вращения волны детонации. При уменьшающемся давлении в резервуаре усредненное по периоду отношение полного давления к давлению торможения в целом немного возрастает со временем от $1,3 \pm 0,07$ до $1,5 \pm 0,06$.

При убывающей температуре в резервуаре усредненное по периоду отношение полного давления к давлению торможения существенно зависит от времени и возрастает от $1,3 \pm 0,07$ до $1,83 \pm 0,17$. Среднее значение этого отношения в течение всего расчета колеблется, причем частота и амплитуда колебаний изменяются. Результаты расчетов указывают на возможность значительного дальнейшего увеличения усредненного значения отношения полного давления к давлению торможения.

NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL ROTATING DETONATION

V. A. Levin, I. S. Manuylovich, V. V. Markov

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

E-mail: markov@mi.ras.ru

The problem of rotating detonation initiation and combustion of mixture in a three-dimensional rotating detonation wave confined in the space between two coaxial cylinders is formulated. The model of detonation initiation by energy supply is formulated, and in subsequent numerical experiments the necessary initiator parameters are selected for the formation of rotating detonation. Initiator allows to select the direction of rotation. The system of mixture injection into the combustion chamber is implemented, taking into account the ratio of reservoir pressure and the static pressure in the combustion chamber near the inlet of the chamber. The series of calculations were carried out, which provided optimal parameters of rotating detonation initiators. A numerical investigation of unsteady flow parameters during rotation of the detonation wave in the combustion chamber is conducted when injecting combustible mixture around its whole end.

It was found that rotating detonation wave is formed in the combustion chamber and the direction of rotation is given by the location of the energy initiator zone relative

to the longitudinal solid wall, which disappears (burns) for certain time.

In order to study the behavior of rotating detonation under changing conditions of mixture injection into the combustion chamber, two processes were considered with a linear decrease of the thermodynamic parameters in the reservoir with a stationary fuel mixture – one with decreasing pressure and constant temperature, and the second – with decreasing temperature and constant pressure. It was found that under time varying stagnation parameters of combustible mixture the rotating detonation wave is formed in the combustion chamber. According to calculations, for variable pressure in the reservoir the rotating detonation exists until the moment when the total pressure in the reservoir becomes equal to the critical value. Thus, the existence of minimum critical total pressure at which the detonation stops rotation was discovered. In the case of variable temperature, it turned out that rotating detonation does not stop for a long time.

In both cases, the dependencies of gas dynamic parameters were obtained for 11 points inside the combustion chamber and the data were received to construct fields of gas-dynamic parameters at different time moments. Total pressure values were used to calculate the average values for the period of oscillations, required for the determination of total pressure growth compared with the pressure in the reservoir.

The resulting plots of gas-dynamic parameters' dependence on time show that the process is complicated, periodic and oscillatory. According to calculations, the highs and lows of the static and total pressure at the control points within the combustion chamber substantially change over time in an oscillatory mode.

The obtained values of ratio between the total pressure and the stagnation pressure, averaged over the period of oscillation, also oscillate smoothly in both cases during the process of detonation wave rotation. For decreasing pressure in the reservoir, the ratio of averaged over the period total pressure to the overall stagnation pressure increases slightly with time from 1.3 ± 0.07 to 1.5 ± 0.06 .

For decreasing temperature in the reservoir, the ratio of averaged over the period total pressure to stagnation pressure substantially depends on time and increases from 1.3 ± 0.07 to 1.83 ± 0.17 . The average value of this ratio during the whole calculation oscillates, wherein the frequency and amplitude of oscillation vary. The calculation results indicate the possibility of a significant further increase in the average value of the ratio of the total pressure to the stagnation pressure.

2-24

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРОТИЛОВЫХ ЭКВИВАЛЕНТОВ ФУГАСНОГО ВВ И ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ

С. И. Карачинский, О. В. Костицын, Б. Г. Лобойко,
И. А. Мальгин, С. А. Мартынюк, О. А. Тимофеев

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

Описаны постановка и результаты опытов, проведенных во взрывной яме, заполняемой контрольным грунтом, с целью определения тротилового эквивалента фугасного ВВ по соотношению объемов воронок выброса грунта для зарядов равной массы и по зависимостям объема воронок выброса от массы зарядов ВВ, а также тротилового эквивалента взрывчатых смесей, применяющихся для сварки металлов взрывом, по теплоте взрыва и по интенсивности воздушной ударной волны в ударной трубе взрывного действия. Результаты исследований используются при разработке взрывных устройств различного назначения, а также при производстве работ по сварке взрывом крупногабаритных биметаллических заготовок.

METHODS AND RESULTS OF DETERMINING TNT EQUIVALENTS OF HIGH EXPLOSIVES AND EXPLOSIVE COMPOSITIONS FOR EXPLOSION WELDING OF METALS

S. I. Karachinsky, O. V. Kostitsyn, B. G. Loboiko,
I. A. Malgin, S. A. Martynyuk, O. A. Timofeev

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

Consideration is given to experimental setups and results of experiments performed in an explosion pit filled with the soil having known characteristics to determine TNT equivalent of high explosives using such parameters as explosion craters versus similar-mass charges, explosion craters versus different-mass HE charges and versus TNT equivalents of explosive compositions used for explosion welding of metals, and also versus explosion heat and air shock-wave intensity in the explosive-driven shock tube. Investigation results are used to develop low-sensitive explosive devices for different applications, as well as for explosion welding operations with large-scale bimetal blanks.

2-25

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ВВ МАЛОГО РАЗМЕРА

О. А. Зимоглядова¹, Л. А. Мержиевский^{2, 1}

¹Новосибирский государственный
технический университет, Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

Современные представления о стационарной детонации взрывчатых веществ (ВВ) основываются на гидродинамической модели Михельсона–Чепмена–Жуге (МЧГ) и ее развитии – модели Зельдовича–Неймана–Дёринга (ЗНД). Принципиальными в данных моделях являются гипотезы о стационарности процессов и о плоском фронте детонационной волны. В лабораторных условиях при экспериментальном исследовании особенностей протекания детонационных явлений зачастую используются заряды ВВ относительно малых диаметров и длин, в которых эти гипотезы могут нарушаться (например, [1]). В данной работе численно моделируется процесс детонации цилиндрических зарядов малого диаметра и различной длины из взрывчатых веществ Comp В, ТНТ и ТАТБ. Для моделирования используется пакет ANSYS AUTODYN 17.0. В расчетах использовались различные варианты уравнений состояния и кинетика Ли–Тарвера с уточненными по тестовым расчетам параметрами. Анализируется процесс выхода детонационной волны на стационарный режим по скорости детонации и формированию устойчивой кривизны фронта детонации. В тех случаях, когда это возможно, результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными.

Литература

1. Распределение плотности во фронте детонации цилиндрических зарядов малого диаметра / К. А. Тен, О. В. Евдоков, И. Л. Жогин и др. // Физика горения и взрыва. 2007. т. 43. № 2. С. 91.

NUMERICAL ANALYSIS FOR DETONATION CHARACTERISTICS OF SMALL-SIZE HIGH EXPLOSIVES

O. A. Zimoglyadova¹, L. A. Merzhievsky^{2, 1}

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk,
Russia

Currently available concepts of high explosive (HE) stationary detonation are based on Michelson–Chapman–Jouget hydrodynamic model and its evolution, Zeldovich–Nemann–Dering model. Crucial in these models are hypotheses for the process stationarity and plane front of the detonation wave. In laboratory conditions, HE charges of relatively small diameters and lengths are most often used while investigating the detonation phenomena characteristics, when these hypotheses can be broken down (as

exemplified by [1]). This paper presents the detonation process numerical simulation for the Comp B, TNT, and TATB cylindrical charges of small diameters and different length. The simulation is carried out with the ANSYS AUTODY 17.0 package. Different versions of EOS and Lee–Tarver kinetics with the parameters specified as part of payroll simulation were used in the calculations. The process when the detonation wave goes into the stationary mode is analyzed by the detonation velocity and formation of the steady detonation-front curvature. The calculation results are compared to the experimental data where possible.

References

1. Density Distribution at the Detonation Front of Cylindrical Charges of Small Diameter / K. A. Ten, O. V. Evdokov, I. L. Zhogin, V. V. Zhulanov, P. I. Zubkov, G. N. Kulipanov, L. A. Lukanichikov, L. A. Merzhievsky, B. Ya. Pirogov, E. R. Prueel, V. M. Titov, B. P. Tolochko, M. A. Sheromov // *Fizika Goreniya i Vzryva*. – 2007. – Vol. 43. – No 2. – P. 91. (in Russian)

2-26

РОЛЬ РЕАКЦИИ ОТРЫВА ВОДОРОДА В ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Ю. Митрофанов¹, А. С. Зверев¹, Н. Н. Ильякова¹,
С. В. Лузгарев¹, М. В. Костянко¹, Г. Г. Гарифзянова,
Р. В. Цышевский, М. М. Кукля

¹ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
Кемерово, Россия

Комплексное экспериментальное и теоретическое исследование фотоиндуцированного разложения энергетического материала на примере ТЭНа, содержащего 0,2% фенантренхинона (ФХ) показывает, что фотокаталитическое разложение энергетических материалов является эффективным способом контролируемого инициирования реакции взрывного разложения [1]. Вторая гармоника Nd: YAG лазера (2,33 эВ), к которому исходные образцы ТЭНа являются прозрачными достаточно нечувствительными, может быть использована для возбуждения молекулы фенантренхинона в композитных образцах ФХ-ТЭН из основного состояния в высоко реакционноспособное триплетное $3(n, \pi^*)$ состояние. После этого триплетно возбужденный ФХ отрывает атом водорода из молекулы ТЭНа с энергией активации 0,42 эВ. Перенос водорода сопровождается немедленной потерей группы NO_2 . Экзотермическая реакция протекает с выделением энергии 1,63 эВ, что достаточно, для термического разложения соседних молекул ТЭНа в основном состоянии с помощью разрыва O- NO_2 связи, на который требуется ~1,5 эВ [2, 3]. Наша теоретически предложенная концепция и первые молекулярные квантово-химические расчеты были тщательно

проверены путем моделирования и экспериментально. Периодические DFT расчеты кристаллов ТЭНа, содержащих дефекты (в данном случае молекулу светочувствительной добавки) подтвердили предложенный фотокаталитический механизм разложения. Экспериментально измеренные спектры подтвердили предсказанные особенности спектров оптического поглощения и энергии электронных переходов в образцах ФХ-ТЭН в то время как DFT расчеты помогли интерпретировать природу переходов. Вероятностные взрыва кривые лазерного инициирования, зарегистрированные в зависимости от плотности энергии лазерного излучения на образце, подтверждают тенденцию к снижению пороговой энергии, необходимой для инициирования взрыва при добавлении фоточувствительного ФХ в образцы ТЭНа.

Литература

1. Tsyshevsky, R.; Zverev, A. S.; Mitrofanov, A. Yu.; Ilyakova, N. N.; Kostyanko, M. V.; Luzgarev, S. V.; Garifzianova, G. G.; Kuklja, M. M. Role of hydrogen abstraction reaction in photocatalytic decomposition of high energy density materials *J. Phys. Chem. C* 2016, 120(43), 24835–24846.
2. Oxley, J. C.; Smith, J. L.; Brady IV, J. E.; Brown, A. C. Characterization and Analysis of Tetranitrate Esters. *Propellants Explos. Pyrotech.* 2012, 37, 24–39.
3. Tsyshevsky, R. V.; Sharia, O.; Kuklja, M. M. Thermal Decomposition Mechanisms of Nitroesters: Ab Initio Modeling of Pentaerythritol Tetranitrate. *J. Phys. Chem. C* 2013, 117, 18144–18153.

THE ROLE OF HYDROGEN ABSTRACTION REACTION IN PHOTOCATALYTIC DECOMPOSITION OF HIGH ENERGY DENSITY MATERIALS

A. Y. Mitrofanov¹, A. S. Zverev¹, N. N. Ilyakova¹,
S. V. Luzgarev¹, M. V. Kostyanko¹, G. G. Garifzianova,
R. V. Tsyshevsky, M. M. Kuklja

¹Kemerovo State University, Russia

A combined experimental and theoretical study of photo induced decomposition of a high energy density material PETN containing 0.2% of PQ additives shows that the photocatalytic decomposition of energetic materials is an efficient way to trigger an explosive reaction in a controllable way [1]. The second harmonic of the Nd:YAG laser irradiation (2.33 eV), to which the pristine PETN samples are transparent and indifferent, can be used to excite the PQ molecule in the PQ-PETN composite samples from its ground state to highly reactive triplet $3(n, \pi^*)$ state. Once excited, the PQ triplet abstracts hydrogen from the PETN molecule with the activation barrier of 0.42 eV. The hydrogen transfer is followed by an immediate loss of the NO_2 group. The exothermic reaction proceeds with the energy release of 1.63 eV, which is sufficient to induce thermal decomposition of neighbor PETN molecules in its ground state via the conventional cleavage of the O- NO_2 bond that

requires ~ 1.5 eV [2, 3]. Our theoretically proposed concept and initial (probing) molecular quantum chemical calculations were carefully validated by both modeling and experiments. DFT periodic calculations of PETN crystals containing defects (in this case, a photosensitive molecular impurity) confirmed the suggested photocatalytic decomposition mechanism. Experimental spectral measurements corroborated the predicted optical absorption spectra features and the energies of electronic transitions in PQ-PETN samples while DFT calculations helped to interpret the nature of the transitions. The explosion probability curves registered at laser excitation as a function of laser energy density deposited to the samples verified the trends in the energy threshold reduction needed to trigger explosions when photosensitive PQ is added to PETN samples.

References

1. Tsyshevsky, R.; Zverev, A. S.; Mitrofanov, A. Yu.; Ilyakova, N. N.; Kostyanko, M. V.; Luzgarev, S. V.; Garifzianova, G. G.; Kuklja, M. M. Role of hydrogen abstraction reaction in photocatalytic decomposition of high energy density materials *J. Phys. Chem. C* 2016, 120(43), 24835–24846.
2. Oxley, J. C.; Smith, J. L.; Brady IV, J. E.; Brown, A. C. Characterization and Analysis of Tetranitrate Esters. *Propellants Explos. Pyrotech.* 2012, 37, 24–39.
3. Tsyshevsky, R. V.; Sharia, O.; Kuklja, M. M. Thermal Decomposition Mechanisms of Nitroesters: Ab Initio Modeling of Pentaerythritol Tetranitrate. *J. Phys. Chem. C* 2013, 117, 18144–18153.

2-27

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ФОТОНОВ ЧЕРЕЗ ПОРОШКОВОЕ ВЕЩЕСТВО

А. Э. Муханов¹, Д. Б. Рогозкин^{1,2}

¹ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия
²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия

E-mail: mukhanov@vniia.ru

Дискретные модели переноса излучения в рассеивающих средах дают согласующиеся с экспериментом результаты. Одной из таких моделей, позволяющей определить количество световой энергии, отразившейся от среды и прошедшей через нее, является модель стопы. Однако в этой модели невозможно получить информацию о распределении поглощенной энергии внутри среды. Указанная проблема в настоящей работе решается численным моделированием методом Монте-Карло распространения светового луча в среде, которая сформирована из случайно расположенных и ориентированных выпуклых многогранников. Учитываются процессы отражения и преломления на идеальных границах частиц и объемное поглощение в них по закону Бугера. Подобное моделирование поз-

воляет определить распределение поглощенной энергии в порошке ТЭНа при лазерном воздействии на него. В полученных распределениях энергии внутри среды наблюдаются области, которые характеризуются аномально большим числом поглощенных фотонов. При больших энергиях лазерного воздействия эти области сильно разогреваются, что может сильно ускорить тепловое разложение в тэне. Таким образом, при лазерном воздействии на ТЭН могут возникать «горячие точки», прогорающие за времена не более индукционного периода при лазерном иницировании детонации. Проведенные расчеты позволяют построить физический механизм разогрева порошка ТЭНа при воздействии лазерных импульсов больших энергий с длинами волн в области слабого поглощения.

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF PROPAGATION OF OPTICAL PHOTONS THROUGH A POWDER MEDIUM

A. E. Mukhanov¹, D. B. Rogozkin^{1,2}

¹Dukhov Research Institute for Automatics, Mosov, Russia
²National Research Nuclear University «MEPh», Russia

E-mail: mukhanov@vniia.ru

Discrete models of radiative transfer in scattering media yield the results which are in agreement with experimental data. The Stokes multilayer method is one of widely used approaches to determining the energy distribution between transmitted and reflected fluxes of light. However this method is unsuitable to obtain information about the absorbed energy distribution inside the medium. In this report this problem is solved with Monte-Carlo simulation of light propagation in the medium composed of randomly placed and oriented convex polyhedra. The simulation includes both the photon refraction and reflection on the ideal boundaries of polyhedra and absorption within them by Beer's law. The simulation enables us to determine the absorbed energy distribution inside PETN powder during laser irradiation. The nonuniform spatial distribution of the absorbed energy results in the appearance of anomalously hot sites inside the powder. In the case of laser pulses of high energy such sites can be heated so much that the thermal decomposition of PETN can be accelerated drastically. Thus, under laser irradiation the hot sites can burn out during the time that is lesser than the excess transit time measured in the experiments on laser initiation of detonation. Our simulation enables us to suggest a physical mechanism that could explain PETN powder heating under irradiation by laser pulses of high energy with the wavelength falling into the low-absorption region of the powder.

2-28

**СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТОГО
РАЗЛОЖЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ
ВВ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ
ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ И УГЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СПЕКТРОФОТОХРОНОГРАФА
ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Н. В. Нелюбина,
И. Ю. Лисков, Г. М. Белокуров

Институт углехимии и химического материаловедения
Федерального исследовательского центра угля и углехимии
СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

В работе показано, что при лазерном воздействии (1064 нм, 14 нс) спектры свечения, регистрируемые во время импульса, зависят от плотности энергии и в пределе при значительном превышении порога имеют одинаковые кинетики и полосы свечения с максимумом при $\lambda = 420$ нм для всех исследованных композитных материалов. Во время импульса лазерного излучения в нагретом слое, окружающем включение, инициируется экзотермическая химическая реакция, которая ведет к разложению молекулы ТЭНа на первичные радикалы, которые могут нести избыточную энергию. По-видимому, свечение одного из таких возбужденных продуктов реакции и наблюдается в исследуемом спектральном диапазоне. Таким образом, наблюдаемое свечение имеет хемилуминесцентную природу. Можно предположить, что излучение связано малыми молекулами, обладающими меньшим числом степеней свободы, нежели большие осколки молекулы ТЭНа, которые с большей вероятностью разменивают энергию на тепло, тем самым инициируя дальнейшее развитие химической реакции.

Наиболее вероятно, что наблюдаемое свечение связано с возбужденными молекулами диоксида азота NO_2 , являющегося одним из первичных продуктов реакции, возникающей в «горячей точке», которая представляет собой нагретую частицу металла и окружающую его оболочку ТЭНа, нагретую выше температуры плавления за время лазерного импульса в результате теплопроводности.

Спектры свечения образцов на стадии взрывчатого разложения имеют тепловую природу. Определена температура продуктов взрыва для композитов тэн-Ал ($T=3400$ К), тэн-Fe ($T=3400$ К), тэн-Ni ($T=4300$ К), тэн-уголь ($T=3200$ К).

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-33-00510 мол_а.

**SPECTRAL AND KINETIC CHARACTERISTICS
OF THE EXPLOSIVE EXPANSION
OF COMPOSITES BASED ON ВВ WITH
INCLUSIONS OF ULTRAFINE PARTICLES
OF METALS AND COAL,
USING SPECTRAL STREAK CAMERA
UNDER LASER IRRADIATION**

B. P. Aduев, D. R. Nurmukhametov, N. V. Neljubina,
I. Yu. Liskov, G. M. Belokurov

Institute of Coal Chemistry and Material Science of Federal
research Center of coal and coal chemistry SB RAS,
Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

It is shown that by laser irradiation (1064 nm, 14 ns) luminescence spectra recorded during the pulse, depending on the energy density and the limit is significantly exceeded the threshold have identical kinetics and luminescence band with a maximum at $\lambda=420$ nm for all tested composite materials. During the laser pulse the heated layer surrounding the inclusion, the exothermic chemical reaction is initiated which leads to the degradation of PETN molecule on the primary radicals which may carry the excess energy. Apparently, one such luminescence excited reaction products and observed in the spectral range investigated. Thus, the observed glow of a chemiluminescent nature. It can be assumed that the radiation associated small molecules with fewer degrees of freedom than the larger fragments PETN molecules that heat energy transfer any more likely, thereby initiating a further development of the chemical reaction.

It is most likely that the observed glow associated with the excited molecules NO_2 nitrogen dioxide, which is one of the primary products of the reaction occurring in the «hot spot», which is a heated metal particle and the surrounding shell of PETN, heated up during the laser pulse melting temperature as a result of thermal conductivity.

The emission spectrum of the sample on the stage of explosive decomposition are thermal nature. To determine the temperature of the explosion products for PETN-Al composite ($T=3400$ K), PETN-Fe ($T=3400$ K), PETN-Ni ($T=4300$ K), PETN-coal ($T=3200$ K).

The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 16-33-00510 мол_а

2-29

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО
НАГРУЖЕНИЯ РЕЧНОГО ЛЬДА**

М. Ю. Орлов, Г. Н. Богомолов, Ю. Н. Орлова

Национальный Исследовательский Томский
государственный университет, Томск, Россия
Национальный исследовательский Томский
Политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: orloff_m@mail.ru

В настоящее время изучение поведения льда при взрывных нагрузках является крайне актуальной и сложной научной задачей. Это объясняется необходимостью развития северных территорий, борьбой с ледяными заторами на сибирских реках, увеличением добычи полезных ископаемых на Крайнем Севере, проектирование защит летательных аппаратов и т. д. Основная сложность заключается в том, что лед является сложнейшим природным материалом, свойства которого мало изучены в условиях динамических нагрузок.

В НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета более 25 лет ведутся поисковые научно-исследовательские работы, предметом исследования которых является состояние льда при ударных и взрывных нагрузках. Развита физико-математическая модель поведения льда при динамических нагрузках. Модифицирован численный метод расчета процессов ударного и взрывного нагружения. Одной из последних модификаций следует считать новый алгоритм расчета контактных и свободных поверхностей, позволяющий более точно описывать контактную поверхность между продуктами детонации и льдом. По инициативе сотрудников организована мобильная лаборатория «Взрывное разрушение природных материалов», цель которой является экспресс-анализ поведения природных материалов при взрывных нагрузках.

В работе проведено комплексное теоретико-экспериментальное исследование процесса взрывного нагружения речного ледяного покрова средней толщины. В экспериментальной части работы были проведены полномасштабные эксперименты по подрыву льда штатным эмульсионным ВВ. В теоретической части работы проведены параметрические исследования подрыва льда безоболочечным ВВ. Численно исследовано влияние глубины закладки и масса ВВ на разрушение ледяного покрова.

Результаты получены в виде фото/видео экспериментов, а также рассчитанных текущих и конечных конфигураций системы «ВВ – Лед – Вода».

Работа выполнена при поддержке РФФИ 16-38-00515 и ООО «КузбасСпецВзрыв».

RESEARCH OF RIVER ICE AT EXPLOSIVE LOADS

M. Yu. Orlov, G. N. Bogomolov, Yu. N. Orlova

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia

E-mail: orloff_m@mail.ru

Currently, the process of failure of ice under dynamic loading are still poorly understood. This can be explained by the complex structure of the ice, the presence of phase transitions, anomalous plastic properties, etc. Studying the behavior of ice under dynamic loading is necessary for the development of Russian territory in the Far North, the elimination of ice jams in Siberia, etc.

For a long time investigation on the dynamic loading of ice have been conducting at the National Research Tomsk State University. Software package for solving modern dynamic multicontact problems of solid mechanics have been developed by authors. Modern dynamic multicontact problems are tasks of deep penetration and perforation and explosion of homogeneous and multilayer structures. Lagrangian numerical method was modified by algorithm of splitting nodes and algorithm destruction of finite elements. The latest modification was improved algorithm for calculating the contact surfaces and free surfaces. The mobile laboratory «Explosive destruction of natural materials» was organized on the basis of Institute of Applied Mathematics and Mechanics at Tomsk State University in 2013.

In the current work complex theoretical and experimental study of explosive loading of river ice cover of medium thickness were carried out. In the experimental part of the work full-scale experiments to undermine freshwater ice by emulsion explosive was carried out. In the theoretical part of the work parametric studies of undermining the ice by shell-less explosive was investigated. Numerically the influence of the depth and weight of explosives for the destruction of the ice cover were investigated.

The results were obtained in the form of photos / videos of experiments, as well as the calculated final configuration of the system of «Explosive – Ice – Water». This work was supported by RFBR 16-38-00515 and «KuzbasSpetsVzryv» company.

2-30

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ С УЧЕТОМ ДЕТАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Ю. М. Ковалев, Е. Е. Пигасов

Южно-Уральский Государственный Университет
(Национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

E-mail: yum_kov@mail.ru, pigasovee@mail.ru

Применение моделей механики сплошных сред в различных отраслях науки и техники, с одной стороны, связано отсутствием в природе чистых веществ, что требует активного развития математических моделей многокомпонентных сред, достоверно описывающих физические процессы. С другой стороны, быстрое развитие современной вычислительной техники позволяет использовать более сложные математические модели, что может расширить круг решаемых с их помощью задач [1]. Адекватность математических моделей физическим процессам требует выполнения законов сохранения для смеси [2], а так же инвариантности относительно преобразований Галилея уравнений сохранения [3].

В данной работе реализован вычислительный алгоритм, основанный на инвариантной относительно преобразований Галилея модели двухкомпонентной среды газ-твердые частицы с учетом химических превращений [4]. Особенностью модели является использование детальных кинетических механизмов для описания процессов горения, что позволяет сохранять точность вычислений в широком диапазоне термодинамических параметров [5]. В работе оценено влияние частиц на распространение детонационных волн в метан-кислородных смесях.

Литература

1. Куропатенко В. Ф., Новые модели механики сплошных сред / В. Ф. Куропатенко // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 1. С. 74–92.
2. Ковалев Ю. М., Математический анализ уравнений сохранения двухфазных смесей / Ю. М. Ковалев, Е. А. Ковалева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2014. т. 7, № 2. С. 29–37.
3. Ковалев Ю. М., Математическая модель газозвеси с химическими превращениями в приближении парных взаимодействий / Ю.М. Ковалев, Е.Е. Пигасов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2014. т. 7, № 3. С. 40–49
4. Ковалев Ю. М., Анализ некоторых модификаций метода крупных частиц на примере исследования течений газозвесей/ Ю. М. Ковалев, Е. А. Ковалева, Е. Е. Пигасов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2015. Т. 7. № 3. С. 71–77.
5. Рябинин В.К., Математическое моделирование адиабатического периода индукции для метан-кислородных смесей в широком диапазоне начальных давлений и температур / Рябинин В. К., Ковалев Ю. М. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2013. Т. 6. № 1. С. 56–71.

**MATHEMATICAL MODELING
OF SHOCK-WAVE PROCESSES
IN MULTICOMPONENT MEDIA,
WITH CONSIDERING
THE DETAILED KINETIC MECHANISMS**

Yu. M. Kovalev, E. E. Pigasov

South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russia

E-mail: yum_kov@mail.ru, pigasovee@mail.ru

The use of continuum mechanics models in various branches of science and technology, due to the lack of pure substance, which requires the active development of mathematical models of multicomponent mediareliably describe the physical processes. On the other hand, the performance of modern computer technology allows the use of more sophisticated mathematical models that

can extend the range of solved problems with their help [1]. The adequacy of mathematical models of physical processes requires conservation laws for the mixture [2], as well as invariance under Galilean transformations conservation equations [3].

In this paper, the computational algorithm based on an invariant under Galilean transformations model two-component medium gas-solids based on chemical reactions is implemented [4]. A specialty of the model is the use of detailed kinetic mechanisms to describe the combustion processes that can save accuracy of calculations in a wide range of thermodynamic parameters [5]. The paper evaluated the impact of the inert solids in the dissemination of detonation waves in the methane-oxygen mixtures.

References

1. V. F. Kuropatenko, New models of continuum mechanics / V. F. Kuropatenko // Engineering journal of Physics. 2011. V. 84, No. 1. P. 74–92. (in Russian)
2. Yu. M. Kovalev, Mathematical analysis of conservation equations of two-phase mixtures / Yu.M. Kovalev, E.A. Kovaleva // Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming. 2014. V. 7, No. 2. P 29–37. (in Russian)
3. Yu. M. Kovalev, Mathematical model of the gas suspension with the chemical transformations in the pair interactions / Yu.M. Kovalev, E.E. Pigasov // Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming. 2014. V. 7, No. 3. P 40–49. (in Russian)
4. Yu. M. Kovalev, Analysis of some modifications of the method of large particles on the example of the study of flows of gas mixtures / Yu.M. Kovalev, E.A. Kovaleva, E.E. Pigasov // Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics. 2015. V. 7, No. 3. P. 71–77. (in Russian)
5. V. K. Ryabinin, Mathematical Modelling of Adiabatic Induction Period for Methane-Oxygen Mixtures in a Wide Range of Initial Pressure and Temperature / V.K. Ryabinin, Yu.M. Kovalev // Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming. 2013. V. 6, No. 1. P 56–71. (in Russian)

2-31

**ИМПУЛЬСНОЕ ФОТОВОЗБУЖДЕНИЕ
НИТРОПРОИЗВОДНЫХ АЗОТИСТЫХ
ГЕТЕРОЦИКЛОВ**

А. И. Поняев, Я. С. Глухова

Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет), Санкт-Петербург,
Россия

E-mail: ponyaev@technolog.edu.ru

Фотохромные вещества способны обратимо изменять окраску под действием света. Это свойство используется в системах записи и обработки информации, для защиты от светового и модуляции лазерного

излучения, в сенсорных устройствах и системах молекулярной электроники.

При импульсном фотовозбуждении *o*-нитротолуолов образуются короткоживущие окрашенные нитроновые кислоты и/или их анионы. Замещение одного из атомов водорода метильной группы нитротолуола основным гетероциклом, способным акцептировать протон, приводит к образованию окрашенных азамероцианинов, со спектром поглощения, сдвинутым в длинноволновую область, по сравнению с незамещенными соединениями. В ряду нитробензильных и нитронафтилметильных производных бензимидазола, бензоксазола и бензотиазола установлена схема фотопревращений и изучены спектрально-кинетические характеристики короткоживущих фотоиндуцированных форм. Изучены структурные факторы и факторы среды, влияющие на эффективность фотоокрашивания и время жизни окрашенной формы. Установлено, что константа скорости обесцвечивания окрашенных форм нафтилметильных производных на порядок меньше, чем у бензильных аналогов, что объяснено делокализацией заряда по более развитой хромофорной цепи. Скорость обесцвечивания окрашенных форм увеличивается с уменьшением полярности растворителя, что связано с увеличением доли нитроновых кислот в регистрируемой фотоиндуцированной форме. В этаноле повышение основности гетероциклического фрагмента сопровождается увеличением скорости обесцвечивания окрашенной формы и увеличением интенсивности фотоокрашивания. Аннелирование бензольного ядра одновременно к обоим фрагментам нитробензилпиридина открывает путь получения фотохромов с медленной обратной реакцией и широким интервалом фотоиндуцированной окраски при изменении pH, что допускает их использование в качестве сенсоров среды. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (16-08-01299-а).

FLASH PHOTOEXCITATION OF NITRO DERIVATIVES OF NITROGEN HETEROCYCLES

A. I. Ponyaev and Y. S. Glukhova

Saint-Petersburg State Institute of Technology
(Technical University), Saint-Petersburg, Russia

E-mail: ponyaev@technolog.edu.ru

Photochromic substances can reversibly change color when exposed to light. This property is used in the recording and information processing systems, for protection against light and modulating the laser light, in sensor devices and molecular electronics systems.

The short-life coloring nitronic acid and/or anions were formed by flash photoexcitation of the *o*-nitrotoluenes. Substituting one of the hydrogen atoms of the methyl group in the *ortho*-nitrotoluene by basic heterocycle, which capable of accepting a proton, leads to the formation of colored azamerocyanines, the spectrum absorption which shifted to longer wavelengths, compared to the unsubstituted compounds. Among nitrobenzyl and

nitronaphthylmethyl derivatives of benzimidazole, benzoxazole and benzothiazole established scheme of phototransformations and have been studied the spectral and kinetic characteristics of the short-lived photoinduced forms. The structural and environmental factors influence on the efficiency of photocoloring and lifetime photo-induced forms. It was found that the rate constant bleaching of colored shapes naphthylmethyl derivatives an order of magnitude less than that of benzyl analogs, that explained by delocalization charge along more advanced chromophore chain. The rate of discoloration of induced forms increases with decreasing polarity of the solvent, that is associated with an increase in the proportion of nitronic acids in registered photo-induced shape. More basicity of heterocyclic moiety is accompanied by an increase in the speed of discoloration of photoinduced form and increasing intensity photocoloring in the ethanol. Annellation benzene nucleus simultaneously to both nitrobenzylpyridine fragments give a chance to obtain the photochromes with slow back reaction and wide interval changes photo-induced color when pH changes, that allows their use as a sensor medium. This work was supported by RFBR grant (16-08-01299-a).

2-32

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

Т. Л. Празян, Ю. Н. Журавлев

Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

Email: Prazyan.tigran@yandex.ru, Zhur@kemsu.ru

Высокоэнергетические материалы в настоящее время имеют широкую область применения. Данные материалы подразделяются на твердые ракетные топлива, взрывчатые вещества, пороха. Сферами применения взрывчатых веществ (ВВ) могут выступать как военная промышленность, так и гражданская сфера. В последнее время большой интерес уделяется разработке и синтезу новых энергетических материалов с более эффективными разрушительными свойствами, но в то же время низкой чувствительностью к различного рода взаимодействиям.

Объектами исследования в настоящей работе представляются как уже изученные взрывчатые вещества, такие как $C_2N_4H_2O_3$ (β -NTO), $C_6N_{12}H_6O_{12}$ (ϵ -CL-20), $C_2N_4H_4O_4$ (FOX-7), $C_4N_8H_8O_8$ (HMX), CNH_3O_2 (NM), $C_5N_4H_8O_{12}$ (PETN), $C_3N_6H_6O_6$ (RDX), $C_6N_6H_6O_6$ (TATB), $C_7N_3H_5O_6$ (TNT), на которых производится отладка методики, а на новых $C_3N_5H_3O_4$ (A1), $C_4N_4H_6O_{12}$ (ETN), $C_6N_5H_3O_6$ (TNDP) – прогнозирование результатов.

Для расчета электронных свойств молекул и кристаллов ВВ использовались экспериментальные

данные. Для изолированных из кристаллов молекул проведена оптимизация геометрии для последующего изучения их физических свойств. Исследование осуществлялось с использованием программного пакета CRYSTAL14, методом линейной комбинации атомных орбиталей (ЛКАО) и теорией функционала плотности (DFT). Оптимизация параметров решетки кристалла FOX-7 осуществлялась с использованием пакета Quantum ESPRESSO.

Определены свойства энергетических материалов (физические и химические дескрипторы), которые достаточно точно коррелируют с параметрами детонации и факторами чувствительности в молекулах или кристаллах. Проанализированы и отработаны методы исследования физико-химических свойств уже известных взрывчатых веществ для дальнейшего поиска и изучения еще не синтезированных перспективных энергетических материалов. Сформулированы две модели для молекул и кристаллов прогнозирования параметров детонации и факторов чувствительности и выработаны рекомендации по использованию их к конкретным взрывчатым веществам – предложенные формулы описывают параметры детонации и факторы чувствительности с точностью до 10% отклонения от экспериментальных данных.

INVESTIGATION OF DETONATION PROPERTIES OF EXPLOSIVES BY THE DENSITY FUNCTIONAL THEORY METHODS

T. L. Prazyan, Yu. N. Zhuravlev

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Email: Prazyan.tigran@yandex.ru, Zhur@kemsu.ru

At present high energy materials have a wide range of application. Those materials are divided into three groups: solid propellants, explosives and black powders, also known as gunpowders. The explosives can be used either in the military industry or else in the civil environment. There is a great interest towards the development and the synthesis of new high energy materials which have more effective destructive properties but lower sensitivity to interactions of any kind.

The investigation objects in the present study are both already known explosives, for instance $C_2N_4H_2O_3$ (β -NTO), $C_6N_{12}H_6O_{12}$ (ϵ -CL-20), $C_2N_4H_4O_4$ (FOX-7), $C_4N_8H_8O_8$ (HMX), CNH_3O_2 (NM), $C_5N_4H_8O_{12}$ (PETN), $C_3N_6H_6O_6$ (RDX), $C_6N_6H_6O_6$ (TATB), $C_7N_3H_5O_6$ (TNT) (by the help of which the adjustment of the methodology is being produced) and the new ones, for instance $C_3N_5H_3O_4$ (A1), $C_4N_4H_6O_{12}$ (ETN), $C_6N_5H_3O_6$ (TNDP) – for performance prediction.

For calculating of molecules and crystals electronic features of explosives experimental data have been used. The optimized geometry has been used for isolated crystal molecules and for further study of its physical features. The investigation has been realized by the help of CRYSTAL14 package program, the method of lineal combination of atomic orbitals (LCAO) and the density

functional theory (DFT). The optimization of lattice parameters FOX-7 has been realized in accordance with the software package Quantum ESPRESSO.

There have been determined some features of energetic materials (physical and chemical descriptions). Those features correlate accurately enough with the detonation parameters and sensitivity factors in molecules and crystals. Some research methods of physical and chemical features have been already analyzed and clarified for further search and study of known explosives and not synthesized energetic materials which are quite prospective for science.

Two models of molecule and crystal scientific prediction of detonation parameters and sensitivity factors have been formulated and some recommendations have been made for using them with concrete explosives. Those formulas describe detonation parameters and sensitivity factors accurately within 10% deviation from experimental data.

2-33

ПОВОРОТ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ОБРАЗЦАХ ИЗ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ

К. М. Просвирнин, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Ю. А. Беленовский, Е. Б. Смирнов, К. М. Мирошкин, И. А. Ахлюстин, А. Н. Киселёв, И. Э. Косолапов

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

В работе приведены результаты исследования процесса поворота детонационной волны, распространяющейся в цилиндрических образцах из низкочувствительного ВВ. Исследовался процесс распространения детонационной волны, с регистрацией в объеме исследуемых образцов ВВ по различным направлениям. В экспериментах фотохронографическим методом регистрировался выход детонационной волны на боковую и торцевую поверхности образцов. Процесс поворота детонационной волны в объеме зависит от ряда факторов, как определяющих детонационную способность исследуемого ВВ, так и связанных с условиями применения ВВ.

В ходе исследований экспериментально определялась зависимость угла поворота детонации от:

- критического давления инициирования исследуемого ВВ;
- температурного диапазона применения исследуемого ВВ.

ROTATION OF DETONATION WAVE IN LOW SENSITIVITY HE

K. M. Prosvirnin, B. G. Loboiko, O. V. Kostitsyn,
Yu. A. Belenovsky, E. B. Smirnov, K. M. Miroshkin,
I. A. Akhlyustin, A. N. Kiselev, I. E. Kosolapov

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

The paper presents the results of investigation into rotation of detonation wave, which is propagating in cylindrical samples made of low sensitivity HE. We studied the process of detonation wave propagation with registration in the volume of HE samples under study in various directions. Using photo-chronographic method, experiments registered detonation wave arrival to the lateral and end surfaces of the samples. The process of detonation wave rotation in the volume depends on several factors, both determining detonation capability of HE under study, and related to the conditions of HE application.

In the course of investigation, we experimentally determined the dependence of detonation rotation angle on:
– critical pressure of initiation of HE under study;
– temperature range for application of HE under study.

2-34

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ С ПОЛИМЕРНЫМИ МИКРОБАЛЛОНАМИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПЛОТНОСТЕЙ

А. С. Юношев, А. В. Пластинин, С. И. Рафейчик

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия
rafeichik-s@yandex.ru

В последнее время появляются работы по изучению детонационных характеристик эмульсионных взрывчатых веществ (ЭмВВ), сенсibilизированных полимерными микробаллонами [1]. Они интересны как с фундаментальной точки зрения (для развития модельных представлений о механизме детонации смесевых ВВ), так и с практической (именно полимерные микробаллоны позволяют полностью реализовать потенциальные возможности эмульсионного ВВ по детонационному энерговыделению [3]).

В работе изучаются детонационные характеристики ЭмВВ на основе эмульсии из аммиачной селитры (АС) и смеси аммиачной и натриевой (АС/НС) селитр, сенсibilизированных полимерными микробаллонами Expancel 462DET40d25 со средним диаметром 40 мкм и толщиной стенки 0,1 мкм. Зависимость скорости детонации ЭмВВ на основе АС/НС эмульсии и сенсibilизатора Expancel от плотности $\rho_0 = 0,15\text{--}1,3$ г/см³ аналогична ранее исследованной нами для стеклянных

микробаллонов МС-В [2] и ЭмВВ на основе АС-эмульсии и полимерных микробаллонов из [1]. Диаметр исследуемых зарядов 21 мм, оболочка пластиковая. Немонотонные зависимости характерны для ВВ 2-го типа и связаны с увеличением критического диаметра при увеличении плотности.

Использование полимерных микробаллонов позволяет существенно расширить доступный диапазон плотности. При добавлении их по массе 14% реализована композиция $\rho_0 = 0,15$ г/см³ (пористость 0,91), детонирующая со скоростью 1,95 км/с. В случае стеклянных микробаллонов МС-В минимальное значение скорости 2 км/с достигалось при существенно большей плотности – 0,5 г/см³ (пористость 0,75). Нижний предел скорости детонации связан, как очевидно, со скоростью звука в эмульсии $c_0 = 1.85 \pm 0.05$ км/с.

Критический диаметр ЭмВВ с полимерными микросферами в целом обнаруживает такое же немонотонное поведение, что и для стеклянных микросфер МС-В, и проходит ниже в области малых плотностей ВВ. Имеющееся различие связано с тем, что при уменьшении плотности до очень низких значений $\rho_0 \leq 0.35$ г/см³ критический диаметр ВВ с полимерными микросферами демонстрирует намного более медленный рост по сравнению со стеклянными микросферами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 15-03-00883).

Литература

1. Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., Campos J., Tavares B. Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric microballoons. 2013 Joint APS-SCCM/AIRAPT Conference. Journal of Physics: Conference Series 500 (2014) 052030. doi:10.1088/1742-6596/500/5/052030.
2. Сильвестров В. В., Пластинин А. В. Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45, № 5. – С. 124–133.
3. Юношев А. С., Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Рафейчик С. И. Влияние искусственных пор на параметры детонации эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. – 2017. – Т. 52, № 2.

INVESTIGATION OF DETONATION VELOCITY OF EMULSION EXPLOSIVES WITH POLYMERIC MICROBALLOONS IN WIDE RANGE OF INITIAL DENSITY

A. S. Yunoshev, A. V. Plastinin, S. I. Rafeichik

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
E-mail: rafeichik-s@yandex.ru

At present time the papers arise on the research of detonation parameters of emulsion explosives (EMX) sensitized with polymeric microballoons [1]. They have both fundamental (for developing of theoretical models of heterogeneous detonation) and practical interest (one reason

is that the polymeric microballoons allow to realize potential abilities of EMX on detonation energy release [3]).

In this work detonation characteristics of EMX based on emulsion containing ammonium nitrate (AN) or ammonium nitrate / sodium nitrate compound (AN/SN) and sensitized with polymeric microballoons Expancel 462DET40d25 of 40 μm diameter and wall thickness of 0.1 μm are examined. The dependence of detonation velocity of EMX based on AN/SN emulsion with Expancel microballoons on density $\rho_0 = 0.15\text{--}1.3$ g/cc is similar to that examined for glass microballoons MS-V [2] and for EMX based on AN emulsion with polymeric microballoons [1]. The diameter of the charge studied is 21 mm and is confined by plastic shell. Non-monotonic dependences are typical for explosives of the second type and connected with increase of the critical diameter when density increases.

Using of polymeric microballoons can significantly expand the range of the possible EMX density. Adding of 14% by mass of these microballoons allow to make composition with $\rho_0 = 0.15$ g/cc (porosity is 0.91) detonating at 1.95 km/s. In case of glass microballoons MS-V minimum detonation velocity of 2 km/s was obtained at significantly higher density 0.5 g/cc (porosity is 0.75). The minimum limit of detonation velocity is obviously connected with sound speed of emulsion $c_0 = 1.85 \pm 0.05$ km/s.

The behavior of the critical diameter of EMX with polymeric microballoons generally is the same as non-monotonic dependence of that with glass microballoons MS-V and lies below at low densities. At densities $\rho_0 \leq 0.35$ g/cc critical diameter of EMX with polymeric microballoons increases much slower comparing to MS-V.

Present work has been managed with support of RFBR grant (project №15-03-00883).

References

1. Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., Campos J., Tavares B. Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric microballoons. 2013 Joint APS-SCCM/AIRAPT Conference. Journal of Physics: Conference Series 500 (2014) 052030. doi:10.1088/1742-6596/500/5/052030.
2. Sil'vestrov V. V., Plastinin A. V. Research of low-velocity emulsion explosives. // Fizika goreniya i vzriva. – 2009. – V. 45, № 5. – p. 124–133.
3. Yunoshev A. S., Sil'vestrov V. V., Plastinin A. V., Rafeichik S. I. Influence of artificial pores on detonation parameters of emulsion explosive. // Fizika goreniya i vzriva. – 2017. – V. 52, № 2.

2-35

КОНДЕНСАЦИЯ УГЛЕРОДА ПРИ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ТГ РАЗНОГО ДИАМЕТРА

И. А. Рубцов^{1,4}, К. А. Тен^{1,4}, В. М. Титов¹,
Э. Р. Прууэл^{1,4}, А. О. Кашкаров^{1,4}, Б. П. Толочко^{2,3,4},
В. В. Жуланов^{3,4}, Л. И. Шехтман^{3,4}

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

²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Россия

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

⁴Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mail: rubtsov@hydro.nsc.ru

Процесс конденсации углерода при детонации взрывчатых веществ является одним из обсуждаемых вопросов физики взрыва [1–3]. Как показывают расчеты [4, 5] длительная кинетика конденсации углерода, в том числе за плоскостью Чепмена–Жуге лучше описывает экспериментальные данные.

Введенная в эксплуатацию в 2015 году новая экспериментальная станция SYRAFEEMA (Synchrotron Radiation Facility for Exploring Energetic Materials) по исследованию взрывных процессов на ускорительном комплексе ВЭПП-4М (ИЯФ), оборудованная более мощным источником синхротронного излучения (СИ) по сравнению с аналогичной станцией расположенной на ускорительном комплексе ВЭПП-3. Ввод в эксплуатацию этой станции позволил увеличить массу исследуемого заряда до 200 г.

В работе измерена динамика мало-углового рентгеновского рассеяния (МУРР) при детонации литых цилиндрических зарядов тротил/гексоген 50/50 (ТГ) разного диаметра (20, 30, 40 мм). Из динамики МУРР восстановлена динамика конденсации углеродных частиц за фронтом химической реакции. Минимально доступный для регистрации размер частиц составляет 2 нм. Такие частицы регистрируются в течении 600 нс за фронтом химической реакции, затем наблюдается увеличение их размера в течении нескольких микросекунд до 6–7 нм.

Наблюдается, что время роста углеродных частиц незначительно зависит от диаметра заряда. Время роста конденсации углеродных наночастиц в зарядах ТГ увеличивается с 3 микросекунд до 5 – при изменении диаметра заряда от 20 до 40 мм.

Литература

1. Тен К. А., Титов В. М., Лукьянчиков Л. А., Прууэл Э. Р., Аминов Ю. А., Лобойко Б. Г., Музыря А. К., Смирнов Е. Б., Филин В. П., Жогин И. Л., Толочко Б. П. Измерение мурр и рост наночастиц конденсированного углерода при детонации ТАТБ // Труды X Международной конференции «Забайкинские научные чтения – 2010».

2. Ten K. A., Titov V. M., Prueel E. R., Kashkarov A. O., Tolochko B. P., Aminov Yu. A., Loboyko B. G., Muzyrya A. K. and Smirnov E. B. Carbon condensation in detonation of high explosives // Proceedings Fifteenth International Detonation Symposium. San Francisco, California, USA.
3. M. Bagge-Hansen, L. Lauderbach, R. Hodgkin, S. Bastea, L. Fried, A. Jones, T. van Buuren, D. Hansen, J. Benterou, C. May, T. Graber, B. J. Jensen, J. Ilavsky and T. M. Willey Measurement of carbon condensates using small-angle x-ray scattering during detonation of the high explosive hexanitrostilbene // J. Appl. Phys. – 2015. – V.117, N 245902.
4. Craig M. Tarver, John W. Kury, R. Don Breithaupt. Detonation waves in triaminotrinitrobenzene. // J. Appl. Phys. 1997. V. 82, N 8. P 3771–3782.
5. Grebenkin K. F., Taranik M. V., Zherebtsov A. L. Computer modeling of scale effects at heterogeneous HE detonation // Proc. 13th Symposium (International) on Detonation, Norfolk, USA – 2006. – P. 496–505.

CARBON CONDENSATION DURING DETONATION OF TNT/RDX EXPLOSIVE OF VARIOUS DIAMETERS

I. A. Rubtsov^{1,4}, K. A. Ten^{1,4}, V. M. Titov¹,
E. R. Prueel^{1,4}, A. O. Kashkarov^{1,4}, B. P. Tolochko^{2,3,4},
V. V. Zhulanov^{3,4}, L. I. Shekhtman^{3,4}

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

²Institute of Solid State Chemistry
and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

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

⁴Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

E-mail: rubtsov@hydro.nsc.ru

The process of carbon condensation during detonation of high explosives is one of the discussed problems of explosion physics [1-3]. As the calculations [4, 5] show, experimental data are better described by long kinetics of carbon condensation behind the Chapman-Zhouget plane.

Set into operation in 2015 new experimental station SYRAFEEMA (Synchrotron Radiation Facility for Exploring Energetic Materials) for investigation of the detonation processes at the accelerator complex VEPP-4M (Budker INP) has higher intensity of the synchrotron radiation (SR) source than the similar station located at the VEPP-3 accelerator complex. Putting into operation of this station allowed us to increase the mass of the explosive charge up to 200 g.

In this work, we measured the dynamics of small-angle x-ray scattering (SAXS) during the detonation of cast cylindrical TNT/RDX charges of various diameters (20, 30, 40 mm). The obtained SAXS distribution data was used to restore the dynamics of average sizes of carbon nanoparticles during its condensation behind the chemical reaction zone. Minimum available to register size of particles is 2 nm. Particles of this size were register during 600 ns behind the detonation front. After that we saw increase of the size of carbon nanoparticles during several microseconds up to 6–7 nanometers.

It is observed that the growth of carbon particles insignificantly depends on the diameter of explosive charge. It increases from 3 to 5 microseconds at the changes of diameter from 20 to 40 mm.

References

1. Ten K. A., Titov V. M., Luk'yanchikov L. A., Prueel E. R., Aminov Yu. A., Loboyko B. G., Muzyrya A. K., Smirnov E. B., Filin V. P., Zhogin I. L., Tolochko B. P. SAXS measurement and growth of condensed carbon nanoparticles at the detonation of TATB. Trudy X Mezhdunarodnoy konferencii «Zababahinskie nauchnye chteniya – 2010» [Proc. 10th Int. Symp. «Zababahin scientific reading – 2010»] (In Russian).
2. Ten K. A., Titov V. M., Prueel E. R., Kashkarov A. O., Tolochko B. P., Aminov Yu. A., Loboyko B. G., Muzyrya A.K. and Smirnov E.B. Carbon condensation in detonation of high explosives // Proceedings Fifteenth International Detonation Symposium. San Francisco, California, USA.
3. M. Bagge-Hansen, L. Lauderbach, R. Hodgkin, S. Bastea, L. Fried, A. Jones, T. van Buuren, D. Hansen, J. Benterou, C. May, T. Graber, B. J. Jensen, J. Ilavsky and T. M. Willey Measurement of carbon condensates using small-angle x-ray scattering during detonation of the high explosive hexanitrostilbene // J. Appl. Phys. 2015. V. 117, N 245902.
4. Craig M. Tarver, John W. Kury, R. Don Breithaupt. Detonation waves in triaminotrinitrobenzene. // J. Appl. Phys. 1997. V. 82, N 8. P 3771–3782.
5. Grebenkin K. F., Taranik M. V., Zherebtsov A. L. Computer modeling of scale effects at heterogeneous HE detonation // Proc. 13th Symposium (International) on Detonation, Norfolk, USA – 2006. – P. 496–505.

2-36

ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ИНЕРТНЫМИ ДОБАВКАМИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ

И. А. Оськин¹, В. А. Брагин¹, А. А. Лукин²,
В. А. Морозов², Г. Г. Савенков^{1,3}

¹Научно-производственное объединение «Поиск»,
п. Мурино Ленинградской обл., Россия

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

³Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет),
Санкт-Петербург, Россия

Проведены экспериментальные исследования по инициированию энергонасыщенных материалов с наноразмерными добавками (CuO и детонационные наноплазмы (ДНА)) высоковольтным электрическим разрядом. В результате исследований установлено:

1. Электрический пробой порошковой композиции является первичным явлением, а инициирование энергонасыщенной смеси является следствием этого пробоя;

2. При добавлении в энергонасыщенные материалы наноразмерных добавок наблюдается существенное снижение напряжения пробоя (инициирования), причем, тем больше, чем больше содержание в нем наноразмерной добавки;

3. Чем больше скорость подъема напряжения в эксперименте, тем больше напряжение пробоя зарядов ЭНМ с наноразмерными добавками.

На основе полученных экспериментальных результатов предложена модель электрического пробоя порошковых смесей, согласно которой снижение напряжения пробоя ЭНМ с наноразмерными добавками связано с образованием перколяционных кластеров из наночастиц, пронизывающих весь заряд, которые имеют меньшую электрическую прочность, чем воздух, заполняющий поры между частицами энергонасыщенного материала. Такая перколяция является вынужденной и происходит за счет дипольного притяжения наночастиц, электризованных в электростатическом поле электродов. Зависимость напряжения пробоя зарядов от содержания в них нанодобавки связана с инерционностью процесса образования перколяционных кластеров из наночастиц и особенностями проведения экспериментов, в которых напряжение монотонно поднималось с почти постоянной скоростью. В результате напряжением пробоя было то напряжение, которое было достигнуто в момент образования перколяционного кластера.

THE INITIATION OF POWERFUL COMPOSITIONS WITH NANOSIZED INERT ADDITIVES BY HIGH-VOLTAGE ELECTRIC DISCHARGE

I. A. Oskin¹, V. A. Bragin¹, A. A. Lukin²,
V. A. Morozov², G. G. Savenkov^{1,3}

¹Research and production Association «Poisk», v. Murino, Leningrad region, Russia

²Санкт-Petersburg state University, Saint-Petersburg, Russia

³Saint-Petersburg state technological Institute (technical University), Saint Petersburg, Russia

Experimental studies on the initiation of energy-intensive materials with nanoscale additives (CuO and detonation nanodiamonds (DND)) by high-voltage electric discharge. As a result of researches it is established:

1. Electrical breakdown of the powder composition is a primary phenomenon, and the initiation of the energy-mix is the result of breakdown;

2. When you add in the energy-materials nanoscale additives there is a significant reduction of the breakdown voltage (the trigger), and the more the content of nanosized additives;

3. The greater the rate of rise of voltage in the experiment, the more the breakdown voltage charges arm with nanoscale additives.

On the basis of the obtained experimental results of the proposed model of the electric breakdown of the powder mixtures, according to which the decrease in breakdown

voltage of ENM with nanoscale additives due to the formation of percolation clusters composed of nanoparticles that permeate the whole charge, which have a lower dielectric strength than the air filling the pores between particles of saturated material. Such percolation is forced and occurs due to the dipole attraction of the nanoparticles electrified in the electrostatic field of the electrodes. The dependence of the breakdown voltage charges from the content of the friction associated with the inertia of the process of formation of percolation clusters composed of nanoparticles and features of the experiments in which a voltage is monotonously raised with an almost constant speed. As a result, the breakdown voltage was the voltage that was reached at the time of formation of the percolation cluster.

2-37

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРИ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

Н. П. Сатонкина

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

Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mail: snp@hydro.nsc.ru

Исследование электрических свойств конденсированных ВВ насчитывает более 60 лет. В последние годы получены данные по распределению электропроводности при детонации для широкого спектра ВВ вида CHON при разной начальной плотности. Это позволило систематизировать экспериментальные данные и подтвердить высказанную ранее гипотезу [1–3] о контактном механизме проводимости по углеродным сеткам. Дальнейшее развитие гипотезы показало, что проводимость определяется углеродом для массовой доли углерода больше 0,1, в эту категорию попадают не только такие вещества, как тротил и ТАТБ, но и октоген, гексоген, тэн [4, 5].

Полученная связь электропроводности с углеродом открывает широкие перспективы диагностики состояния вещества как в волне Тейлора, так и в самой сложной для исследования области – химике.

Литература

1. B. Hayes, in Proceedings of the 4th (International) Symposium on Detonation, White Oak, Maryland, ACR-126 (1965), p. 595.
2. S. D. Gilev and A. M. Trubachev, in Proceedings of the 12th international Detonation Symposium, San Diego, CA (2002), Paper No. ONR333-05-2, p. 240.
3. С. Д. Гилев. Диссертация на соискание степени д.ф.-м.н., Институт гидродинамики, Новосибирск, 2009.
4. N. P. Satonkina: Journal of Applied Physics, Vol. 118 (2015), p. 245901.
5. Н. П. Сатонкина. Физика горения и взрыва. 2016, т. 52, №4, с. 129.

THE ELECTRIC CONDUCTIVITY AT THE DETONATION OF CONDENSED EXPLOSIVES

N. P. Satonkina

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
snp@hydro.nsc.ru

The electrical properties of condensed explosives has more than 60 years. Recently obtained data of the distribution of electric conductivity at the detonation of explosives for a wide variety species of the kind CHON at the different initial density. This allowed to systematize the experimental data and confirm the previously expressed hypothesis [1–3] of the contact mechanism of conductivity on carbon grids. Further development of the hypothesis shows that the conductivity is determined by the carbon for carbon mass fraction of more than 0.1, fall into this category such substances as TNT, TATB, HMX, RDX, PETN [4,5].

The resulting bond with carbon conductivity opens up broad prospects for diagnosing the state of the substance in the wave of Taylor, and in the most difficult area to research – chemical peak.

References

1. B. Hayes, in Proceedings of the 4th (International) Symposium on Detonation, White Oak, Maryland, ACR-126 (1965), p. 595.
2. S. D. Gilev and A. M. Trubachev, in Proceedings of the 12th international Detonation Symposium, San Diego, CA (2002), Paper No. ONR333-05-2, p. 240.
3. S. D. Gilev, Doctoral dissertation, Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk, Russia, 2009.
4. N. P. Satonkina, Journal of Applied Physics, Vol. 118 (2015), p. 245901.
5. N. P. Satonkina, Combustion, Explosives and Shock Waves, 2016, т. 52, p. 488.

2-38

КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ЛИ-ТАРВЕРА ДЛЯ ПЛАСТИЗОЛЬНОГО ВВ ОЛА-8Т

А. Б. Севастьянов, Е. И. Ермолович, М. Е. Евстифеев,
В. Г. Кожевников, А. И. Михайлюкова

АО «ГосНИИ «Кристалл», Россия, Дзержинск, Россия

При численном моделировании инициирования детонации необходимым условием является наличие кинетического уравнения перехода взрывчатого вещества (ВВ) в продукты детонации. Одним из наиболее распространенных подходов для описания переходных процессов в ВВ является использование кинетики Ли–Тарвера. В настоящей работе представлены результаты моделирования ударно-волнового инициирования пластизольного ВВ ОЛА-8Т ($\rho = 1,80 \text{ г/см}^3$). Пластизольный ВВ ОЛА-8Т нашел

широкое применение в изделиях различного назначения. Использование этого ВВ позволило выйти на новый качественный уровень эффективности и эксплуатационной безопасности.

Моделирование ВВ ОЛА-8Т проводилось с использованием кинетического уравнения Ли–Тарвера, для которого были определены соответствующие коэффициенты. В процессе расчетов были получены уравнения состояния исходного ВВ и продуктов детонации в форме JWL. Работоспособность полученного кинетического уравнения была проведена на имеющихся экспериментальных данных по инициированию ВВ ОЛА-8Т.

LEE- TARVER EQUATION FOR THE PLASTISOL EXPLOSIVE OF OLA-8T

A. B. Sevastyanov, Ye. I. Yermolovich, M. Ye. Yevstifeev,
V. G. Kozhevnikov, A. I. Mikhaylukova

JSC «GosNII «Kristall»», Dzerzhinsk, Russia

In the numerical simulation of detonation initiation prerequisite is the existence of kinetic equation of the transition explosive in the detonation products. One of the most common approaches for describing transients in explosives is the use kinetics of Lee-Tarver. This paper presents the results of simulations of the shock wave initiation the plastisol explosive of OLA-8T ($\rho = 1.80 \text{ g/cm}^3$). The plastisol explosive of OLA-8T is widely used in products for various purposes. The use this explosive allowed to progress to a new level of efficiency and safety.

Simulation of the explosive of OLA-8T was conducted using Lee-Tarver kinetic equation for which corresponding coefficients were determined. In the process of calculations were obtained equations of state of the initial explosive and detonation products in the form of JWL. The efficiency of the resulting kinetic equation has been carried out on the existing experimental data on initiating the explosive of OLA-8T.

2-39

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ф. А. Симаков, А. Ю. Гармашев,

О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов,

И. В. Чемагина, А. Ю. Тарасов, А. Н. Грецова

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

В настоящем докладе приведены результаты исследований образцов исходного 2,4-динитроанизола промышленного производства и перекристаллизованного на его основе.

Исследования включали: изучение морфологических особенностей с помощью сканирующего электронного микроскопа, термический анализ на термогравиметрическом и дифференциально-термическом анализаторах, определение химического состава образцов с помощью газовой и высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Выявлены различия в морфологических особенностях и термических характеристиках исследованных образцов. Идентифицированы вещества, содержащиеся в образцах.

В результате обнаружены примеси исходного и побочного продуктов синтеза 2,4-динитроанизола.

STUDY OF PHYSICAL-AND-CHEMICAL PROPERTIES OF INDUSTRIALLY MANUFACTURED 2,4-DINITRO ANISOL

F. A. Simakov, A. Yu. Garmashev,
O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov, I. V. Chemagina,
A. Yu. Tarasov, A. N. Gretsova

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

Samples of original industrially-manufactured 2,4-dinitro anisol and that recrystallized on its basis were investigated and results of this investigation are presented.

Morphological features were studied with the help of the scanning electron microscope, the thermogravimetric and differential thermal analyzers were used for thermal analysis, and gas chromatography and high-efficient liquid chromatography were used to determine chemical composition of samples.

Discrepancies in morphological features and thermal characteristics of test samples were revealed. Materials constituting the samples were identified and admixtures of the original product and a byproduct of 2,4-dinitro anisol synthesis were detected.

талла дает учет его анизотропии, т. е. свойств кристаллографической системы в целом, иными словами анизотропное термическое расширение (сжатие).

В работе представлены функциональные зависимости изменения параметров структуры молекулярного кристалла БТФ при термическом воздействии ($T=148..453$ K) в квазиизобарических условиях ($P=P_{\text{атм}}$). По данным рентгеноструктурного анализа на дифрактометрической станции методами PXRD определены параметры кристаллической структуры: метрика ячейки, постоянные решетки, элементарный объем, плотность и размерные характеристики субструктуры. Построены следующие уравнения описывающие анизотропию параметров молекулярного кристалла БТФ: $a_p=f(T)$; $b_p=f(T)$, $c_p=f(T)$, $\alpha_p=f(T)$, $\beta_p=f(T)$, $\gamma_p=f(T)$, $\rho_p=f(c)$; и изменение его физических характеристик: $V_p=f(T)$, $\rho_p=f(T)$, $v_p=f(T)$, $\alpha V_p=f(T)$, $d_p=f(T)$, $\varepsilon_p=f(T)$.

Средние ктр кристаллов БТФ:

$$\text{объемный } \varepsilon_{\text{cp}}^V = 1,47 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1};$$

линейный в направлении:

$$\langle\langle a \rangle\rangle - \varepsilon_{\text{cp}}^a = 3,89 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1};$$

$$\langle\langle b \rangle\rangle - \varepsilon_{\text{cp}}^b = 9,46 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1};$$

$$\langle\langle c \rangle\rangle - \varepsilon_{\text{cp}}^c = 1,30 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}.$$

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.

ANISOTROPIC THERMAL EXPANSION OF BTF CRYSTALS AT 150 – 450 K UNDER ATMOSPHERIC PRESSURE

A. V. Stankevich, A. N. Gretsova, B. G. Loboilko,
O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov

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

In order to derive physical equations of condensed-matter state we need to know how specific volume of an elementary cell of the crystalline solid changes depending on the environmental temperature and pressure. However, the most complete description of the crystal state is only possible with the regard for anisotropy of the crystal, i.e. properties of a crystallization system as a whole, otherwise speaking, anisotropic thermal expansion (compression).

The paper presents functional relationships how parameters of the BTF molecular crystal structure are changing under certain temperatures ($T=148..453$ K) in quasi-isobaric conditions ($P=P_{\text{атм}}$). The powder X-ray diffraction analysis (PXRD-analysis) performed with the help of the diffractometric station determined parameters of the crystalline structure, i.e. cell metrics, lattice constants, elementary volume, density, and substructure sizes. The following equations were derived to describe anisotropy of BTF molecular crystal parameters: $a_p=f(T)$; $b_p=f(T)$, $c_p=f(T)$, $\alpha_p=f(T)$, $\beta_p=f(T)$, $\gamma_p=f(T)$, $\rho_p=f(c)$; and

2-40

АНИЗОТРОПНОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ БТФ ОТ 150 ДО 450 К ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

А. В. Станкевич, А. Н. Грецова,
Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов

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 крис-

changes in physical characteristics of the BTF crystal: $V_p=f(T)$, $\rho_p=f(T)$, $v_p=f(T)$, $\alpha V_p=f(T)$, $d_p=f(T)$, $\varepsilon_p=f(T)$.

The average thermal expansion coefficients of BTF crystals are volumetric $\varepsilon_{cp}^V = 1,47 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$; linear in the direction

$$\langle\langle a \rangle\rangle - \varepsilon_{cp}^a = 3,89 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1};$$

$$\langle\langle b \rangle\rangle - \varepsilon_{cp}^b = 9,46 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1};$$

$$\text{and } \langle\langle c \rangle\rangle - \varepsilon_{cp}^c = 1,30 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}.$$

Thermal vibrations of the crystal structure and static displacements of atoms in the volume of the elementary cell were determined more precisely and this allows correctness of available molecular-dynamics models to be verified.

2-41

СОВМЕЩЕННЫЙ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ТАТБ

А. В. Станкевич, П. А. Слепухин, Б. Г. Лобойко,
Г. Л. Русинов, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов

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

Практически все из известных материалов подвержены термическому расширению (сжатию). Причем поведение при воздействии температуры у каждого материала различно: одни в значительной степени расширяются, другие осциллируют, третьи сжимаются. В этой связи изучение процесса анизотропного теплового расширения (сжатия) кристаллических материалов позволяет приблизиться к детальному пониманию природы их строения. В свою очередь методика совмещенного рентгеноструктурного анализа монокристалл-порошок в значительной степени увеличивает точность проводимого анализа кристаллического состояния вещества.

В данной работе выполнен рентгеноструктурный эксперимент для определения состояния кристаллического ТАТБ при конечных температурах. Монокристаллические образцы изучены в трех точках 100, 200 и 298 К. Порошкообразные образцы в диапазоне от 150 до 550 К, с шагом 10 К. Проведено совмещение экспериментальных точек 200 и 298 К. С последующей калибровкой кривой квазиизобарического расширения порошка ТАТБ. В результате получены более точные оценки коэффициентов анизотропного термического расширения.

COMBINED X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF TATB-CRYSTALS THERMAL EXPANSION

A. V. Stankevich, P. A. Slepukhin, B. G. Loboilko,
G. L. Rusinov, O. V. Kostistyn, N. P. Taibinov

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

Practically all known materials undergo thermal expansion (compression). Temperature induces different response in each material, i.e. certain materials seriously expand, other materials oscillate, and the third ones compress. So, studying the process of anisotropic thermal expansion (compression) of crystalline materials approaches us to the detailed understanding what the nature of their structure is. In turn, the combined X-ray diffraction analysis «single crystal – powder» significantly increases accuracy of the crystalline state analysis.

This paper presents the X-ray diffraction experiment to determine the crystalline TATB state at final temperatures. Single-crystal samples are studied at three points, i.e. 100, 200, and 298 K. Powdered samples are studied within 150 and 550 K with the 10K increment. Experimental points of 200 and 298 K were combined with the follow-on calibration of the quasi-isobaric expansion curve for the powdered TATB. As a result, more precise coefficients of anisotropic thermal expansion are obtained.

2-42

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

А. С. Гладков, Г. П. Куценко, С. П. Лунеев,
Л. Г. Сухова, О. В. Соснин, С. Э. Межеричкий

АО «ГосНИИ «Кристалл»», г. Дзержинск, Россия

E-mail: kristall@niikristall.ru

Для определения возможности отверждения пластичных ВВ исследовались составы на основе тэна, приготовленные с использованием низкомолекулярного каучука СКДН и высокомолекулярного каучука СКЭПТ.

Отверждение осуществлялось двумя способами: с помощью хинолового эфира ЭХ-1 и путем серной вулканизации. В процессе исследований определены рецептуры вулканизирующих агентов, обеспечивающие отверждение пластичного ВВ при температурах не выше 100°C, за время не более

2 ч. Оказалось, что для отверждения пластичных ВВ требуется в 2–3 раза больше вулканизирующих агентов, чем для вулканизации близких по рецептуре эластичных ВВ, независимо от наличия в рецептуре низкомолекулярного или высокомолекулярного каучука.

Пластичные составы, содержащие вулканизирующие агенты для серной вулканизации менее пластичны,

чем составы, которые отверждаются с помощью хинолового эфира. Вероятно, хиноловый эфир выполняет также функцию поверхностно-активного вещества.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF CURING PLASTIC EXPLOSIVE COMPOSITIONS

A. S. Gladkov, G. P. Kutsenko, S. P. Luneev,
L. G. Sukhova, O. V. Sosnin, S. E. Mezheritsky

JSC «GosNII «Kristall»», Dzerzhinsk, Russia

E-mail: kristall@niikristall.ru

To determine of the possibility of curing plastic explosives were studied formulations based on PETN, prepared with using low-molecular rubber SKDN and high-molecular rubber SKEPT.

Curing was performed in two ways: with using of quinolone ether of EQ-1 and vulcanization by sulfur. In the process of investigations were identified formulations of vulcanizing agents, curing providing of plastic explosive at temperatures not above 100°C for not more than 2 hours. It turned out that for curing plastic explosives required in 2–3 times more of vulcanizing agents than for vulcanization with similar along formulation of elastic explosives, regardless of the presence in the formulation of low-molecular or high-molecular rubber.

Plastic compositions containing vulcanizing agents for vulcanization by sulfur less plastic than compositions, which are cured using quinolone ether. Probably, quinolone ether also functions as a surfactant.

введены следующие сведения о структуре и свойствах индивидуальных ВВ:

1. Кристаллографические модели, содержащие независимые координаты атомов, параметры кристаллической структуры и их изменения при воздействии температуры и давления.

2. Дифракционные характеристики, содержащие модели дифракции и рассеяния на кристаллах ВВ рентгеновских лучей, волн материй, нейтронов, обратно отраженных и быстрых электронов.

3. Спектральные характеристики, содержащие спектры и их анализ: колебательные (ИК, КР), энергетические (УФ), атомно-силовые, терагерцовые, фотоэлектронные, массовые и другие.

4. Равновесная огранка кристаллов, содержащая теоретико-экспериментальный анализ кристаллов ВВ по данным микроскопии.

5. Ядерный магнитный и электронный парамагнитный резонанс.

На сегодняшний день созданная база данных легла в основу баз знаний для моделей искусственного интеллекта, виртуальной лаборатории фундаментальных исследований и методик контроля качества ВВ.

CRYSTALLOGRAPHIC MODELS AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF INDIVIDUAL EXPLOSIVES

A. V. Stankevich, B. G. Loboilko,
O. V. Kostistyn, N. P. Taibinov

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

2-43

КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВВ

А. В. Станкевич, Б. Г. Лобойко,
О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов

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

Основная информация о веществе является физико-химической: модели структуры и спектральные характеристики. Важнейшим этапом эффективной работы с любыми веществами является создание информационно-базы данных, содержащей как можно больше сведений о них. В дальнейшем использование баз данных позволяет быстро и точно выполнять работы по контролю качества, идентификации, обнаружению и разработке новых материалов.

В отделе 49 база данных ВВ строилась на основе анализа широко известных литературных источников с небольшими дополнениями и исследованиями, в том числе и расчетными. В созданную базу данных

Physical and chemical data, i.e. a structural model and spectral characteristics, turn out to be the key information about a material. The most important stage that ensures efficient work with any material is the development of the information database that includes as much as possible entries on these materials. Hereafter, these databases will ensure quick and accurate quality control and identification, and will also help to quickly and accurately develop new materials.

In our department, HE database was developed based on the analysis of well-known literary sources and then it was supplemented with certain investigation and calculation results. The newly-developed database includes the following data on the structure and properties of individual explosives:

1. crystallographic models: independent coordinates of atoms, crystalline structure parameters and changes in these parameters depending on applied temperatures and pressures;

2. diffraction characteristics: models for X-rays, matter waves, neutrons, as well as backward reflected and fast electrons diffracted and scattered on HE crystals;

3. spectral characteristics: spectra [vibrational (IR, CS), energy (UV), atomic-powered, terahertz, photoelectronic, mass spectra, etc.] and their analysis;

4. equilibrium crystal cutting: theoretical and experimental analysis of HE crystals using microscopic data.

5. nuclear magnetic and electron paramagnetic resonance.

Currently, the developed database forms the basis of the knowledge data bases for artificial intelligence models, the basic-research virtual laboratory, and quality control techniques.

2-44

**ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ
НИЗКОПЛОТНЫХ СМЕСЕЙ ТЭНА
С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ**

В. И. Таржанов, В. И. Сдобнов,
А. Д. Зинченко, А. И. Погребов

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

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

Представлены данные по лазерному инициированию низкоплотных смесей ТЭНа с металлическими добавками при варьировании дисперсности ТЭНа и размера частиц добавки. Использовался лазер с длиной волны 1,06 мкм и длительностью импульса 30 и 40 нс. Показано существование минимумов на зависимостях пороговых параметров инициирования от содержания γ -добавок. Для крупнодисперсных добавок не обнаружено значимого различия в порогах инициирования смесей от природы металла при оптимальных содержаниях добавок γ_{opt} (кроме алюминия). Для смесей ТЭНа с тонкодисперсным алюминием при γ_{opt} обнаружены существенно большие снижения пороговых параметров инициирования (6,2 раза) по отношению к прямому инициированию ТЭНа. Показана независимость порогов инициирования смесей от дисперсности S ТЭНа при γ_{opt} . Зарегистрировано расширение зависимостей пороговых параметров от γ с увеличением S при одновременном смещении γ_{opt} в область больших значений. Выявлена сильная зависимость порогов инициирования от плотности заряда смеси. Сформулированы основные положения механизма лазерного инициирования смесей ТЭНа с добавками.

**LASER INITIATION OF LOW-DENSITY PETN
MIXED WITH METAL ADDITIVES**

V. I. Tarzhanov, V. I. Sdobnov,
A. D. Zinchenko, A. I. Pogrebov

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

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

Consideration is given to laser initiation of low-density PETN mixed with metal additives in conditions with varying both PETN grain size and particle size of an additive. Laser used for initiation had the 1.06- μm wavelength and the burst time of 30 and 40 ns. «Threshold initiation-parameters versus additives content γ » relationships are shown to have minimums. For coarse-grained additives, mixture initiation thresholds are not observed to heavily depend on the metal nature with the optimal content of additives γ_{opt} (but for aluminum). For PETN mixed with the fine-grained aluminum at γ_{opt} , the threshold initiation parameters are revealed to seriously decrease (6.2 times) compared to the direct initiation of PETN. Mixture-initiation thresholds are shown to be independent of PETN grain size S at γ_{opt} . Branches of the «threshold parameters versus γ » curves are recorded to move apart with S increase when γ_{opt} is simultaneous shifting to the domain of large values. Thresholds are proved to heavily depend on the density of the mixture charge. Main principles related to the mechanism of laser initiation of PETN mixed with additives are formulated.

2-45

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ
ДЕТОНАЦИИ В СМЕСЯХ ВОДОРОДА,
МЕТАНА И СИЛАНА С ОКИСЛИТЕЛЕМ
ИНЕРТНЫМИ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦАМИ**

Д. А. Тропин, А. В. Фёдоров

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 подавления детонационных волн в реагирующих газовых смесях инертными микро- и наночастицами в настоящее время являются актуальными с точки зрения взрыво- и пожаробезопасности промышленных производств, использующих смеси водорода, метана и силана в качестве рабочего тела. В частности, силан широко используется на предприятиях полупроводниковой промышленности как газообразный источник кремния. Кроме того, силан используют как инициатор воспламенения водорода, который применяется в виде топлива в ракетных двигателях. Поэтому представляется полезным прогнозирование условий протекания и подавления детонационных процессов в рассматриваемых смесях инертными микро- и наночастицами.

В работе разработаны физико-математические модели для описания процессов распространения, ослабления и подавления детонации в смесях водорода, метана и силана инертными микро- и наночастицами. На их основе найдены зависимости дефицита скорости детонации от размера и концентрации инертных микро- и наночастиц.

Выявлено, что в газовзвесьях с наночастицами существуют те же типы детонационных течений, что и в газовзвесьях с микрочастицами: 1. стационарное распространение ослабленной детонационной волны при скоростях меньших скорости Чепмена-Жуге; 2. подавление детонационной волны. Кроме того, определено, что механизмы подавления детонации микро- и наночастицами являются схожими и заключаются в распаде детонационной волны на замороженную ударную волну и отстающий фронт воспламенения и горения.

Рассчитаны концентрационные пределы детонации. Показано, что пределы детонации в рассматриваемых смесях близки для частиц диаметрами от 10 нм до 1 мкм. Определено, что нарушается тенденция в увеличении эффективности подавления ДВ с уменьшением размера инертных частиц при переходе от микроразмерных к наноразмерным частицам. Выявлено, что в газовзвесьях с наночастицами концентрационные пределы детонации в водород-кислородной и силано-воздушной смеси примерно одинаковые.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №16-08-00778-а, №15-08-01947-а).

**PHYSICAL AND MATHEMATICAL
MODELING OF DETONATION SUPPRESSION IN
MIXTURES OF HYDROGEN,
METHANE AND SILANE WITH OXIDIZER
BY INERT MICRO- AND NANOPARTICLES**

D. A. Tropin, A. V. Fedorov

Khrstianovich Institute of theoretical and applied mechanics
SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: d.a.tropin@itam.nsc.ru, fedorov@itam.nsc.ru

Studies of detonation waves suppression in reacting gas mixtures by inert micro- and nanoparticles currently are relevant in terms of explosion and fire safety in industry using a mixtures of hydrogen, methane and silane as the working fluid. In particular, the silane is widely used in the semiconductor industry as the gaseous source of silicon. Furthermore, silane is used as the initiator of hydrogen ignition, which is used as fuel in the rocket engines. Therefore, it is useful to predict the conditions and suppression of detonation processes in these mixtures by inert micro- and nanoparticles.

In the paper the physical and mathematical models describing the processes of propagation, attenuation and suppression of detonation in mixtures of hydrogen, methane and silane by inert micro- and nanoparticles were developed. On the basis of these models the dependences of detonation velocity deficit on the size and concentration of inert micro- and nanoparticles were found.

It was revealed that in the gas suspensions with nanoparticles, exists the same types of detonation flows, as in gas suspensions with microparticles: 1. stationary propagation of attenuated detonation wave at velocities less than Chapman-Jouget velocity; 2. the suppression of detonation wave. In addition, it is determined that the mechanism of detonation suppression by micro- and

nanoparticles are similar and consists in the decay of a detonation wave on frozen shock wave and lagging ignition and combustion wave.

The concentration limits of detonation were calculated. It is shown that the detonation limits in these mixtures are similar for particles with diameters ranging from 10 nm to 1 micron. It was determined that the tendency of increasing of detonation suppression efficiency with decreasing of the inert particles size during the transition from micro to nanosized particles is violated. It was revealed that in the gas suspensions with nanoparticles the concentration limits of detonation in hydrogen-oxygen and silane-air mixture is approximately the same.

The work was supported by RFBR (grants No. 16-08-00778-а, No. 15-08-01947-а).

2-46

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАКЕТИРОВАНИЯ
ЦИФРОВОГО РЕГИСТРАТОРА
ДЛЯ ФОТОХРОНОГРАФА
С ЗЕРКАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКОЙ**

В. П. Андрианов, О. Н. Дулин, В. Г. Каменев,
П. В. Кубасов, В. М. Кузин, В. Н. Туркин, А. С. Шубин

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н.Л.Духова», Москва, Россия

E-mail: vturkin@vniia.net

В настоящее время во всем мире фотохронографы с зеркальной разверткой являются одним из основных инструментов для регистрации быстропротекающих газодинамических процессов. В связи с развитием цифровых технологий появились возможности в замене фотопленки в фотокамерах данного типа на цифровое устройство регистрации информации.

Во ФГУП «ВНИИА» на базе СФР разработано несколько поколений приборных комплексов, в которых фотопленка была заменена на устройство цифровой регистрации, последним из них является ТКПФ269. К сожалению, достигнутые технические характеристики несколько уступают, американским фотокамерам с зеркальной разверткой, что обусловлено наличием в конструкции нашего регистратора фокона.

Для повышения технических характеристик была принципиально изменена конструкция устройства цифровой регистрации. В результате удалось существенно повысить технические характеристики приборного комплекса. В докладе представлены результаты макетирования устройства цифровой регистрации для фотохронографа с зеркальной разверткой и анализ полученных данных.

**THE RESULTS OF CREATING
EXPERIMENTAL MODEL
OF DIGITAL RECORDER
FOR ROTATING MIRROR CAMERAS**

V. P. Andrianov, O. N. Dulin, V. G. Kamenev,
P. V. Kubasov, V. M. Kuzin, V. N. Turkin, A. S. Shubin
Federal State Unitary Enterprise All-Russia Research Institute
of Automatics (VNIIA), Sushevskaya, Moscow, Russia
E-mail: vturkin@vniia.net

Now days rotating mirror streak cameras are considered to be the main instrument for registration of high speed gas-dynamics processes. Because of developing digital technologies appeared opportunity to change film in rotating mirror cameras on digital recorder.

In FGUP «VNIIA» there were developed several systems based on rotating mirror camera SFR, in which film was changed on the digital recorder, the last system was TKPF269. Unfortunately, technical characteristics of our camera were a little bit worse than the USA rotating mirror streak cameras, the main reason is that we use in our construction fiber optic taper.

For improving of technical characteristics we changed the construction of our digital recorder. In the result we improved characteristic of our system. In the report it is presented the results of creating the experimental model of digital recorder and it is presented the analysis of receiving results.

2-47

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯЧЕЙСТОЙ
ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ
С ОБЛАКОМ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ**

И. А. Бедарев, А. В. Фёдоров

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

Известно, что детонационная волна в газовых и гетерогенных горючих смесях имеет ячейстую структуру. Также установлено, что добавление во взрывоопасную смесь инертных частиц способствует подавлению детонации. Исследования взаимодействия детонационных волн и инертных частиц в основном проводятся в одномерной постановке и позволяют сделать оценки влияния объемной концентрации, диаметра частиц, их теплофизических свойств на способность ослабления и подавления детонации. Однако неоднородная структура детонационной ячейки, несомненно, оказывает влияние на параметры смеси взрывчатого газа с химически инертными частицами и на предельные характеристики детонации. Таким образом, исследования параметров детонационной

волны и оценка размера детонационной ячейки в смесях горючих газов и инертных частиц представляют научный и практический интерес.

В работе рассмотрено взаимодействие детонационной волны с облаком инертных неподвижных частиц. Такая постановка задачи возможна в случае взаимодействия с относительно крупными частицами (диаметром больше 100 мкм), когда за время прохождения детонационной волны скорость и температура частиц меняются не слишком сильно, в пределах 20% от скорости и температуры потока за детонационной волной. Газодинамика процесса моделировалась системой уравнений Навье–Стокса, описывающей движение вязкого сжимаемого теплопроводного газа, с учетом многокомпонентности газовой смеси и химической кинетики. Система дополнялась источниковым членом, учитывающим сопротивление взаимодействию с неподвижными сферическими частицами.

В результате разработана и верифицирована по времени задержки воспламенения и скорости детонационной волны простейшая модель приведенной кинетики для описания детонации водорода в воздухе. Создана методология расчета детонационных течений в ANSYS Fluent с использованием приведенной кинетики. Приведенная кинетика верифицирована по размеру детонационной ячейки в водородовоздушной смеси. Разработана технология расчетов двумерных детонационных течений в системе реагирующая газовая смесь – инертные частицы для анализа вопросов, связанных с подавлением ячейистой детонации. Получены значения объемной концентрации частиц, приводящие к срыву детонационной волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-19-00010).

**NUMERICAL SIMULATION OF CELLULAR
DETONATION WAVE INTERACTION WITH
CLOUDS OF INERT PARTICLES**

I. A. Bedarev, A. V. Fedorov

Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics
SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: bedarev@itam.nsc.ru, fedorov@itam.nsc.ru

It is known that a detonation wave in gas and heterogeneous combustible mixtures has cellular structure. It is also found that the addition of inert particles in explosive mixture helps to suppress detonation. Research of interaction of detonation waves and the inert particles are mainly carried out in one-dimensional formulation and make it possible to estimate the influence of volume concentration, particles diameter, their thermal properties on ability of detonation attenuation and suppression. However, the multidimensional structure of the detonation cell undoubtedly has influence on the parameters of explosive gas mixtures with chemically inert particles and on critical detonation characteristics. Thus, the investigation of detonation wave parameters

and estimation of the detonation cell size in mixtures of combustible gases and inert particles are of scientific and practical interest.

The interaction of the detonation wave with a motionless cloud of inert particles was considered. This formulation of the problem is possible in the case of detonation wave interaction with the relatively large particles (greater than 100 microns in diameter), when at the interaction time the particles velocity and temperature does not vary too much, within 20% of flow velocity and temperature behind the detonation wave leading front. Gas dynamics of the process was modeled using the Navier–Stokes equations describing the motion of a viscous compressible heat-conducting gas, taking into account the multi-component gas mixture and chemical kinetics. The system was supplemented by the source term, which take into account the resistance of the interaction with motionless spherical particles.

As a result, simplest model of reduced kinetics was developed and verified by the ignition delay time and detonation wave velocity which describe the detonation of hydrogen in air. Methodology for calculating the detonation flows in ANSYS Fluent with reduced kinetics was created. Reduced kinetics was verified by the detonation cell size in the hydrogen-air mixture. The technology of calculation of two-dimensional detonation flows in the system of reacting gas mixture - inert particles for the analysis of questions related to the suppression of cellular detonation. The values of the particle volume concentration leading to the detonation wave suppression were obtained.

The work was supported by RSF (project No. 16-19-00010).

2-48

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕЙ ТНТ И ДНА

И. В. Чемагина, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов,
Т. В. Антипова, И. А. Баталова, А. Ю. Тарасов,
Н. В. Рачкова, Ю. А. Шахторин

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

В докладе представлены результаты определения температур плавления (Тпл, °С) и температур интенсивного термического разложения (ТИР, °С) смеси веществ (СВВ) 2,4,6-тринитротолуола (ТНТ) и 2,4-динитроанизола (ДНА) в зависимости от процентного содержания компонентов.

Исследовались механические смеси и сплавы порошков ТНТ и ДНА (процентное соотношение ТНТ/ДНА: 95:5, 90:10, 80:20, 70:30, 65:35, 60:40, 55:45, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 и 5:95 масс%).

Определение температур плавления исходных компонентов и СВВ: ТНТ/ДНА проводилось на диф-

ференциально-сканирующем калориметре и на приборе определения температуры плавления.

На ДСК-кривых наблюдалось по два пика плавления для всех исследованных образцов СВВ. Первый пик соответствовал плавлению эвтектической смеси. Второй пик показывал плавление вещества, находящегося в избытке.

Эвтектическая температура для порошкообразных СВВ (ТНТ/ДНА) составила 55,7...55,8°С, для сплавов – 50,3°С...50,9°С.

С помощью данных, полученных при определении температур плавления были построены «диаграммы плавкости» для СВВ ТНТ/ДНА, найдена точка эвтектики расплавов СВВ ТНТ/ДНА. Эвтектический состав (точка эвтектики), определенный по диаграммам, соответствовал соотношению компонентов:

– 35% ДНА ≤ ТЭ ≤ 50% ДНА(масс.) – для порошкообразных СВВ;

– ~55%ТНТ: ~45%ДНА(масс.) – для сплавов СВВ.

На дифференциально-сканирующем калориметре при нагревании до 450°С со скоростью 1°С/мин исследовался процесс термического разложения и определялись температуры интенсивного термического разложения (ТИР,°С) исходных компонентов и СВВ. Отмечалось взаимное влияние соотношения компонентов на температуру интенсивного разложения СВВ.

STUDYING THERMAL CHARACTERISTICS OF TNT–DNA MIXTURES

I. V. Chemagina, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov,
T. V. Antipova, I. A. Batalova, A. Yu. Tarasov,
N. V. Rachkova, Yu. A. Shakhtorin

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

Melting temperatures (T_{melt}, °C) and high-intensity thermal decomposition temperatures (T_{ID}, °C) of 2,4,6-trinitrotoluol (TNT) mixed with 2,4-dinitro anisol (DNA) were determined depending on percentage of components.

Consideration was given to mechanical mixtures and alloys of powdered TNT and DNA (TNT–DNA composition in percent: 95:5, 90:10, 80:20, 70:30, 65:35, 60:40, 55:45, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 and 5:95 wt%).

Melting points of original components and their mixture, i.e. TNT/DNA, were determined using a differential scanning calorimeter and a melting-point determination instrument.

Curves given by the differential scanning calorimeter were observed to have two melting peaks for all test samples of mixtures. The first peak stands for the eutectic mixture melting. The second peak demonstrates melting of the excess material.

Eutectic temperature was observed to be 55.7...55.8°С for powdered mixtures (TNT–DNA) and 50.3°С...50.9°С – for alloys.

Melting temperature data were used to construct «melting curves» for the TNT–DNA mixtures. The eutectic point of the melted TNT–DNA mixture was determined. The eutectic composition (eutectic point) determined by fusibility curves correspond to the mixture ratios:

35% DNA \leq TE \leq 50% DNA(wt.) – for powdered mixtures;

~55% TNT: ~45% DNA(wt.) – for mixture alloys.

Under up to 450°C heating at the rate of 1°C/min, the differential scanning calorimeter was used to study the thermal decomposition process and to determine temperatures when the high-intensity thermal decomposition (T_{ID} , °C) of origin components and their mixture takes place. Mutual influence of the mixture ratio and the high-intensity mixture-decomposition temperature was noted.

нейшего окисления алюминия начинается при значительно более высоких температурах, чем процесс разложения данного гидрида (разница составляет более 300°C).

Показано, что исследуемые порошки гидридов металлов, кроме основного вещества (гидридов) содержат соответствующие оксиды, возможно, чистый металл и примеси.

STUDYING CHARACTERISTICS OF METAL HYDRIDES

I. V. Chemagina, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov,
T. V. Antipova, A. Yu. Tarasov,
A. N. Gretsova, Yu. A. Shakhtorin

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

2-49

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРИДОВ МЕТАЛЛОВ

И. В. Чемагина, О. В. Костицын,
Н. П. Тайбинов, Т. В. Антипова,
А. Ю. Тарасов, А. Н. Грецова, Ю. А. Шахторин

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

В докладе представлены результаты исследований некоторых свойств порошков гидридов металлов (гидрида магния, гидрида алюминия, гидрида титана).

Исследования включали: изучение морфологических особенностей с помощью сканирующего электронного микроскопа, рентгенофазовый анализ на порошковом рентгеновском дифрактометре, термический анализ на термогравиметрическом и дифференциально-термическом анализаторах.

Проведен анализ морфологии гидридов магния, алюминия и гидрида титана. Гидрид магния состоит из частиц неправильной формы размером от 100 нм до 1 мкм, встречаются отдельные крупные кристаллы размером порядка нескольких мкм. Гидрид алюминия состоит из сростков кристаллов кубической формы, кристаллы размером от 3 мкм до 15 мкм. Гидрид титана состоит из частиц размером от нескольких сотен нанометров до 200 мкм.

Дана сравнительная характеристика термостойкости гидридов. Определены температуры разложения гидридов, температуры окисления металлов. Наиболее низкая температура разложения зафиксирована для гидрида алюминия ТНИР ~180°C. Наиболее низкая температура начала интенсивного окисления отмечена для магния ТНИО ~340°C. Для гидридов магния и титана процессы разложения и дальнейшего окисления металла на воздухе протекают практически одновременно. Для гидрида алюминия процесс даль-

Paper presents results of studying certain properties of powdered metal hydrides (magnesium, aluminum, and titanium hydrides).

Morphological traits were studied with the help of the scanning electron microscope, the X-ray powder diffractometer was used for the X-ray phase analysis, and thermal analysis was performed by means of the thermogravimetric and differential thermal analyzers.

Morphology of the magnesium, aluminum, and titanium hydrides was analyzed. Magnesium hydride was observed to include irregular-shaped particles with the size from 100 nm to 1 μ m and also individual large crystals with the size of several micrometers. Aluminum hydride was observed to include aggregates of cubical-shaped crystal having from 3 μ m to 15 μ m in size. Titanium hydride was observed to comprise particles with the size from several hundreds of nanometers up to 200 μ m.

Thermal stability of hydrides was compared. Temperatures of hydrides decomposition, as well as temperatures of metals oxidation were determined. The lowest decomposition temperature was recorded for aluminum hydride, T_{LID} ~180°C. The lowest temperature of high-intensity oxidation onset was observed for magnesium, T_{LIO} ~340°C. For magnesium and titanium hydrides, decomposition and further air oxidation of metals are running practically at the same time. For the aluminum hydride, further oxidation of aluminum begins at higher temperatures compared to decomposition of the given hydride (difference is more than 300°C).

In addition to the base materials (hydrides), the test powdered hydrides of metals contain appropriate oxides, possibly pure metal, and admixtures.

Секция 3

ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

Section 3

DENSE PLASMA PHENOMENA

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАНО-ПЛАЗМЕННАЯ ФОТОНИКА

А. А. Андреев

Санкт-Петербургский Государственный Университет,
Санкт-Петербург Россия

Государственный оптический институт
им. С. И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия
Институт им. Макса Борна, Берлин, Германия

E-mail: alexanderandreev72@yahoo.com

Лазерное излучение ультравысокой интенсивности (УВИ) производит быстрые частицы при взаимодействии с твердыми мишенями. Большинство групп использует в экспериментах тонкую фольгу из-за возможности их легкой характеристики и размещения. Импульс УВИ лазера может ускорить электроны и затем ионы в тонкой фольге до энергий десятков MeV на нуклон и высоко коллимированные пучки ионов могут быть получены. Однако, эффективность таких мишеней недостаточно высока. Ускорение частиц и генерация рентгена от различных нано структурированных мишеней, освещенных УВИ лазерным импульсом, были изучены нами аналитически и численно. Изготовление таких мишени возможно, например, в виде тонкой подложки с «щеткой», состоящей из длинных тонких проводов. Поглощение лазерной энергии в такой мишени близко к 100%. Фактор преобразования лазерной энергии в энергию быстрых ионов для такой мишени может достигать десятков процентов. Такие мишени также производят эффективно большой поток релятивистских электронов, распространяющихся вдоль проводов и после их искривления. Соединение всех проводов в один позволяет уменьшать поперечный размер облака быстрых электронов. Плотность потока энергии горячих электронов в такой связке, распространяющихся вдоль одного нано-провода, превышает в несколько раз интенсивность лазерного импульса. Аналитически и численно построены, зависимости чисел и температуры горячих и холодных электронов от параметров мишени освещенной коротким лазерным импульсом релятивистской интенсивности. Показано что изменением размера, периода и толщины нано-структурированной мишени, возможно управлять параметрами двух температурных электронных функций распределения энергии и увеличить выборочно преобразование лазерной энергии в K- α радиацию или в протонное ускорение. Результаты моделирований сравнивались с полученными экспериментальными данными и показали хорошее согласие.

RELATIVISTIC LASER NANO-PLASMA PHOTONICS

A. A. Andreev

Sankt Petersburg State University, Sankt Petersburg, Russia
Vavilov State Optical Institute, Sankt Petersburg, Russia
Max-Born Institute, Berlin, Germany

E-mail: alexanderandreev72@yahoo.com

Ultrahigh intensity (UHI) laser radiation produces fast particles at interaction with solid targets. Most groups use in experiments a thin foils because of the possibility to characterize them well and they can be positioned easily. UHI laser pulses may accelerate electrons and then ions in thin foils to energies of tens MeV per nucleon and highly collimated ion beams may be formed. Anyway, the efficiency of such targets is not so high. Particle acceleration and X-ray generation in different nanostructured targets irradiated by UHI laser pulses has been studied here with analytical model and PIC simulations. It is possible to manufacture such targets for example, as a thin substrate with «brush» consisted from long thin wires. The absorption of laser energy in such target is close to 100%. The factor of conversion of laser energy in energy of fast ions for such target can come approximately to tens percents. Such targets also generate effectively a big current of relativistic electrons, propagating along the wires and following their curvature. It follows that the optimal wire thickness should be of several lengths of the skin layer of the electrical field and has to be in the order of magnitude of tens of nanometers. The distance between wirers can vary between several Debye radiuses up to values of a few laser wavelengths. Collecting all wirers in only one allows to reduce the transverse size of fast electron cloud. The density of the energy flux of the hot electrons in such bunch, propagating along one nanowire exceeds several times the intensity of the laser pulse. By means of analytical and numerical modeling are constructed the dependences of numbers and temperatures of hot and cold electrons from the parameters of a relief targets irradiated by a short laser pulse of relativistic intensity. It is shown, that changing of a relief size, period and a thickness of a target substrate, it is possible to manipulate parameters of two temperature electron energy distribution function and to increase selectively transformation of laser energy into K- α radiation or into proton acceleration. The results of the simulations were compared with the experimental data and have shown a good coexistence

3-2

**ИЗЛУЧЕНИЕ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА ПРИ
РАСПРОСТРАНЕНИИ МОЩНЫХ КОРОТКИХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В МАССИВЕ
НЕВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ НАНОТРУБОК**

Н. Р. Садыков, Н. В. Юдина, А. В. Апороски

Снежинский Физико-Технический Институт
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
«МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: n.r.sadykov@rambler.ru

Существует большое число процессов, связанных с излучением, поглощением и усилением электромагнитных волн при сверхсветовом движении зарядов и различных систем (диполи, атомы и т. д.). При движении излучателя в среде или вблизи среды со скоростями, превосходящими фазовую скорость света в этой среде, возникают качественно новые явления – эффект Вавилова–Черенкова для заряда, черенковское излучение дипольных и магнитных моментов в безграничной среде и в щелях или каналах, черенковское поглощение, испускание черенковских глюонов при прохождении через среду партонных токов.

Рассмотрен механизм генерации излучения, источником которого являются модулированные относительно переменной $z - vt$ поверхностные токи в массиве невзаимодействующих параллельных друг другу нанотрубок. Нанотрубки ориентированы перпендикулярно оси Oz , а скорость v больше скорости света в среде. На качественном уровне изучаемый процесс излучения аналогичен излучению Вавилова–Черенкова системой диполей, которые движутся со сверхсветовой скоростью вдоль оси Oz и амплитуда которых модулирована как $f(z) = \exp((-z)/z_0)\cos((\omega_0 z)/v)$. Показано, что с помощью данного метода можно генерировать интенсивные СВЧ- и терагерцовые излучения. Дана оценка величины миллиметрового излучения, которое можно получить с помощью массива нанотрубок. При амплитуде тока $j_x = 10^5 \text{ A/m}^2$, поперечных размерах массива нанотрубок $R = 0,1 \text{ m}$, частоте собственных колебаний поверхностных токов в нанотрубках $\omega_0 = 10^{12} \text{ s}^{-1}$ величина излучения на единицу длины системой на основе нанотрубок $\Phi_p/L \approx 16 \text{ J/m}$.

Рассмотренная задача перекрывается с задачей, в которой рассмотрены трехмерные объемные проволочные метаматериалы на основе бесконечно длинных проводов 3D «wire metamaterial» или плоские полубесконечные периодические проволочные структуры. Отличие от проволочных метаматериалов состоит в том, что массив состоит из наночастиц конечной длины и в силу наличия существенного замедления поверхностных волн тока в удлиненных наночастицах размеры оказываются значительно меньше, чем в случае проволочек.

Ключевые слова: излучение Вавилова–Черенкова, наноструктуры, терагерцовое излучение, метаматериалы.

**VAVILOV–CHERENKOV RADIATION
AT THE PROPAGATION OF THE SHORT
ELECTRIC PULSES IN THE ARRAY
OF NONINTERACTING NANOTUBES**

N. R. Sadykov, N. V. Yudina, A. V. Aporoski

Snezhinsk Physics and technology Institute National Research
Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia

E-mail: n.r.sadykov@rambler.ru

There are many processes, associated with radiation, as absorption, amplifying of the electromagnetic waves at the superluminal movement of charges and the different systems (dipoles, atoms etc.). In the process of radiator movement or near the medium with the superluminal speed above the phase velocity in this medium the new effect are appear: the Vavilov–Cherenkov radiation of charge, the radiation of dipole and magnetic pulses in unlimited medium and in the gaps or in the channels, the Cherenkov absorption, the emission of Cherenkov gluons while passing the parton currents medium.

We review the mechanism of radiation generation, which sources are modulated relative to variable $z - vt$ surface currents in the arrays of non-interacting parallel nanotubes. The nanotubes are oriented perpendicularly the Oz axis and the speed v is greater the speed of light in the medium. In the qualitative sense, the process of generation is analogous to the Vavilov–Cherenkov radiation by the dipole system, moving along the Oz axis and which amplitudes are modulated as $f(z) = \exp((-z)/z_0)\cos((\omega_0 z)/v)$. It was shown that using this method one can generate intensive microwave and terahertz radiations. We give the estimate value of the millimeter radiation, which can be obtain using the nanotubes array. At the amplitude of the current $j_x = 10^5 \text{ A/m}^2$, the transverse sizes of the nanotube array $R = 0.1 \text{ m}$ and frequency of natural oscillations of surface currents in nanotubes $\omega_0 = 10^{12} \text{ s}^{-1}$, the value of radiation per length unit by the nanotube system is $\Phi_p/L \approx 16 \text{ J/m}$.

The problem we reviewed intercrosses with the problem, where the 3D wire metamaterials based on the infinitely long wires or plain semi-infinite periodic wire structures were reviewed. The difference from the wire metamaterial is that array consist of nanoparticles of finite length and due to presence of significant deceleration of surface wave currents in the prolonged nanoparticles the sizes are significantly less that in the case of wire.

Keywords: Vavilov–Cherenkov radiation, nanostructures, terahertz radiation, metamaterials

3-3

**О ЧИСЛЕННЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ
НЕУСТОЙЧИВОСТЯХ, ВОЗНИКАЮЩИХ
В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ
РАДИАТИВНО ОХЛАЖДАЮЩИХСЯ
УДАРНЫХ ВОЛН**

Д. А. Баджин^{1,2}, С. И. Глазырин^{1,2,3},
К. В. Мануковский², С. И. Блинников^{2,1,4}

¹ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия
²Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, ГНЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия
³Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, Россия
⁴Институт Физики и Математики Вселенной им. Кавли, Токио, Япония
E-mail: badjin@itep.ru, glazyrin@itep.ru, manu@itep.ru, sergei.blinnikov@itep.ru

Представлены результаты численных экспериментов по многомерному моделированию радиативно охлаждающихся ударных волн (РУВ) и их плотных слоев в астрофизических задачах с помощью различных численных методик в различных физических и вычислительных постановках. Исследуется структура плотного слоя за фронтом РУВ, его формирование и эволюция в расчетах, указываются факторы физической и численной природы, которые как способствуют поддержанию его формы, так и приводят к неустойчивостям.

Обнаружено, что при определенных физических условиях, в расчетах на декартовых сетках плотные оболочки криволинейной формы испытывают сильную изгибную неустойчивость с последующей фрагментацией вскоре после своего возникновения, тогда как на полярных они распространяются практически без искажений. Это объясняется как усиление численных изгибных возмущений, накладываемых сетками, неколлинеарными линиям тока, за счет физических неустойчивостей класса Рэлея–Тейлора, условия для которых естественным образом обнаруживаются как в структуре квазистационарного течения за фронтом РУВ, так и при эпизодах транзитного ускорения плотного слоя в процессе установления динамического баланса давлений после резкого перехода среды из адиабатического режима в режим объемных радиативных потерь. Помимо численных шумов эти неустойчивости также легко могут возбуждаться и флуктуациями параметров внешней среды. Напротив, часто упоминаемая т.н. нелинейная неустойчивость плотного слоя (нелинейная неустойчивость Вишняка) по результатам экспериментов с физическими возмущениями оказывается маловероятной в реальных условиях, т.к. обнаружено, что для эффективного возбуждения она требует весьма специфического пространственного упорядочивания флуктуаций.

Из анализа описанных явлений сформулированы новые требования к расчетным методикам, чтобы мо-

делирование радиативных ударных волн было физически корректным и свободным от численных артефактов.

**ON PHYSICAL AND NUMERICAL
INSTABILITIES ARISING IN SIMULATIONS
OF NON-STATIONARY RADIATIVELY
COOLING SHOCKS**

D. A. Badjin^{1,2}, S. I. Glazyrin^{1,2,3},
K. V. Manukovskiy², S. I. Blinnikov^{2,1,4}

¹N. L. Dukhov Research Institute for Automatics, Moscow, Russia
²Institute for Theoretical and Experimental Physics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia
³National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia
⁴Kavli Institute of Physics and Mathematics of Universe, Tokyo, Japan
E-mail: badjin@itep.ru, glazyrin@itep.ru, manu@itep.ru, sergei.blinnikov@itep.ru

We describe our modelling of the radiatively cooling shocks and their thin shells with various numerical tools in different physical and calculational setups. We inspect structure of the dense shell, its formation and evolution, pointing out physical and numerical factors that sustain its shape and also may lead to instabilities.

We have found that under certain physical conditions, the circular shaped shells show a strong bending instability and successive fragmentation on Cartesian grids soon after their formation, while remain almost unperturbed when simulated on polar meshes. We explain this by physical Rayleigh–Taylor like instabilities triggered by corrugation of the dense shell surfaces by numerical noise. Conditions for these instabilities follow from both the shell structure itself and from episodes of transient acceleration during re-establishing of dynamical pressure balance after sudden radiative cooling onset. They are also easily excited by physical perturbations of the ambient medium. The widely mentioned Non-linear Thin Shell Instability, in contrast, in tests with physical perturbations is shown to have only limited chances to develop in real radiative shocks, as it seems to require a special spatial arrangement of fluctuations to be excited efficiently.

The described phenomena also set new requirements on further simulations of the radiatively cooling shocks in order to be physically correct and free of numerical artefacts.

3-4

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОГО РЕЖИМА УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ С ПОМОЩЬЮ СОСТАВНОЙ МИШЕНИ

Байвэнь Ли¹ и Вэйпэн Яо²¹Институт прикладной физики и вычислительной математики, Пекин 100094, КНР²Школа физики, Пекинский университет, Пекин 100871, КНР

E-mail: li_baiwen@iapcm.ac.cn

Для оптимизации комбинированного режима ускорения протонов предложена составная мишень, подтвержденная путем численного моделирования воздействия сверхинтенсивного лазерного импульса с круговой поляризацией (СР) на мишень из плотного углеводородного материала (СН) вместо мишени из чистого водорода (Н). Моделирование проводилось методом частиц в ячейке (PIC). Режим комбинированного ускорения протонов представляет собой двухэтапную схему ускорения, сочетающую в себе этап ускорения с доминированием радиационного давления (RPDA) и этап лазерного кильватерного ускорения (LWFA), следующие друг за другом. На первом этапе протоны предварительно ускоряются во время облучения СН мишени сверхинтенсивным лазерным импульсом. После прохождения лазерного импульса через СН мишень и его распространения в газовой плазме малоплотного трития, лазерный импульс возбуждает кильватерную волну. Протоны большой энергии, предварительно ускоренные на первом этапе, теперь могут быть ускорены до гораздо более высоких энергий с помощью LWFA. В результате, по сравнению с использованием мишени из чистого Н генерируются протоны с более высокими энергиями (примерно от 20 ГэВ до 30 ГэВ) и более низким разбросом по энергии (примерно от 18% до 5% полной ширины на полувысоте). Обнаружено, что при использовании мишеней из СН протоны могут быть более надежно пред-ускорены во время первого RPDA-этапа. С увеличением отношения концентраций углерода и водорода разброс по энергии становится меньше, а максимум энергии протона – выше. Также показано, что для одной и той же интенсивности лазерного излучения, составляющей около 10^{22} Вт/см², использование СН мишени приведет к более высокой энергии протонов по сравнению с мишени из чистого Н. Кроме того, энергию протонов можно еще более увеличить путем применения отрицательного в продольном направлении градиента плотности окружающей плазмы.

Ключевые слова: комбинированное ускорение протонов; углеводородная мишень; ускорение с доминированием радиационного давления; лазерное кильватерное ускорение.

OPTIMIZATION OF THE COMBINED PROTON ACCELERATION REGIME BY USING A TARGET COMPOSITION SCHEME

Baiwen Li¹ and Weipeng Yao²¹Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, People's Republic of China²School of Physics, Peking University, Beijing 100871, People's Republic of China

E-mail: Li_baiwen@iapcm.ac.cn

In order to optimize the combined proton acceleration regime, a target composition scheme is proposed and verified by particle-in-cell (PIC) simulations by using an ultra-intense circularly polarized (CP) laser pulse irradiating an overdense hydrocarbon (CH) target, instead of a pure hydrogen (H) target. The combined acceleration regime is a two-stage proton acceleration scheme combining the radiation pressure dominated acceleration (RPDA) stage and the laser wakefield acceleration (LWFA) stage sequentially together. In the first stage, protons get pre-accelerated when an ultraintense laser pulse irradiating the CH target. After laser pulse penetrating through the CH target and propagating in the underdense tritium plasma gas, the wakefield is driven by the laser pulse. The energetic protons which pre-accelerated by first stage can now get accelerated to much higher energy by LWFA. Finally, protons with higher energies (from about 20 GeV up to 30 GeV) and lower energy spreads (from about 18% down to 5% in full-width at half maximum) are generated, as compared to the use of a pure H target. It is found that protons can be more stably pre-accelerated in the first RPDA stage when using CH targets. With the increase of the carbon-to-hydrogen density ratio, the energy spread is lower and the maximum proton energy is higher. It also shows that for the same laser intensity around 10^{22} W/cm², using the CH target will lead to a higher proton energy, as compared to the use of a pure H target. Additionally, proton energy can be further increased by employing a longitudinally negative gradient of a background plasma density.

Keywords: Combined proton acceleration; Hydrocarbon target; Radiation pressure dominated acceleration; Laser wakefield acceleration

3-5

ТОРМОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ В ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЕ

Бинь Хэ и ЦзяньГо Ван

Институт прикладной физики и вычислительной
математики, Пекин 100088, КНР

E-mail: hebin-rc@163.com or he_bin@iapcm.ac.cn

Нагрев DT смеси альфа-частицами является крайне важным моментом для реализации термоядерного синтеза, и потому изучался в течение многих лет. Помимо DT-топлива в конструкциях термоядерных мишеней или сборок для быстрого термоядерного зажигания, нагреваемых ионами, используются и другие материалы, такие как Be и Au. Во время процесса имплозии эти материалы неизбежно смешиваются с DT топливом. Нам до сих пор неизвестно, как примешанный материал влияет на нагрев DT топлива. Это обстоятельство послужило мотивацией для настоящей работы, в которой исследуется случай горячей плотной смеси с Au.

Для исследования этой проблемы на основе модели среднего атома [1] мы недавно провели ряд работ [2] по первопринципному и самосогласованному расчету тормозной способности в плазме, где рассматривались ядерное торможение, неупругое торможение и торможение электронами плазмы. В нашей работе мы провели подробные расчеты неупругих процессов и ввели новое распределение по скоростям для свободных электронов, которое отличается от максвелловского распределения из-за влияния сильного электростатического поля многозарядного иона мишени. Для расчета торможения альфа частиц в DT плазме вводится механизм флуктуации поля [3]. Установлено, что нагрев плазмы прекращается, когда энергия налетающей частицы снижается до температуры плазмы T_e . На основании этого получено распределение электрон-ионной энергии в DT плазме. Наши расчеты хорошо воспроизводят экспериментальные данные в плазме Al [4] и Be. Наконец, проведено исследование распределения электрон-ионной энергии для альфа частиц в плазме смеси DT и Au в широком диапазоне температур и плотностей DT плазмы в случае твердотельного Au при его различном процентном содержании.

Благодарности: Настоящая работа выполнена при поддержке Научно-технического фонда Китайской академии технической физики по гранту № 2014B09036, Китайского национального научного фонда (гранты №№ 111574034, U1530142, 11474031 и 11371218).

Литература

1. Balazs F. Rozsnayai, Phys. Rev. A. 5 1137 (1972)
2. B. He and J. G. Wang, Nuclear Fusion 53, 093009 (2013); High Energy Density Physics 17, 248 (2015)
3. W. D Kraeft and B. Strege, Physica A 149, 313 (1988)
4. B. He and J. G. Wang, Phys. Plasmas 53, 063111 (2014)

STOPPING POWER FOR ENERGETIC IONS IN HOT PLASMAS

Bin He and JianGuo Wang

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics,
Beijing 100088, P.R. China

E-mail: hebin-rc@163.com or he_bin@iapcm.ac.cn

The heating of DT ion by alpha particle is crucial to the realization of the nuclear fusion and it has been studied for many years. Besides DT material, some other materials such as Be and Au are often used in the design of fusion targets or fusion device of fast ignition driven by ions. During the implosion process these materials would mix with DT fuel inevitably. How the mixed material influence the heating of DT ion is still unknown to us, which is the motivation of the present work, where the case for hot dense Au mixture is considered.

In order to investigate this problem basing on average atom model [1] we have made some works [2] in recent years for ab initio and self-consistent calculation of stopping power in plasmas, where nuclear stopping, inelastic stopping and plasma electronic stopping are considered. In our work the inelastic processes are calculated in detail and a new velocity distribution for free electrons is introduced which is different from the Maxwellian distribution due to the strong electrostatic field from the highly charged target ion. The mechanism of the field fluctuation [3] is introduced to get the stopping of alpha particles in DT plasmas and it is found that the heating of the plasma is stopped when the projectile energy is slowed down to the plasma temperature T_e . Based on this the electron-ion energy partition in DT plasmas is obtained. Our calculation could well reproduce the experimental data in Al [4] and Be plasmas. Finally electron-ion energy partition for alpha particle in the mixed DT and Au plasmas is studied in the case of solid Au density with a huge range of plasma temperature and DT density for different percentage of Au.

Acknowledgement: This work was supported by the Science and Technology Foundation of Chinese Academy of Engineering Physics under grant No. 2014B09036, the Chinese National Foundation of Sciences (Grants Nos. 111574034, U1530142, 11474031, and 11371218).

References

1. Balazs F. Rozsnayai, Phys. Rev. A. 5 1137 (1972)
2. B. He and J. G. Wang, Nuclear Fusion 53, 093009 (2013); High Energy Density Physics 17, 248 (2015)
3. W. D Kraeft and B. Strege, Physica A 149, 313 (1988)
4. B. He and J. G. Wang, Phys. Plasmas 53, 063111 (2014)

3-6

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ СИЛЬНО НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ

С. В. Барухвостов, Н. Б. Волков¹,
К. А. Нагаев, А. И. Липчак, И. С. Турмышев
Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
¹E-mail: nbv@iep.uran.ru

Электронный пучок пикосекундной длительности является перспективным инструментом для возбуждения сильно неравновесных состояний в металле (металлической электронной плазме). Цель нашей работы – исследование характеристик электронного пучка, оптимальных с точки зрения его применения для исследования нелинейных механизмов возбуждения и релаксации сильно неравновесных состояний металла.

Для генерации электронного пучка нами использовалась установка EXCITOR, описанная ранее в работе [1]. Измерялось напряжение на входе вакуумного диода с помощью емкостного делителя и ток пучка с помощью токового коллектора, основным элементом которого являлся цилиндр Фарадея. Сигналы с делителя и коллектора регистрировались 4-х канальным цифровым осциллографом Tektronix DPO70404C с полосой пропускания 4 GHz. В экспериментах использовались медный, самариевый, вольфрамовый и графитовый катоды одинаковой формы с острой кольцевой кромкой диаметром 2 мм. Расстояние между катодом и анодной фольгой изменялось от 1 до 3,1 мм для катодов из меди, самария и вольфрама. Для графитового катода это расстояние составляло 1–6,1 мм. В результате экспериментов установлены следующие оптимальные параметры электронного пучка: медный катод, $U_{\max} = -142 \pm 2$ kV и длительность импульса на полуширине $\Delta t_{0,5}^{(U)} = 416 \pm 16$ ps – длина промежутка $L = 2$ мм, $I_{\max} = -13,85 \pm 0,55$ А и $\Delta t_{0,5}^{(I)} = 198 \pm 6$ ps;

Sm:

$$U_{\max} = -146 \pm 2 \text{ kV}, \quad \Delta t_{0,5}^{(U)} = 388_{-28}^{+44} \text{ ps} \quad - \quad L = 1,9 \text{ мм},$$

$$I_{\max} = -11,233_{+2,433}^{-1,567} \text{ А}, \quad \Delta t_{0,5}^{(I)} = 188_{-12}^{+16} \text{ ps};$$

$$\text{W: } U_{\max} = -148_{+4}^{-2} \text{ kV}, \quad \Delta t_{0,5}^{(U)} = 390,667_{-10,667}^{+17,333} \text{ ps} -$$

$$L = 1 \text{ мм}, \quad I_{\max} = -12,467_{+1,967}^{-1,48} \text{ А},$$

$$\Delta t_{0,5}^{(I)} = 186,667_{-6,667}^{+9,333} \text{ ps};$$

графит:

$$U_{\max} = -144,333_{+5,333}^{-5,667} \text{ kV}, \quad \Delta t_{0,5}^{(U)} = 458,667_{-82,667}^{+65,333} \text{ ps} -$$

$$L = 3,1 \text{ мм}, \quad I_{\max} = -10,757_{+0,957}^{-1,913} \text{ А}, \quad \Delta t_{0,5}^{(I)} = 220_{-32}^{+24} \text{ ps}.$$

По отпечаткам пучка на дозиметрической пленки ЦДП-2-Ф2 получена верхняя оценка диаметра пучка D_b и угла его расходимости α для медного катода при $L=2$ мм: $D_b = 3,5 - 4$ мм, $\alpha = 20,556 - 26,565^\circ$.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания №0389-2014-0006, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №. 16-08-00466) и ФАНО в рамках программы фундаментальных исследований Уральского отделения РАН «Вещество при высоких плотностях энергии» (проект № 15-12-8).

Литература

1. К. А. Нагаев, С. В. Барухвостов, И. Л. Музюкин и др. // Известия вузов. Физика, 2014. Т. 57. № 11/3. С. 96–99.

CHARACTERISTICS OF PICOSECOND ELECTRON BEAM TO EXCITE OF HIGH NON-EQUILIBRIUM STATES IN METAL SOLID-STATE-DENSITY PLASMA

S. V. Barahvostov, N. B. Volkov¹, K. A. Nagaev,
A. I. Lipchak, I. S. Turmyshev

Institute of Electrophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

¹E-mail: nbv@iep.uran.ru

Picosecond e-beam is a perspective instrument for the excitation of high non-equilibrium states in the metal (metal electron plasma). The main aim of the work is to find the e-beam characteristics that are optimal from the point of view of its application for the investigation of nonlinear excitation and relaxation mechanisms of highly non-equilibrium states in metal.

To generate e-beam earlier described in [1] experimental setup EXCITOR was used. Input voltage on the vacuum diode was measured by the capacitive divider and the beam current measured by the current collector based on Faraday cup detector. The signals from the divider and collector were recorded by 4-channel digital oscilloscope Tektronix DPO70404C with bandwidth of 4 GHz. Copper, samarium, tungsten and graphite cathodes of similar shape with the ring sharp edge with diameter of 2 mm were used in experiments. The distance between the cathode and the anode foil was varied from 1 to 3.1 mm for cathodes made of copper, samarium and tungsten. For graphite cathode distance was varied from 1 to 6.1 mm. The following optimum electron beam parameters were obtained in this experiments: $U_{\max} = -142 \pm 2$ kV and full width at half maximum $\Delta t_{0,5}^{(U)} = 416 \pm 16$ ps at distance between cathode and anode $L = 2$ mm, $I_{\max} = -13.85 \pm 0.55$ A and $\Delta t_{0,5}^{(I)} = 198 \pm 6$ ps;

Sm:

$$U_{\max} = -146 \pm 2 \text{ kV}, \quad \Delta t_{0,5}^{(U)} = 388_{-28}^{+44} \text{ ps} \quad - \quad L = 1.9 \text{ мм},$$

$$I_{\max} = -11.233_{+2,433}^{-1,567} \text{ А}, \quad \Delta t_{0,5}^{(I)} = 188_{-12}^{+16} \text{ ps};$$

W:

$$U_{\max} = -148_{+4}^{-2} \text{ kV}, \quad \Delta t_{0,5}^{(U)} = 390.667_{-10,667}^{+17,333} \text{ ps} -$$

$$L = 1 \text{ мм}, \quad I_{\max} = -12.467_{+1,967}^{-1,48} \text{ А},$$

$$\Delta t_{0,5}^{(I)} = 186.667_{-6,667}^{+9,333} \text{ ps};$$

graphite:

$$U_{\max} = -144.333_{+5,333}^{-5,667} \text{ kV}, \quad \Delta t_{0,5}^{(U)} = 458.667_{-82,667}^{+65,333} \text{ ps} -$$

$$\text{ps} - L = 3.1 \text{ мм}, \quad I_{\max} = -10.757_{+0,957}^{-1,913} \text{ А},$$

$$\Delta t_{0,5}^{(I)} = 220_{-32}^{+24} \text{ ps}.$$

Upper bound of diameter D_b and divergence angle α of e-beam for copper cathode were obtained at $L = 2$ mm using e-beam imprints on the CDP-2-F2 dosimetric film: $D_b = 3.5 - 4$ mm, $\alpha = 20.556 - 26.565^\circ$.

This work was carried out within the state order No. 0389-2014-0006 and under the partial financial support of the RFBR (project No. 16-08-00466) and the FASO within the Ural Branch of RAS fundamental research program «Matter at high energy densities» (project No. 15-1-2-8).

References

1. K. A. Nagaev, S. V. Barahvostov, I. L. Muzyukin et al. // *Izv. Vuz. Fizika*, 2014. V. 57. No. 11/3. P. 96–99.

3-7

АНОМАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОГЛОЩЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С. И. Глазырин^{1,3}, А. В. Брантов^{1,2}, С. А. Карпов¹,
И. Ф. Потапенко^{1,4}, В. Ю. Быченков^{1,2}

¹Центр фундаментальных и прикладных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматки им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

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

³Институт теоретической и экспериментальной физики, НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

⁴Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

E-mail: glazyrin@itep.ru

Современные схемы лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) требуют использования мощных потоков лазерного излучения, облучающих либо саму термоядерную мишень, либо стенки бокс-конвертера (холлаума). В условиях, когда эти потоки не превышают критические значения для возбуждения лазер-плазменных неустойчивостей, поглощение описывается моделью обратно-тормозных процессов, что учитывается во всех стандартных ЛТС-кодах. Известно, что лазерное энерговыделение модифицирует функцию распределения электронов, отклоняя ее от максвелловской. Это значит, что корректный учет процессов в области энерговыделения требует кинетического описания. В данном докладе рассматриваются еще два кинетических эффекта, влияющих на эффективность поглощения лазерного излучения плазмой. Первый эффект – так называемый нелокальный теплоперенос, когда из-за больших градиентов температуры в области энерговыделения тепловой поток отклоняется от закона Спитцера-Харма. Поток тепла влияет на температуру в области поглощения и, тем самым, контролирует эффективность поглощения лазера. Второй эффект – генерация ионно-звуковой турбулентности (ИЗТ), условия для развития которой мы обсуждаем в этой работе. ИЗТ характеризуется мелко-масштабными флуктуациями плотности, на которых возникает дополнительное, так называемое аномаль-

ное поглощение. Учет указанных процессов важен как в схемах с прямым, так и непрямим облучением на современных установках ЛТС.

ANOMALOUS EFFECTS IN LASER ABSORPTION

S. I. Glazyrin^{1,3}, A. V. Brantov^{1,2}, S. A. Karpov¹,
I. F. Potapenko^{1,4}, V. Yu. Bychenkov^{1,2}

¹Center for Fundamental and Applied Research, Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

²Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Institute for Theoretical and Experimental Physics, NRC KI, Moscow, Russia

⁴Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: glazyrin@itep.ru

Modern schemes for inertial confinement fusion (ICF) with lasers utilize high fluxes that irradiate a thermonuclear target or a hohlraum. In case when these fluxes do not exceed critical values for initiating laser-plasma instabilities, the absorption is described by the inverse bremsstrahlung model. The model is implemented in all ICF codes. It is well-known that laser energy deposition perturbs electron distribution function and it deviates from Maxwell. This fact requires the use of kinetics to correctly describe processes in the region of energy deposition. This paper considers two additional kinetic effects, that affect the efficiency of laser absorption by plasma. The first – non-local heat transport, when the heat flux deviates from the Spitzer-Harm law due to large temperature gradients. The heat transport determines the temperature in energy deposition region and, therefore, controls the efficiency of absorption. The second effect – ion-acoustic turbulence (IAT). The conditions for IAT are discussed in the paper. The turbulence is manifested by small-scale density fluctuations, where additional laser absorption appears (it is called anomalous). Accounting for these effects is crucial both for direct and indirect drive schemes at modern laser facilities.

3-8

ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 2D МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. С. Гнутов, С. А. Донцов, К. А. Волкова

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

E-mail: asgnutov@vniief.ru

Произведена оценка величины магнитного поля, возникающего при взаимодействии лазерного излучения установки мегаджоульного класса с твердой

мишенью. Из возможных механизмов образования самогенерирующихся магнитных полей в области лазерного пятна рассматривается один, роль которого предполагается ведущей, а именно – генерация магнитного поля на градиентах электронной плотности и температуры.

Для оценки уровня достижимых значений магнитной индукции в области разлета лазерной плазмы выполнен численный расчет образования лазерной плазмы при поглощении лазерного излучения плоской золотой мишенью в двумерной геометрии. Расчет учитывал трехтемпературную газодинамику, теплопроводность, перенос лазерного излучения, перенос рентгеновского излучения. Так как примененная расчетная методика не является магнитогидродинамической, для выполнения искомой оценки была проведена постобработка полученных результатов.

В результате газодинамического расчета и постобработки его результатов получены распределения генерирующего члена для индукции магнитного поля в области лазерного пятна для заданных условий облучения. Картина распределения оказалась неоднородной, фрагментированной и включает зоны ориентации магнитного поля как в направлении правого винта (относительно направления падения лазерного излучения), так и против него. Зона поглощения лазерного излучения вблизи критической поверхности (на глубине проникновения лазерного излучения) представляет собой зону сильно фрагментированной генерации, где встречаются как положительно направленные, так и отрицательно направленные источники магнитного поля большой интенсивности. Величина скорости образования магнитного поля достигает, в отдельных точках пространства, значения 100 МГс/нс. Величина лазер-генерируемого магнитного поля, оцененная как соответствующий интеграл от рассчитанных скоростей образования поля в пространстве, в некоторых областях достигает значений 10–100 МГс. Область пространства, в которой реализуется генерация магнитного поля с величиной более 1 МГс, представляет собой цилиндрический слой вокруг лазерного пучка длиной около 1,5 мм и толщиной до 0,2 мм. Магнитное поле ориентировано преимущественно по правому винту относительно направления падения лазерного излучения.

MAGNETIC FIELD GENERATION IN HIGH-ENERGY LASER BEAM PLASMA AS A RESULT OF 2D SIMULATION

A. S. Gnutow, S. A. Dontsov, K. A. Volkova

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

E-mail: asgnutow@vniief.ru

The estimate of value of magnetic field which occurs by interaction between laser radiation of MJ-class facility and solid target is performed. One of probable mechanisms of self-generating magnetic field formation in laser

spot is considered that is supposed to play a fundamental part, namely magnetic field generation on gradients of electron density and temperature.

To estimate reached values of magnetic induction in laser plasma spread area, numerical calculation was performed where laser plasma was generated by laser radiation absorption in plane golden target in 2D-geometry. Calculation takes account of three-temperature gas dynamics, heat conductivity, laser and X-rays radiation transport. Because applied calculation method is not magnetohydrodynamical, after-treatment of obtained results was carried out.

As a result of gas-dynamical calculation and its after-treatment distributions of magnetic induction generation term in laser spot were obtained for preset conditions of irradiation. Distribution pattern is found to be dissimilar and includes magnetic field orientation areas both right-hand screw directed (relative to laser beam incidence direction) and against one. Laser radiation absorption area nearby critical surface (at the depth of laser penetration) represents area of greatly fragmented generation, where high-intensity magnetic field sources occur both positive directed and negative directed. Value of magnetic field formation rate comes up to 100 MGs/ns in some spots. Value of laser-generated magnetic field which is estimated as respective integral of calculated magnetic field formation rates in space comes up to 10–100 MGs in some areas. Spatial region where magnetic generation carries out over 1 MGs represents a cylindrical layer round the laser beam about 1.5 mm length and to 0.2 mm thick. Magnetic field is mainly oriented on right-hand screw relative to laser beam incidence direction.

3-9

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ИНТЕНСИВНЫМ «МЕДЛЕННЫМ» СВЕТОМ

Е. А. Говрас, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков

Центр фундаментальных и прикладных исследований,
Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия

E-mail: egovras@lebedev.ru

С начала 2000-х годов задача генерации ускоренных частиц при взаимодействии мощных лазерных импульсов с различными мишенями является одним из самых активно развивающихся направлений физики высоких плотностей энергии. И если энергия лазерно-ускоренных электронов за последние двадцать лет выросла более чем в 100 раз, то максимально достижимая энергия ионов в экспериментах с лазерной плазмой практически не изменилась. В частности, это связано с малой длиной ускорения частиц: являясь величиной порядка дебаевского радиуса лазерно-нагретых электронов, даже для современных ультраре-

лятивистских лазерных импульсов она не превышает одного микрона. Возможным решением данной проблемы является переход от классической схемы ускорения стационарным полем разделения заряда («виртуальный катод» или TNSA – Target Normal Sheath Acceleration) к движущимся ускоряющим структурам. Но в отличие от, например, кильватерного ускорения электронов, вследствие большей массы ионы не могут быть «подхвачены» быстро движущимся полем, поэтому его необходимо сильно замедлить на начальной стадии ускорения. Этого можно добиться использованием мишеней с плотностями порядка релятивистской критической: низкоплотные мишени нового поколения из вспененных углеродных нанотрубок.

В данной работе на основе теоретических и численных исследований изучено ускорение ионов полем разделения заряда пондеромоторно отжатых электронов, ускоренно движущимся по малоплотной мишени. Получены рекомендации по увеличению максимальной энергии пучка, обусловленной синхронизацией темпа набора энергии ионами с ускорением лазерного импульса при его движении по мишени. Проанализировано количество ускоряемых частиц и предложены способы его увеличения. Осуществлен подбор параметров мишени, которые обеспечивают корректное «торможение» лазерного импульса при входе в мишень и правильный темп его ускорения внутри. Проведено сравнение характеристик генерируемых пучков с получаемыми при использовании оптимизированных твердотельных фольг.

ION ACCELERATION BY INTENSE «SLOW» LIGHT

E. A. Govras, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov

Center for fundamental and applied research, FSUE VNIIA,
Moscow, Russia

Lebedev Physics Institute, Moscow, Russia

E-mail: egovras@lebedev.ru

From the beginning of 2000-s problem of accelerated particle generation during interaction of intense short laser pulses with various targets is one of the most actively developed field of high energy density physics. While energy of laser-accelerated electron has grown by a factor of 100 in last twenty years, maximum ion energy in laser-plasma experiments has barely changed. In particular it is because of small acceleration length of particles: being on the order on Debye length of laser-heated electrons, even for modern ultra-relativistic laser pulse it doesn't exceed 1 micron. A possible solution of this problem is to change classical scheme of acceleration by stationary charge separation field («virtual cathode» or TNSA – Target Normal Sheath Acceleration) to new one, concerning moving accelerating structures. Unlike electrons in, for example, wakefield acceleration, heavier ions can't be «caught» by fast accelerating field. That is why field needs to be slowed down at initial acceleration stage. This could be achieved for targets of relativistic

critical density: low-density targets of new generation from foamed carbon nanotubes.

This paper concerns theoretical and numerical study of ion acceleration by charged separation field, formed by ponderomotively pushed electrons, moving with acceleration inside low-density target. Some recommendations were obtained to increase bunch maximum energy by synchronizing ion energy gain rate with laser pulse acceleration inside the target. A total number of accelerated particles was also analyzed together with ways of its increasing. Target parameters have been selected to provide correct pulse «slowing down» at target beginning and acceleration rate needed for synchronization. Obtained characteristics of generated bunches have been compared with case of using optimized solid-state foils.

3-10

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРЕНИЯ ПЛАСТИН В СХЕМЕ С ГИТ НА ОСНОВЕ КОНДЕНСАТОРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

A. Н. Григорьев, А. В. Павленко, Е. И. Карнаухов,
С. С. Мокрушин, М. А. Борщевский

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

E-mail: alex_nick@mail.ru, avpavlenko@vniitf.ru

Возможность разгона ударников до скоростей ~10 км/с с помощью импульсного магнитного поля послужило стимулом для применения и соответствующего развития электрофизической техники в последние два десятилетия. При этом нахождение оптимальных параметров установки (выбор материала ударника и его размеров, индуктивности и емкости разрядного контура установки) является важным этапом на пути получения максимальных скоростей пластины-ударника при ее электромагнитном ускорении с помощью установок на основе конденсаторных накопителей энергии.

В работе рассмотрены вопросы оптимизации электромагнитного ускорения пластин в схеме с генератором импульсных токов (ГИТ) на основе конденсаторного накопителя энергии, в частности за счет подбора параметров схемы, материала пластины и ее размеров для получения наиболее высоких скоростей разгоняемой пластины и давлений в нагружаемом образце.

OPTIMIZATION OF ELECTROMAGNETIC ACCELERATION OF PLATES IN THE CIRCUIT WITH THE SURGE-CURRENT GENERATOR BASED ON THE CONDENSER-TYPE ENERGY STORAGE

A. N. Grigoriev, A. V. Pavlenko, E. I. Karnaukhov,
S. S. Mokrushin, M. A. Borschevsky

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

E-mail: alex_nick@mail.ru, avpavlenko@vniitf.ru

Capability to accelerate impactors up to ~10 km/s with the help of the pulsed magnet field served as the incentive for application and development of the electro-physical equipment in recent two decades. In these circumstances, identifying optimal parameters of a facility (material of an impactor, its sizes, as well as inductive property and discharge circuit of a facility) is critically important in order maximum velocities of the impacting plate could be attained when it is electromagnetically accelerated using facilities based on condenser-type energy storages.

The paper considers optimization of the plate's electromagnetic acceleration in the circuit with the surge-current generator based on the condenser-type energy storage, in particular due to appropriately identified circuit parameters, plate material, and plate sizes in order plates could be accelerated to the highest possible velocities to attain highest possible pressures in the loaded sample.

данной нагрузкой. Активная часть импеданса характеризует процесс ускорения частиц, реактивная часть импеданса – накопление энергии взаимодействия при разлете. Через импеданс выражаются мощностные, силовые характеристики взаимодействия и э.д.с. в цепи ИМП. Аналитические выражения для импеданса определяются электромагнитными свойствами потока и пространственной конфигурацией полного тока в источнике магнитного поля.

Конфигурация тока в ИМП вводится на основе суперпозиции дипольных и тороидальных распределенных в пространстве намагниченностей, топологическое различие пространственной структуры которых обуславливает появление бессиловой компоненты в трехмерной структуре АЭДО, что уменьшает суммарный импеданс.

3D структура поля АЭДО вычисляется, но наиболее просто представлена алгебраическими выражениями в Фурье-образах. Здесь поле АЭДО – это суперпозиция эллиптически поляризованных плоских «магнитостатических волн» с комплексными амплитудами. Спектры волн и другие параметры Стокса для магнитостатических волн в АЭДО зависят от направления и модуля волнового вектора. Параметры Стокса могут быть определены движущимися через АЭДО синхронизованными магнитными датчиками на спутниках или при разлете плазмы относительно синхронизованных магнитных датчиков.

В частности, обнаружение 1D структур тока в АЭДО определяется только сигналами с одним определенным направлением волнового вектора, в частности радиальным. Поляризованной линейно гармонике поля соответствует силовая компонента, с масштабом определяемым характерным модулем волнового вектора (плоский 1D токовый слой, 1D цилиндрический «z» и «тета» пинчи). Обнаружению в этих же условиях поляризованной циркулярной гармонике соответствует бессиловая компонента уже с иными масштабами (1D токовые слои с широм, 1D скрученные цилиндрические магнитные трубки) в АЭДО.

Формирование АЭДО в Фурье-представлении – это процесс квазимагнитостатики в горячей бесстолкновительной плазме в «закритическом» электромагнитном режиме, внутри резонансной линии поглощения на «нулевой» частоте. Режим требует кинетического описания с учетом формы функции распределения электронов (ФРЧ) в резонансной полосе. В зависимости от формы ФРЧ плазма внутри линии ведет себя и как проводник, и как магнетик (диамагнетик, парамагнетик), что определяется на основе параметра электромагнитной добротности потока G . Структура полей АЭДО определяется двумя индуцированными кинетическими масштабами пространственной дисперсии движущейся плазмы: аномальный и диамагнитный скин слой.

Работа поддержана грантами РФФИ (проекты № 14_02_00133, № 17_02_00910), мегагрантом (контракт № 14.Z50.31.0007), программами ОФН и Президиума РАН.

3-11

СИЛОВЫЕ И БЕССИЛОВЫЕ КОНФИГУРАЦИИ В ИМПЕДАНСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ 3D АСИММЕТРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ДИФфуЗИОННОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ

В. М. Губченко

Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

Трехмерная асимметричная электронная диффузионная область (АЭДО) магнитного пересоединения – это структура электромагнитных полей и вихревых токов общего 3D вида, индукционно возбуждаемых «поток» плазмы, движущимся относительно стороннего источника магнитного поля (ИМП). Такие возбуждения становятся типичными в лазерной (плазма ФВПЭ) и в космической плазмах, находящихся в горячих беспотолкновительных кинетических режимах разлета и имплозии.

Для ИМП, сформированного относительно независимым динамо процессом, АЭДО является импе-

Литература

V. M. Gubchenko, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015. Vol. 55, No. 7, pp 831-845, No. 8, 1009-1025. DOI: 10.1134/S0016793215070099, 10.1134/S0016793215080101

**FORCED AND FORCELESS CONFIGURATIONS
IN THE IMPEDANCE CHARACTERISTICS
OF THE 3D ASYMMETRIC
ELECTRON DIFFUSION MAGNETIC
RECONNECTION REGION**

V. M. Gubchenko

Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

The 3D asymmetric electron diffusion region (AEDR) of magnetic reconnection is the structure of electromagnetic fields and eddy currents of the 3D general form inductively excited by a plasma flow moving relative to the external sources of the magnetic field (ESMF). These excitations are typical in the laser HED and space plasmas which are in the regimes of hot collisionless plasma expansion and implosion.

For the ESMF formed by a relatively independent dynamo process the AEDR, the impedance load. The active part of the impedance characterizes the particle acceleration, while the reactive part of the impedance characterizes accumulation of magnetic energy during expansion.

Via the impedance the power, force and e.m.f. characteristics of interaction can be expressed. Expressions for the impedance are defined by the electromagnetic properties of that flow and by spatial characteristics of current circulation in the ESMF.

Coiled configuration of the current in the ESMF was introduced as a superposition of the dipole and toroid distribution in spatial magnetizations. Topological difference of the dipole and toroid currents provides the appearance of the force-free component in the 3D AEDR structure. Force free component decreases the general impedance of the coiled configuration.

The 3D spatial structure has been calculated, but most effectively it can be introduced by algebraic expressions via Fourier images. The field of the AEDR is the package of elliptically polarized plane magnetostatic waves with complex amplitudes. Spectrum of the waves and other Stokes parameters in the AEDR depends on the direction and modul of the wave vector. Stokes parameters can be defined by moving through AEDR of the magnetic probes on synchronized satellites or during the AEDR plasma motion relative stationary synchronized laboratory probes.

In particular, detection of the 1D current structures in the AEDR is defined by signals with only one direction or only radial component of the wave vector. The linearly polarized harmonics of the field is related the force field component; the scale is defined by a characteristic module of the wave vector (plane 1D current sheet, 1D cylindrical «z» and «theta» pinches). Detection in the same condition of the circular polarized harmonics is related to force-free

component with another characteristic module (1D shear current sheets, 1D force-free cylindrical magnetic tubes) in the AEDR.

The formation of the AEDR is a quasi magnetostatic process in a hot collisionless plasma in overcritical electromagnetic regime which is inside the resonance absorption line at t zero frequency. The regime requires kinetic description with allowance the PDF shape in the resonance band. Depending on the PDF shape the plasma can behave as conductor or magnetic (diamagnetic or paramagnetic) media. It is defined by the parameter of electromagnetic quality G . The structure of the AEDR fields is defined by the two induced spatial dispersion scales of the moving plasma namely anomalous and diamagnetic skin scales.

The work was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (projects Nos. 14_02_00133, and 17_02_00910), Programs of the Presidium and the Physical Science Division of the RAS and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (contract No. 14.Z50.31.0007).

References

V. M. Gubchenko, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015. Vol. 55, No. 7, 831-845, No. 8, 1009-1025. DOI: 10.1134/S0016793215070099, 10.1134/S0016793215080101.

3-12

**ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА НА Nd СТЕКЛЕ
С ПРЕДЕЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ПО КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА
И В ИНТЕРЕСАХ ЛТС**

С. А. Белков, И. Н. Воронич, С. Г. Гаранин,
К. В. Губский, В. Н. Деркач, А. П. Кузнецов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
НИЯУ-МИФИ, Москва, Россия

Предложен вариант усовершенствования схемы лазерного усиления на установке на неодимовом стекле. Была получена энергия излучения до 7 кДж в схеме лазерного усиления на основе 14 активных электронов в пучке размером 20×20 см² с коэффициентом заполнения 0,8 при длительности импульса 3нс. Расхождение излучения на выходе системы составляет до $<4 \times 10^{-5}$ радиан.

Канал усиления находится на поверхности площадью $25 \times 1,5$ м², может масштабироваться и соединяться в многоканальные модули с отдельной насосной системой. Система усиления может также использоваться для создания канала с наносекундной и субнаносекундной длительностью импульса.

**Nd-GLASS LASER FACILITY
WITH THRESHOLD RADIATION
ENERGY DENSITY CHARACTERISTICS
FOR THE PURSUANCE OF THE RESEARCH
IN EXTREME STATES OF MATTER
AND IN THE INTERESTS OF LASER
THERMONUCLEAR SYNTHESIS**

S. A. Belkov, I. N. Voronich, S. G. Garanin,
K. V. Gubsky¹, V. N. Derkach, A. P. Kuznetsov¹

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

Nd-glass facility amplification scheme upgrade version was proposed. The radiation energy up to 7 kJ was obtained in the amplification scheme on the base of 14 active elements in the beam of the size of 20×20 cm² with the fill factor 0.8 under the pulse duration 3 ns. The radiation divergence at the system output makes up $<4 \times 10^{-5}$ radian.

The amplification channel is situated over an area 25×1.5 m², can scale and unite in multi-channel modules with a single pump system. The amplification system can be used for the channel creation of nanosecond and subnanosecond radiation pulse duration.

3-13

**МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ДИНАМИКИ
НАГРЕВА ПОДКРИТИЧЕСКОЙ МИШЕНИ
«ГАЗОВЫЙ МЕШОК»**

Д. М. Доброцветов, А. Н. Мунтян,
С. И. Петров, Н. М. Романова, С. С. Таран

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: ddimon08@yandex.ru

Одним из наиболее перспективных типов мишеней, предназначенных для просвечивания объектов рентгеновским излучением, являются мишени подкритической плотности. В таких мишенях лазерное излучение поглощается не в области критической плотности, а внутри объема мишени и значительная часть лазерного излучения ($>10\%$) конвертируется в жесткое (>1 кэВ) линейчатое рентгеновское излучение. На установке «Луч» проводятся исследования таких мишеней.

В проведенной серии экспериментов мишень представляла собой цилиндр из полипараксилилена толщиной 15 мкм, наполненный Кг под давлением 0,5–1 атм. Торцы цилиндра закрыты тонкой полимерной пленкой (~0,4 мкм), сквозь которую и проводилось облучение мишени. Изучалась картина пространственно-временной генерации рентгеновского излучения. Для измерений использовался рентгеновский фо-

тохронограф РФР-4. Пространственное разрешение вдоль цилиндра и спектральную селекцию обеспечивал спектрограф РИВС-2, который при помощи трех щелей обскур строил на фотокатоде фотохронографа изображения мишени с $M=1,6$. Каждое изображение строилось в своем спектральном диапазоне, вырезаемом при помощи К-фильтров, расположенных на щелях спектрографа. Вырезались участки, непрерывного рентгеновского спектра, а также участок с линиями L-серии криптона. Временное разрешение составляло 50 пс, пространственное 150 мкм.

Методика позволила обнаружить наличие двух одновременно распространяющихся тепловых волн в мишени, оценить их скорость распространения и энергетический выход каждой волны, а также оценить конверсионную эффективность всей мишени.

Литература

1. С. А. Бак et al. Efficient Multi-keV Underdense Laser-Produced Plasma Radiators. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87, 27 5003.
2. В. П. Лазарчук, Д. Н. Литвин, В. М. Муругов и др. «Рентгеновский фотохронограф РФР-4», ПТЭ, 2004, № 2, с. 128–132.
3. В. П. Лазарчук, В. М. Муругов, С. И. Петров, А. В. Сенник. Фотохронографические методы регистрации пространственно-временных и спектральных характеристик рентгеновского излучения на установке «Искра-5». *Физика плазмы*, 1994, т. 20, № 1, с. 101.

**METHOD OF UNDERDENSE «GAS BAG»
TARGET HEATING DYNAMICS REGISTRATION**

D. M. Dobrotsvetov, A. N. Muntyan,
S. I. Petrov, N. M. Romanova, S. S. Taran

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: ddimon08@yandex.ru

One of the most promising laser heated X-ray radiators type is the underdense target. Those radiators are important for the X-ray diagnostic of the high density objects. Unlike dense targets, laser absorption area of the underdense targets lay in the targets major volume. This leads to the better conversion efficiency ($>10\%$). Such targets are studied at the «Luch» installation.

In the experimental series targets had a cylindrical shape. Targets were made of 15 μm thick hydrocarbon polymer. They were filled by 0.5–1 atm. Kr gas. Face of the targets had ~0.4 μm thick hydrocarbon window. Irradiation by laser was made through this window. Spatiotemporal picture of X-ray irradiation has been studied. Measurements were done by «RFR-4» X-ray streak-camera. Space resolution along the cylinder axis and spectral selectivity were provided by «RIVS-2» spectrograph. The spectrograph forms 3 images of target scaled by $M=1.6$ at the streak camera photocathode. Each image could be obtained in its own spectral range, which was determined by the corresponding set of filters. Two filters sets were chosen so that the signals behind them were dominated by the L-shell emission of

Kr. One filters set was chosen so that the signals behind it was dominated by the continuous spectra interval. Time resolution of measurements was 50 ps. Space resolution of measurements was 150 μm .

Two simultaneous heat waves had been found. Propagation speed of each wave, total energy yield of waves, and conversion efficiency has been measured.

3-14

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕНОСА БЫСТРЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ГОРЕНИЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

Г. В. Долголева

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

E-mail: dolgg@list.ru

Для адекватного описания физики лазерной плазмы необходимо учитывать большое количество физических процессов. Один из них – перенос энергии быстрыми заряженными частицами – продуктами термоядерных реакций. Проблема рождения и переноса заряженных частиц, возникающих в результате термоядерных реакций в горящей дейтериево-третиевой плазме, очень существенна. Важно точно отразить в модели, где и как заряженные частицы отдают свою энергию, т. е. рассчитать нестационарный перенос энергии быстрыми заряженными частицами. В докладе приводится модель расчета переноса быстрыми заряженными частицами, численно исследуется влияние этого процесса на параметры сжатия и горения параметры мишени.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FAST CHARGED PARTICLES TRANSFER TO THE BURNING OF THERMONUCLEAR TARGETS

G. V. Dolgoleva

KIAM, Moscow, Russia

e-mail: dolgg@list.ru

For an adequate description of the physics of laser plasma it is necessary to consider a large number of physical processes. One of them is the transfer of energy of a fast particle products of thermonuclear reactions. The problem of the birth and transfer of the charged particles resulting from fusion reactions in a burning deuterium-tritium plasma, is very significant. It is important to reflect in the model, where and how charged particles give up their energy, i.e. to calculate the non-stationary transfer of energy of the fast charged particles. The report presents a model calculation of the transport of α -particles, we numerically investigate the influence of this process on the parameters of the target.

3-15

ВЛИЯНИЕ ДЖОУЛЕВА РАЗОГРЕВА НА ДИФФУЗИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМУ

М. Ю. Егужова, В. А. Жмайло,

Е. А. Новикова, В. Н. Софронов

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

Диффузия магнитного поля в плазму сопровождается ее джоулевым разогревом. Это приводит к тому, что (при наличии температурной зависимости коэффициента диффузии) эти два эффекта следует рассматривать совместно. Пример такого рассмотрения содержится в работе [1]. Однако, кроме указанных эффектов, в этой работе учитывается еще целый ряд сложных физических процессов, что не позволяет в достаточно явной и общей форме выделить связь диффузии и разогрева.

В данном докладе рассматриваются две модельные задачи, на примере которых выясняются некоторые качественные закономерности, характеризующие эту связь.

В обеих задачах плазма считается неподвижной, диффузия – изотропной, зависимость коэффициента диффузии от температуры – степенной.

В первой (одномерной) задаче рассматривается диффузия поля вблизи плоской границы между двумя полупространствами. Показано, что в этой задаче в профилях поля на границе может возникать разрыв, а температура обращаться в бесконечность. Показано, что учет теплопроводности (сколь угодно малой) может устранить некоторые особенности решения.

Вторая задача – двумерная. В ней рассматривается диффузия поля от точечного магнитного диполя. Получено аналитическое решение без учета джоулевого разогрева: в нем угловая зависимость выделяется явно, а радиально-временная оказывается автомодельной. Задача с учетом разогрева решается численно с использованием методик СНД [2] и ЭГАК [3]. Оказывается, что влияние разогрева наиболее существенно вблизи экватора. Оно проявляется в замедлении диффузии и укрупнении профилей поля.

Литература

1. С. Ф. Гаранин, Г. Г. Иванова, Д. В. Кармишин, В. Н. Софронов / Диффузия магнитного поля в металл / ПМТФ, 2005, т. 46, № 2, стр 5-12.
2. Долголёва Г. В. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы решения задач математической физики. 1983. Вып. 2(13). С.29.
3. Стадник А. Л., Шанин А. А., Янилкин Ю. В. Эйлерова методика ТРЭК для расчета трехмерных газодинамических течений многокомпонентной среды. ВАНТ, сер. ММФП, вып. 4, стр. 71-78, 1994.

INFLUENCE OF JOULE HEATING ON MAGNETIC FIELD DIFFUSION INTO PLASMA

M. Yu. Eguzhova, V. A. Zhmailo,
E. A. Novikova, V. N. Sofronov

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

Diffusion of magnetic field into plasma is accompanied by its Joule heating. Due to this (when diffusion coefficient is temperature dependent) these two effects should be considered together. Such consideration was given to the phenomenon in paper [1]. However beside these effects the paper also accounts for several complicated physical processes that does not allow for distinguishing interrelation of diffusion and heating in explicit and general manner.

Current paper considers two model problems illustrating qualitative regularities characterizing this interrelation.

In both problems plasma is taken as immobile, diffusion as isotropic and dependence of diffusion coefficient vs. temperature as exponential.

The first (1D) problem considers diffusion of the field near the flat boundary between two semi-spaces. We demonstrate that discontinuity may occur on the boundary on the field profiles in this problem, and temperature may become infinite. We also demonstrate that accounting for heat conductivity (indefinitely small) may eliminate some specific features of solution.

The second problem is 2D. It considers field diffusion from a point magnetic dipole. We got an analytic solution not accounting for Joule heating; angular dependence is observed here explicitly and radial-temporary dependence is self-similar.

Problem is solved numerically taking into account heating applying SND [2] and EGAK [3] techniques. It occurs that influence of heating is most important near equator. It is manifested as diffusion slowdown and steepening of field profiles.

References

1. Garanin S. F., Ivanova G. G., Karmishin D. V., Sofronov V. N. / Diffusion of magnetic field into metal. / PMTF, 2005, vol. 46, N 2, p. 5–12 (in Russian).
2. Dolgolyova G. V. // VANT. Series «Techniques and codes for solution of mathematical physics problems», 1983, iss. 2 (13). p. 29 (in Russian).
3. Stadnik A. L., Shanin A. A., Yanilkin Yu. V. Euleran TREK technique for computation of 3D gas dynamic flows in multi-component medium. // VANT. Series «Techniques and codes for solution of mathematical physics problems», iss. 4, p.71–78, 1994.

3-16

РАСЧЕТЫ ДВИЖЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Е. В. Грошев, В. А. Жмайло, А. Н. Залялов,
Н. В. Иванов, А. Е. Широков

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

E-mail: vaz@vniief.ru, aeshirokov@vniief.ru

В работе исследуется вопрос о влиянии параметров источника релятивистских электронов на характер их движения и длительность жизни в радиационном поясе Земли. Рассматриваются такие параметры, как расположение, размеры, длительность импульса и спектр электронов.

Для проведения расчетов используются две численных методики, решающие кинетическое уравнение для электронов в приближении ведущего центра [1]. Первая методика, основанная на методе Монте-Карло, учитывает асимметрию геомагнитного поля. Вторая методика использует разностный метод для решения кинетического уравнения; в ней дополнительно реализовано приближение, использующее усреднение функции распределения электронов по их долгому колебанию [1].

На примере ряда модельных задач, решенных с использованием двух представленных методик, в зависимости от характеристик процесса инжекции электронов показано влияние основных физических процессов на пространственную динамику радиационного пояса, а также энергетические и питч-угловые характеристики наполняющих его релятивистских электронов. Дополнительно для оценки погрешности используемых модельных приближений приводится сравнение результатов расчетов, выполненных в близкой постановке по каждой из методик.

Литература

- 1 Кринберг И. А. Кинетика электронов в ионосфере и плазмосфере Земли. М. Наука, 1978.

CALCULATIONS OF RELATIVISTIC ELECTRONS MOTION IN MAGNETIC FIELD OF THE EARTH

E. V. Groshev, V. A. Zhmailo, A. N. Zalyalov,
N. V. Ivanov, A. E. Shirokov

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

E-mail: vaz@vniief.ru, aeshirokov@vniief.ru

The paper studies the issue of the influence of parameters of relativistic electrons source on the nature of their motion and lifetime in radiation belt of the Earth. Such parameters as location, dimensions, duration of pulse and electrons spectrum are considered.

We use two numerical techniques solving kinetic equation for electrons in approximation of leading center [1] in our calculation. The first technique, based on Monte-Carlo method takes into account asymmetry of magnetic field. The second technique applies differential technique for solving kinetic equation and approximation, utilizing function of electrons distribution averaging by longitudinal vibration, is additionally implemented in it [1].

Influence of the main physical processes on spatial dynamics of radiation belt and pitch-angular features of electrons filling it is demonstrated by example of several model problems solved using two techniques above depending on the features of electrons injection process. Additionally for evaluation of the error of applied model approximation we give the comparison of calculation results made in similar statement for each of the techniques.

References

1. Krinberg A. I. Kinetics of electrons in ionosphere and plasmasphere of the Earth. Moscow, Nauka, 1978. (in Russian)

3-17

УЧЕТ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ФОРМУЛЕ КУБО-ГРИНВУДА ДЛЯ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ МЕТАЛЛА

С. В. Ивлиев

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия
E-mail: ivliev@theor.mephi.ru

При вычислении поглощения энергии короткого лазерного импульса металлом требуется знание мнимой части диэлектрической проницаемости, которая простым образом связана с проводимостью. В настоящее время для вычисления статической и динамической проводимости наиболее часто используется формула Кубо–Гринвуда, описывающая поглощение энергии электромагнитного поля в одноэлектронном подходе [1–3]. В настоящей работе эта формула выводится прямо из выражения для функции диэлектрической проницаемости в приближении хаотических фаз, которое фактически равнозначно методу среднего поля. Подробно анализируется роль межэлектронного взаимодействия при вычислении матричных элементов оператора скорости. Показано, что в одноэлектронном приближении хаотических фаз следует использовать одночастичные функции электронов проводимости в поле фиксированных ионов. Рассмотрена возможность учета обменных и корреляционных эффектов с помощью функции поправки на локальное поле [4].

Также проведен анализ процесса усреднения полученных выражений для проводимости по положениям ионов. При воздействии ультракоротких лазерных импульсов (порядка 50 fs) ионы практиче-

ски не успевают сместиться. Поэтому процесс поглощения энергии от единичного импульса происходит фактически при неподвижных ионах, которые в силу наличия ионной температуры и нулевых колебаний несколько сдвинуты от своих идеальных положений равновесия. Это представляется особенно важным для двухтемпературной модели, когда температура электронов может быть существенно больше температуры ионной подсистемы.

Литература

1. Greenwood D.A., Proc. Phys. Soc., A71, 585, (1958) (Сборник «Вопросы квантовой теории необратимых процессов», ИЛ, 1961)
2. Moseley L. L., Lukes T., Am. J. Phys., 46, 676 677, (1978)
3. Knyazev D. V., Levashov P. R., Phys. Plasmas., 21, 073302, (2014)
4. Ichimaru S., Rev. Mod. Phys., 54, 1017, (1982)

ELECTRON-ELECTRON INTERACTION IN KUBO-GREENWOOD APPROACH FOR THE CONDUCTIVITY OF METAL

S. V. Ivliev

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow,
Russia

E-mail: ivliev@theor.mephi.ru

For calculation of short laser pulse absorption in metal the imaginary part of permittivity, which is simply related to the conductivity, is required. Currently to find the static and dynamic conductivity the Kubo–Greenwood formula is most commonly used. It describes the electromagnetic energy absorption in the one-electron approach [1–3]. In the present study, this formula is derived directly from the expression for the permittivity expression in the random phase approximation, which in fact is equivalent to the method of the mean field. The detailed analysis of the role of electron-electron interaction in the calculation of the matrix elements of the velocity operator is given. It is shown that in the one-electron random phase approximation the single-particle conductive electron wave functions in the field of fixed ions should be used. The possibility of considering the exchange and correlation effects by means of an amendment to a local function field [4] is discussed.

Also, the analysis of averaging procedure for the expressions obtained for the conductivity over ion positions is done. For the ultra-short laser pulses (about 50 fs) ions practically do not have time to move, and the process of energy absorption from a single pulse occurs at virtually immobile ions. They only may be shifted from the equilibrium positions due to the presence of the initial temperature and zero-point oscillations. This is particularly important in frames of the two-temperature model, when the electron temperature may be much greater than the temperature of the ion subsystem.

References

1. Greenwood D.A., Proc. Phys. Soc., A71, 585, (1958).
2. Moseley L. L., Lukes T., Am. J. Phys., 46, 676677 (1978).
3. Knyazev D. V., Levashov P. R., Phys. Plasmas., 21, 073302 (2014).
4. Ichimaru S., Rev. Mod. Phys., 54, 1017 (1982).

3-18

КАПЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПЛОТНОГО ГОРЯЧЕГО ВЕЩЕСТВА

И. Л. Иосилевский^{1,2}, А. Ю. Чигвинцев², И. Г. Зорина³¹Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия²Московский физико-технический институт, Москва, Россия³Московский Технический Гос. Университет им. Баумана, Москва, Россия

E-mail: ilios@ihed.ras.ru

Обсуждается идеализированная модель плотного горячего вещества, получаемая для электрон-ядерной плазмы в рамках вариационной формулировки статмеханики в сочетании с использованием для электронов приближения квазиоднородности, т. е. локального УРС неидеального электронного газа. Еще в [1] было отмечено, что в отличие от бескорреляционного приближения Томаса-Ферми (с идеальногазовым УРС) [2] переход к локальному приближению, максимально учитывающему корреляции, требует использования для этой цели УРС модели неидеального электронного газа на однородно-сжимаемом фоне ОСР(–). Но там же было отмечено, что в такой модификации модели ОСР присутствует фазовый переход 1-го рода с верхней критической точкой с $T_c \sim 0,6$ eV [3]. При использовании такого УРС на микроуровне этот фазовый переход проявляется в виде разрыва в равновесном профиле плотности электронов, возникающем при $T < T_c$. При дальнейшем использовании такого разрывного профиля при расчете уравнения состояния полной электрон-ядерной системы этот разрыв (т.е. «микро-фазовый» переход) снова «возвращается» на макроуровень в виде нового фазового перехода, но теперь уже 2-го рода с концевой, а не критической точкой. Обсуждаемый эффект более прост в контексте обычной модели средней атомной ячейки [2], но остается в силе и в варианте многоядерной (неячейочной) модели Томаса-Ферми с корреляциями («капельная» модель вещества [4]). Еще более необычной является эта «смена облика» фазового перехода в однокомпонентной модели зарядов на однородно-сжимаемом фоне в процессе ухода на микро- и возвращения на макро-уровень в приложении к высоко-асимметричной классической модели заряженных твердых шариков – прообраза комплексной (пылевой и коллоидной) плазмы. Наконец, тот же, в сущности, сценарий должен реализоваться в экзотической области сверхплотной ядерной материи в т. наз. «модели жидкой капли»

[5], сопряженной с приближением средней ячейки Вигнера-Зейтца.

Литература

1. Иосилевский И. Л., Фазовые переходы в кулоновских системах, сб. «Уравнение состояния в экстремальных условиях», Ред. Г. В. Гадияк, Новосибирск, Изд. СОАН СССР, 1981, с.20.
2. Киржниц Д. А., Лозовик Ю. Е., Шпатаковская Г.В. УФН 117, 3 (1975)
3. Иосилевский И. Л. ТВТ (High Temperature) 23, 1041 (1985) / arXiv:0901.3535.
4. Iosilevski I., Chigvintsev A. Phase Transition in Simplest Plasma Models, in «Physics of Non-ideal Plasmas» /Eds. W.Ebeling & A.Forster (Teubner, Stuttgart-Leipzig, 1992) p.87 / arXiv:physics/0612113.
5. Фортов В. Е. Уравнения состояния вещества. От идеального газа до кварк-глюонной плазмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, pp. 492 (2013).

LIQUID DROP MODEL AND PHASE TRANSITIONS IN HOT DENSE MATTER

I. L. Iosilevskiy^{1,2}, A. Yu. Chigvintsev², I. G. Zorina³¹Joint Institute for High Temperature of RAS, Moscow, Russia²Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: ilios@ihed.ras.ru

Simplified model of hot dense matter is under discussion as obtained within WS-cell model of average atomic cell filled by strongly non-ideal electronic «fluid» (jellium). Their equilibrium profile is obtained according to variational form of statistical mechanics, i.e. in local EOS («quasi-uniformity») approximation [1]. It was claimed in [2, 3] that in contrast to well-known ideal gas (correlationless) approximation (e.g. Thomas – Fermi for degenerated electrons or Poisson – Boltzmann for classical ones) one needs to use local EOS-approximation for the model of non-ideal electron gas on uniformly compressible electrostatic background. It was stressed in [2, 3] that 1st-order fluid-fluid phase transition with upper critical point exists ($T_c \sim 0.6$ eV [4]) in this version of well-known OCP(–) model for electron gas («jellium»). This macro-phase transition manifests itself at micro-level as discontinuity in spatial in-cell electronic profile when temperature is low enough ($T < T_c$). In turn, this discontinuity of cell electronic profile returns back to macroscopic level in form of anomalies in EOS for WDM (new macro-phase transition but of 2nd order!) calculated via Wigner-Seitz cell Thomas-Fermi-type approximation with local non-ideality correction [2–4]. Similar situation is realized in the case of calculation for spatial profile of micro-ions around macro-ion in complex plasmas (dusty or colloid or highly asymmetric ionic systems) when one use for this case the WS-cell approximation. When one tries to improve well-known ideal-gas-like Poisson-Boltzmann approximation and to take into account non-ideality (correlation) of microions in frames of local

approximation of Debye-type, he needs to use exact EOS for charged hard (or soft) spheres system on uniformly compressible compensating background (CHS(-)). 1st-order phase transition with upper critical point exists in this model [2, 3]. This phase transition manifests itself as even two discontinuities in spatial profile of microions. First corresponds to melting, and second – to evaporation in CHS(-). In turns both these discontinuities leads to two 2nd-order phase transitions at the level of EOS for macroscopic complex plasmas in WS-cell approximantion.

References

1. Kirzhnits D., Lozovik Yu. and Shpatakovskaya G., Uspekhi Fiz. Nauk. (SU) 117, 3 (1975). (in Russian)
2. Iosilevskiy I. L. Phase Transitions in Coulomb Systems (review), in «Equation of State under Extreme Conditions» / Ed. G.V. Gadiyak, Novosibirsk, Siberian Branch of Soviet Acad. Sci. Pub., 1981, p. 20.
3. Iosilevskiy I. L., High Temperature 23, 1041 (1985) / arXiv:0901.3535.
4. Iosilevskiy I., Chigvintsev A. Phase Transition in Simplest Plasma Models, in «Physics of Non-ideal Plasmas» / Eds. W.Ebeling & A.Forster (Teubner, Stuttgart-Leipzig, 1992) p. 87 / arXiv:physics/0612113.
5. Fortov V. E., Equation of State. From Ideal Gas to Quark-Gluon Plasma, Moscow: Fizmatlit, 2013, pp. 495. (in Russian)

3-19

ОБРАЗОВАНИЕ МИКРОПУЗЫРЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА БИОЖИДКОСТИ

А. Е. Дубинов, Ю. П. Кожаева

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

В работе исследовалось влияние плазмы наносекундных искровых разрядов на высыхающие капли биологических жидкостей. Воздействию подвергались соки винограда, мандарина, лимона, алоэ, свеклы, а также кофе и альбумин человека. Было обнаружено, что во всех высохших каплях образуются сферические микропузыри. Изучалась динамика рождения и роста микропузырей, а также оценена скорость их раздувания. Определялась внешняя форма микропузырей и внутреннее строение. Установлено, что пузыри имеют форму, близкую к сферической, при этом они полые и тонкостенные. Стенки микропузырей – эластичные, а сами пузыри наполнены газом. Вероятно, микропузыри имеют отверстие внизу. Предлагается использовать пузыри некоторых жидкостей как капсулы для сверхмалых доз лекарств.

MICROBUBBLES APPEARANCE UNDER THE INFLUENCE OF NANOSECOND DISCHARGES OF AIR PRESSURE ON THE BIO LIQUID

A. E. Dubinov, J. P. Kozhayeve

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

The authors investigated the plasma influence of nanosecond spark discharges on the sessile dried drops of the bio liquid. Grape, mandarin, lemon, aloe, beet juice, coffee and human albumin were influenced. It was discovered that microbubbles appear in all the sessile drops. The microbubbles birth and growth dynamics was studied, their speed blowing was also estimated. The microbubbles exterior form and their inner structure were discovered. It was determined that the bubbles have the form close to spherical, hereby they are hollow and thin-walled. Microbubbles walls are elastic and the bubbles themselves are filled with gas. Perhaps microbubbles have a hole below. Bubbles are offered to use as capsules for minute portions of medicine.

3-20

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОТОКАХ ИОНИЗУЮЩЕГО ГАЗА В КАНАЛЕ ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

А. Н. Козлов, В. С. Коновалов

Институт Прикладной Математики им. М. В. Келдыша РАН, Россия, Москва

E-mail: kozlov@kiam.ru, v.s.kononov@yandex.ru

Проведено исследование течений ионизирующегося газа и переноса излучения в канале квазистационарного плазменного ускорителя [1–3]. В основу численной модели положены система МГД уравнений и уравнение переноса излучения. Модифицированная МГД модель для трехкомпонентной среды, состоящей из атомов, ионов и электронов, учитывает основные механизмы электропроводности и теплопередачи [4, 5]. 3D модель переноса излучения включает основные механизмы поглощения и излучения для различных участков спектра. Результаты численных исследований двумерных течений ионизирующегося газа и переноса излучения получены в приближении локального термодинамического равновесия. Выявлены особенности фазового перехода на фронте ионизации в потоке ионизирующегося газа. Определено поле излучения в канале плазменного ускорителя и в перспективе мощного электрореактивного плазменного двигателя. Установлено, что существенный вклад в плотность энергии излучения и плотность потока энергии излучения вносит альфа линия Лаймана для водородной плазмы [6].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-03085-а).

Литература

1. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2008. 613 с.
2. Брушлинский К. В., Заборов А. М., Козлов А. Н., Морозов А. И., Савельев В. В. Численное моделирование течений плазмы в КСПУ. // Физика плазмы. 1990. Т. 16, № 2. С. 147–157.
3. Klimov N., Podkovyrov V., Zhitlukhin A., Kovalenko D., Bazylev B., Landman I., Pestchanyi S., Janeschitz G., Federici G., Merola M., Loarte A., Linke J., Hirai T., Compan J. Experimental study of PFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA. // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 390–391. P. 721–726.
4. Козлов А. Н. Кинетика ионизации и рекомбинации в канале плазменного ускорителя. // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 5. С. 181–188.
5. Брушлинский К. В., Козлов А. Н., Коновалов В. С. Численные модели стационарных и пульсирующих течений ионизирующегося газа в каналах плазменных ускорителей. // ЖВМ и МФ. 2015. Т. 55, № 8. С. 1405–1416.
6. Козлов А. Н., Коновалов В. С. 3D модель переноса излучения в потоках ионизирующегося газа и плазмы. // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша. 2016. № 86. 32 с.

NUMERICAL RESEARCH OF RADIATION TRANSPORT IN THE IONIZING GAS FLOWS IN THE CHANNEL OF PLASMA ACCELERATOR

A. N. Kozlov, V. S. Kononov

Keldysh Institute of Applied Mathematics,
RAS, Russia, Moscow

E-mail: kozlov@kiam.ru, v.s.kononov@yandex.ru

Research of the ionizing gas flows and radiation transport in the channel of the quasi-steady plasma accelerator was conducted [1–3]. The numerical model is based on the MHD equations and the radiation transport equation. The modified MHD model for a three-component medium consisting of atoms, ions and electrons takes into account the basic mechanisms of the electrical conductivity and heat transport [4, 5]. The 3D model of the radiation transport includes the basic mechanisms of emission and absorption for the different parts of the spectrum. Results of the numerical studies of the two-dimensional ionizing gas flows and the radiation transport are obtained in the approximation of the local thermodynamic equilibrium. Features of the phase transition at the ionization front were detected in the ionizing gas flow. The radiation field was determined in channel of the plasma accelerator and potentially the high-power plasma electro jet engine. It was found that the Lyman alpha line for hydrogen plasma brings an essential contribution to the density of the radiation energy and the radiation energy flux [6].

This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 15-01-03085-а).

References

1. Morozov A. I. Introduction to plasmadynamics. Moscow, Fizmatlit, 2008. (in Russian)
2. Brushlinsky K. V., Zaborov A. M., Kozlov A. N., Morozov A. I., Savelyev V. V. Numerical simulation of plasma flows in QSPA. // Sov. J. Plasma Physics. 1990. V. 16. P. 79–89. (in Russian)
3. Klimov N., Podkovyrov V., Zhitlukhin A., Kovalenko D., Bazylev B., Landman I., Pestchanyi S., Janeschitz G., Federici G., Merola M., Loarte A., Linke J., Hirai T., Compan J. Experimental study of PFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA. // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 390–391. P. 721–726.
4. Kozlov A. N. Ionization and recombination kinetics in a plasma accelerator channel. // Fluid Dynamics. 2000. V. 35. P. 784–790.
5. Brushlinskii K. V., Kozlov A. N., Kononov V. S. Numerical models of steady-state and pulsating flows of self-ionizing gas in plasma accelerator channels. // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2015. V. 55. P. 1370–1380. (in Russian)
6. Kozlov A. N., Kononov V. S. 3D model of the radiation transport in flows of the ionizing gas and plasma. // Preprint No. 86. Keldysh Institute of Applied Mathematics. Moscow, 2016. (in Russian)

3-21

ПЕРЕДАЧА ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯТОРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ПО СХЕМЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА

В. И. Богомолов, Ю. В. Дмитриев, Н. Г. Игнатьев,
К. Е. Коротков, П. С. Крапива, И. Н. Москаленко,
В. А. Москвичев, С. С. Писков

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

E-mail: kirill.e.korotkov@gmail.com

При исследованиях явлений в плотной короткоживущей плазме, образовавшейся в результате обжатия мишени лазерным излучением, необходимо обеспечить регистрацию процессов наносекундной длительности с временным разрешением на уровне сотен пикосекунд. Диагностика плазмы проводится регистрацией оптического, рентгеновского, нейтронного излучений с использованием быстродействующих детекторов (первичных преобразователей) разных типов (вакуумных рентгеновских, алмазных, полупроводниковых, сцинтилляционных и др.). Электрические сигналы с детекторов, как правило, регистрируются аналоговыми преобразователями, расстояние до которых составляет десятки-сотни метров, что обусловлено необходимостью их защиты от электромагнитных помех (ЭМП) и наводок, а также потоков ионизирующих излучений. Увеличение мощностей установок, используемых для получения плазмы, ожидается приводит

к увеличению помеховых воздействий на регистрирующую аппаратуру. Малая длительность исследуемых процессов, большие расстояния передачи сигналов и сложная помеховая обстановка не позволяют осуществлять передачу электрических сигналов с использованием традиционных коаксиальных кабелей.

Преобразование электрического сигнала в модуляцию параметров лазерного излучения позволяет использовать в качестве линии передачи волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Одномодовые ВОЛС С-диапазона обладают малыми затуханием и дисперсией, значительной полосой пропускания, нечувствительностью к ЭМП, что позволяет передавать оптические аналоги на значительные расстояния с сохранением временного разрешения. Дополнительными преимуществами использования ВОЛС являются реализация гальванической развязки детектора и регистратора и возможность повышения информационной емкости линии передачи с использованием частотного уплотнения.

Для формирования оптических аналогов возможно использовать метод внешней модуляции оптического излучения, в котором источник оптического излучения отделен от модулирующего устройства. Возможность размещения источника оптического излучения в защищенной зоне и увеличения оптической мощности в линии передачи без изменения АЧХ, минимизация нежелательной частотной модуляции сигнала (чирпа), повышение информационной емкости канала передачи делают метод внешней модуляции перспективным для применения на мощных физических установках.

Представлены результаты использования электрооптических модуляторов интенсивности по схеме интерферометра Маха-Цендера (ММЦ) для формирования оптического аналога наносекундного сигнала сцинтилляционного детектора. Восстановление формы передаваемых сигналов осуществляется с использованием метода определения функции пропускания и рабочей точки ММЦ непосредственно во время проведения эксперимента. Передача сигналов осуществлялась на расстояние ~ 1 км с динамическим диапазоном более 200.

TRANSMITTING OF BROADBAND ANALOG WAVEFORMS USING MACH-ZEHNDER MODULATORS

V. Bogomolov, Yu. Dmitriev, N. Ignatiev, K. Korotkov, P. Krapiva, I. Moskalenko, V. Moskvichev, S. Piskov

Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Automatics n.a. N. L. Dukhov» (VNIIA),
Moscow, Russia

E-mail: kirill.e.korotkov@gmail.com

In studies of the transient phenomena in dense plasma, formed as a result of compression of the target by laser radiation, it is necessary to ensure that nanosecond processes are detected with picosecond time resolution. Plasma diagnostics is conducted by registration of optical,

X-ray, neutron radiation using high-speed detectors of different types (vacuum X-ray, diamond, semiconductor, scintillators, etc.). Electrical signals from the detectors are usually recorded with high speed analog-to-digital converters placed in tens to hundreds of meters from target, due to the need to protect them from EMI, crosstalks, and ionizing radiation. Increasing power of laser-plasma facilities results in an increase of expected interfering influences on the recording apparatus. The short duration of processes, long-distance signal transmission and complicated interference environment does not allow for the transmission of electrical signals using traditional coaxial cables.

Conversion of the electrical waveform into an optical domain by the modulation of the laser irradiation allows using of the fiber-optic links. Single-mode C-band fiber optic links have a low attenuation and dispersion, large bandwidth, insensitivity to EMI that provides to transfer the optical signals over long distances while maintaining temporal resolution. Additional benefits of using fiber optic links are implementation of the galvanic isolation of the detector and recorder, and the possibility of increasing the information capacity of a transmission line using wavelength division multiplexing.

We use the external modulation of optical radiation to convert electrical signals to optical domain, when the radiation source is separated from the modulator. External modulation is preferable for use on powerful physical facilities due to ability to place the optical radiation source in the protected area, increasing the optical power on the transmission line without changing the frequency response, minimizing chirp, and increasing the link data capacity.

We present results conversing nanosecond analogue signal of scintillation detector into the optical domain with using of electro-optic Mach-Zehnder modulators (MZM). For recovering forms of the transmitted signals we use the method of determining the transmittance and the bias point of MZM directly during the experiment. Transmission of signals carried over a distance of about 1 km with a dynamic range of more than 200.

3-22

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ УЛЬТРАТОНКОЙ НИЗКОПЛОТНОЙ МИШЕНИ

О. Г. Котова, И. В. Глазырин, К. С. Назаров

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

E-mail: ogkotova@vniitf.ru; i.v.glazyrin@vniitf.ru;
nazarovks@vniitf.ru

Перспективными веществами для мишеней, используемых для ускорения электронов в ультратонких лазерных импульсах, являются аэрогели

и нанопористые материалы. Эти мишени характеризуются плотностью электронов от долей критической плотности n_c до нескольких десятков n_c [1]. Для данной плотности реализуется режим, при котором механизмы поглощения, характерные для 1) плазмы с плотностью электронов $n_e < n_c$ и 2) $n_e \geq n_c$, объединяются. Эти механизмы взаимодействуют, приводя к дополнительному поглощению, и, следовательно, к большей энергии частиц. В условиях, когда толщина мишени сравнима с релятивистской глубиной скин-слоя, возможно эффективное взаимодействие излучения с образующейся плазмой в фокальном пятне по всей толщине фольги. Благодаря высокому контрасту предотвращается разлет мишени до прихода основного импульса [2]. Описанные процессы ускорения электронов моделируются с использованием 3D PIC программы ФОКУС [3]. Получены зависимости углового распределения и спектра электронов от толщины мишени.

Литература

1. Passoni M. et al. Plasma Phys. Control. Fusion 56 045001 (2014).
2. Henig A. et al. Phys. Rev. Lett. 103 245003 (2009).
3. C. McGuffey, A.G.R. Thomas, I.V.Glazyrin et al., Ionization induced trapping in a laser wakefield accelerator, Physical Review Letters 104, 025004 (2010).

MODELING OF LASER ACCELERATION OF ELECTRONS FROM ULTRATHIN LOWDENCE TARGET

O. G. Kotova, I. V. Glazyrin, K. S. Nazarov

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

E-mail: ogkotova@vniitf.ru;

i.v.glazyrin@vniitf.ru; nazarovks@vniitf.ru

Aerogels and nanoporous substances are perspective matters for the targets used for electrons acceleration in ultrashort laser pulses. These targets are characterized by electron density from the part of critical density n_c to several tens n_c [1]. For the given density the regime is realized at which the absorption mechanisms combine two different cases: 1) plasmas with electron density $n_e < n_c$ and 2) $n_e \geq n_c$. These mechanisms interact, leading to additional absorption, and, hence, to higher energy of particles. In conditions when the thickness of the target is comparable with relativistic depth of a skin layer, it is observed the effective interaction of laser pulse with generated plasma in a focal spot on all thickness of a foil. Because of high contrast the expansion of a target before arrival of the main pulse [2] is prevented. The described processes of electrons acceleration are simulated by 3D PIC code FOCUS [3]. Dependences of angular distribution and spectrum of accelerated electrons on the thickness of the target are received.

References

1. Passoni M. et al. Plasma Phys. Control. Fusion 56 045001 (2014).
2. Henig A. et al. Phys. Rev. Lett. 103 245003 (2009).
3. C. McGuffey, A.G.R. Thomas, I.V.Glazyrin et al., Ionization induced trapping in a laser wakefield accelerator, Physical Review Letters 104, 025004 (2010).

3-23

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АБЛЯЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «КАМЕРТОН-Т»

И. К. Красюк¹, А. Ю. Семенов¹, И. А. Стучебрюхов¹,
К. В. Хищенко², С. Ю. Гуськов³,
Н. Н. Демченко³, А. А. Рупасов³

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

³Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва,
Россия

E-mail: krasyk@kapella.gpi.ru

На лазерной установке «Камертон-Т» выполнены эксперименты по определению зависимости абляционного давления на поверхности алюминиевой мишени от интенсивности лазерного импульса длительностью 70 пс. Длина волны лазерного излучения 0,527 мкм. Установлено, что в области интенсивности лазерного излучения 1–400 ТВт/см² искомая зависимость имеет вид $P_a(\text{ТПа}) = \alpha(10^{-2} \cdot I_{\text{лаз}})\beta$, где $\alpha = 1,9 \pm 0,2$, а $\beta = 0,7 \pm 0,03$. Этот вывод сделан на основе экспериментального измерения времен выхода ударной волны на тыльную поверхность мишеней в зависимости от интенсивности лазерного излучения, с последующим определением амплитуды давления на лицевой поверхности мишени методом численного моделирования. В экспериментах использованы мишени из алюминия толщиной от 20 до 200 мкм. Полученный результат находится в удовлетворительном согласии с данными других авторов.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEPENDENCE OF ABLATION PRESSURE UPON THE RADIATION INTENSITY ON THE LASER INSTALLATION «KAMERTON-T»

I. K. Krasnyuk¹, A. Yu. Semenov¹, I. A. Stuchebruykhov¹,
K. V. Khishchenko², S. Y. Guskov³,
N. N. Demchenko³, A. A. Rupasov³

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

²Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia

³P. N. Lebedev Physics Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: krasnyk@kapella.gpi.ru

The laser installation «Kamerton-T» was used for the estimation of the ablative pressure on the surface of the aluminum target upon the intensity of the laser pulse with duration 70 ps. The wavelength of the laser radiation is 0.527 microns. It is established that in the range of laser radiation intensity 1–400 TW/cm², the desired dependence is of the form $P_a(\text{TPa}) = \alpha(10^{-2} \cdot I_{\text{las}})\beta$, where $\alpha = 1.9 \pm 0.2$ and $\beta = 0.7 \pm 0.03$. This conclusion is made on the basis of experimental measuring arriving times the shock wave on the back surface of the target depending on the intensity of the laser radiation, with subsequent determination of the amplitude of the pressure on the front surface of the target by numerical simulation. In the experiments aluminium targets with a thickness of 20 to 200 microns were used. The result agrees satisfactorily with the data of other authors.

3-24

ОБРАЗОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ОБЛАКА ТИПА NGC 6188 В ХОДЕ РАЗВИТИЯ МГД ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

И. М. Куликов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: kulikov@ssd.sccc.ru

Магнитное поле играет ключевую роль в формировании и динамики астрофизических объектов. Важную роль учет влияния магнитного поля оказывает на развитие межзвездных турбулентных течений, где магнитное поле достаточно сильное [1]. В задачах развития МГД турбулентности были исследованы субальфвеновские течения [2], скорость звездообразования [3] и проведено сравнение различных кодов на задаче эволюции сверхзвуковой турбулентности [4].

В докладе будет представлена новая численная модель химодинамики межзвездной среды в ходе эволюции сверхзвуковой турбулентности. В результате вычислительного эксперимента была получена плотная область в виде «пальмовой ветки», напоминающая

туманность NGC 6188. Имеет место корреляция магнитного числа Маха с квадратом плотности и большая часть плотного облака попадают в сверхальфвеновскую область. Контуры косинуса угла коллинеарности между векторами скорости и магнитного поля образуют седловидную структуру, что говорит о том, что сжатие происходит вдоль силовых линий магнитного поля.

Работа поддержана грантами РФФИ (15-01-00508) и грантом Президента Российской Федерации МК-1445.2017.9.

Литература

1. Mason J., Perez J.C., Cattaneo F., Boldyrev S. Extended scaling laws in numerical simulations of magnetohydrodynamic turbulence // *The Astrophysical Journal Letters*. 2011. V. 735. L26.
2. McKee C.F., Li P.S., Klein R. Sub-Alfvénic Non-ideal MHD Turbulence Simulations with Ambipolar Diffusion. II. Comparison with Observation, Clump Properties, and Scaling to Physical Units // *The Astrophysical Journal*. 2010. V. 720. P. 1612-1634.
3. Federrath C., Klessen R. The Star Formation Rate of Turbulent Magnetized Clouds: Comparing Theory, Simulations, and Observations // *The Astrophysical Journal*. 2012. V. 761. 156.
4. Kritsuk A., et al. Comparing numerical methods for isothermal magnetized supersonic turbulence // *The Astrophysical Journal*. 2011. V. 737. 13.

MODELING OF MOLECULAR CLOUD FORMATION LIKE A NGC 6188 THROUGH MHD TURBULENCE EVOLUTION OF INTERSTELLAR MEDIUM

I. M. Kulikov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: kulikov@ssd.sccc.ru

Magnetic field plays a key role in formation and dynamics of astrophysical objects. The consideration of the influence of magnetic field plays an important role in the evolution of interstellar turbulent flows where the magnetic field is sufficiently strong [1]. In the problems of evolution of MHD turbulence sub-alfvenic flows [2], and starburst rate [3] were studied, and the comparison of different codes on the problem of supersonic turbulence was made [4].

In this talk a new numerical model of MHD chemodynamics supersonic turbulence was presented. Numerical results of MHD turbulence evolution and «palm» cloud in new model are presented like a NGC 6188 nebula. The Alfvénic Mach number the correlation with quadrate of density is traced, and the most part of the heavy cloud is in the over-Alfvénic region. With such densities contours of the cosine of an angle of collinearity between velocity and vector of magnetic field forms saddle-like structure, which means that the compression is along force lines of magnetic field.

This work was supported by grants of RFBR (15-01-00508) and by grant of President of Russian Federation МК-1445.2017.9.

References

1. Mason J., Perez J.C., Cattaneo F., Boldyrev S. Extended scaling laws in numerical simulations of magnetohydrodynamic turbulence // *The Astrophysical Journal Letters*. 2011. V. 735. L26.
2. McKee C.F., Li P.S., Klein R. Sub-Alfvénic Non-ideal MHD Turbulence Simulations with Ambipolar Diffusion. II. Comparison with Observation, Clump Properties, and Scaling to Physical Units // *The Astrophysical Journal*. 2010. V. 720. P. 1612-1634.
3. Federrath C., Klessen R. The Star Formation Rate of Turbulent Magnetized Clouds: Comparing Theory, Simulations, and Observations // *The Astrophysical Journal*. 2012. V. 761. 156.
4. Kritsuk A., et al. Comparing numerical methods for isothermal magnetized supersonic turbulence // *The Astrophysical Journal*. 2011. V. 737. 13.

где лобовое соударение, например дейтронов, приводит к D-D синтезу с соответствующим выходом нейтронов. Периодический коллапс ионов дает пульсирующий выброс нейтронов. В данной работе результаты моделирования динамики частиц и выхода нейтронов методом частица в ячейке сравниваются с экспериментальными данными, где использовалась схема ЭИУТС с ПОПС на базе наносекундного разряда в вакууме (НРВ) в условиях цилиндрической геометрии с ВК и анодом из дейтерированного Pd [6]. В этом случае нам не требуется дополнительно инжектировать синхронизированные пучки электронов (как в [5]), потому как в нашем случае возникают потоки автоэлектронов от катода, которые автоматически появляются при подаче напряжения. В этой работе также представлены и рассмотрены результаты моделирования методом частица в ячейке: выгорание ядер бора ($p + {}^{11}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^8\text{Be} \rightarrow 3\alpha$) на схеме ЭИУ, основанной на НРВ [7].

Данная работа выполнялась при поддержке гранта № 14-50-00124 от Российского научного фонда.

Литература

1. O.A. Lavrent'ev On the History of Thermonuclear Synthesis in USSR (Kharkov: Kharkov Phys.-Tech.Inst.) 2nd ed., 2012.
2. Miley G and Murali S K Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion (Springer, New York), 2014.
3. W. C. Elmore, J. L. Tuck, and K. M. Watson. *Phys. Fluids* 2 (1959) 239
4. R.A. Nebel and D. C. Barnes *Fusion Technology* 38 (1998) 28
5. J.Park, R.Nebel et al *Phys. Plasmas* 12 056315 (2005)
6. Yu. K. Kurilenkov, V.P.Tarakanov et al 2015 *J. Phys.: Conf. Ser.* 653 012025; *ibid* 102026.
7. Yu. K. Kurilenkov and V.P.Tarakanov. 2016 *J. Phys.: Conf. Ser.* 774 012133.

3-25

ОСЦИЛЛИРУЮЩАЯ ПЛАЗМА: ОТ СИЛЬНОЙ НЕИДЕАЛЬНОСТИ К ТЕМПЕРАТУРАМ ПЛАВЛЕНИЯ

Ю. К. Куриленков¹, В. П. Тараканов¹,
С. Ю. Гуськов^{1,2}, А. В. Огинов^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

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

E-mail: kurilenkovyuri@gmail.com

Термоядерный синтез с инерциальным электростатическим удержанием плазмы (ЭИУТС) представляет достаточно старое направление изучения управляемого термоядерного синтеза [1–3]. Однако, в случае с традиционными схемами ЭИУТС высокая плотность энергии синтеза несовместима с высокой эффективностью $Q = E_{\text{синт}}/E_{\text{ввода}}$, потому как «пучкообразное» распределение ионов по энергии значительно сглаживается кулоновскими столкновениями до начала синтеза. Для решения этой проблемы в конце 1990-х ученые из ЛАНЛ предложили инжектировать пучки электронов во внутреннее пространство сетчатой катодной сферы [4]. В этом случае появится потенциал (подобный параболическому) в межэлектродном пространстве, где ионы подвергнутся гармоническим колебаниям. Данный вариант ЭИУТС получил название периодически осциллирующих плазменных сфер (ПОПС), также эта схема получила успешное экспериментальное подтверждение [5]. В момент выброса ионы практически останавливаются, и подсистема ионов становится сильно неидеальной. В следующий момент потенциальная яма виртуального катода (ВК) разгоняет ионы до энергий синтеза «вниз»,

OSCILLATING PLASMAS: FROM STRONG NONIDEALITY TO FUSION TEMPERATURES

Yu. K. Kurilenkov¹, V. P. Tarakanov¹,
S. Yu. Guskov^{1,2}, A. V. Oginov^{1,2}

¹Joint Institute for High Temperatures, RAS, Moscow, Russia

²Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia

E-mail: kurilenkovyuri@gmail.com

Inertial electrostatic confinement fusion (IECF) represents rather old branch of controlled thermonuclear synthesis study [1–3]. However, at traditional schemes of IECF the high fusion power density is incompatible with high efficiency $Q = E_{\text{fusion}}/E_{\text{input}}$, since “beam”-like distribution of ions by energies is smoothed essentially by Coulomb collisions before the synthesis is realizing. To overcome this problem, it have been suggested at LANL to inject the electron beams into internal space of grid-like cathode sphere at the end of 90-th [4]. In this case the potential (like parabolic one) will appear at interelectrode space, where the ions will undergo harmonic oscillations. This variant of IECF have been titled as periodically oscillating plasma spheres (POPS),

and this scheme have been demonstrated at experiment successfully also [5]. At the moment of throw out the ions are practically stopped, and ions subsystem turns out to be strongly nonideal. At the next moment the potential well of virtual cathode (VC) do accelerate ions up to fusion energies at the “bottom”, where head-on collisions, for example, of deuterons leads to DD synthesis with corresponding neutron yields. Periodic collapses of ions provide the pulsating neutron yield. At this work the results of PIC modeling of particle dynamics and neutrons yield are compared with the experiment, where IECF scheme with POPS have been realized on the basis of nanosecond vacuum discharge (NVD) in cylindrical geometry with VC and deuterated Pd anode [6]. At this case we don't need to inject synchronized electron beams additionally (as in [5]) since we have the streams of autoelectrons from cathode which are appearing automatically when the voltage applied. The results of PIC modeling of proton–boron nuclear burning ($p + {}^{11}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^8\text{Be} \rightarrow 3\alpha$) at IEC scheme based on NVD are presented and discussed also [7].

This work was supported by a grant No. 14-50-00124 of the Russian Science Foundation.

References

1. O.A. Lavrent'ev On the History of Thermonuclear Synthesis in USSR (Kharkov: Kharkov Phys.-Tech.Inst.) 2nd ed., 2012.
2. Miley G and Murali S K Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion (Springer, New York), 2014.
3. W. C. Elmore, J. L. Tuck, and K. M. Watson. Phys. Fluids 2 (1959) 239
4. R.A. Nebel and D. C. Barnes Fusion Technology 38 (1998) 28
5. J.Park, R.Nebel et al Phys. Plasmas 12 056315 (2005)
6. Yu. K. Kurilenkov , V.P.Tarakanhov et al 2015 J. Phys.: Conf. Ser. 653 012025; ibid 102026.
7. Yu. K. Kurilenkov and V.P.Tarakanhov. 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 774 012133.

3-26

ЭРОЗИЯ МАТЕРИАЛА МИШЕНИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

А. Я. Лейви, А. П. Яловец

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия

E-mail: leiviai@susu.ru

Обработка различного рода конструкционных материалов интенсивными потоками (с плотностью мощности 10^5 – 10^8 Вт/см²) ускоренных заряженных частиц или плазмы является одним из перспективных методов улучшения их эксплуатационных характеристик. Вопрос взаимодействия интенсивных плазменных потоков с веществом также связан с такой фундаментальной задачей, как радиационная стой-

кость стенки термоядерного реактора в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу.

В данной работе проводятся экспериментальные и теоретические исследования воздействия компрессионных плазменных потоков (КПП) на вещество. Параметры КПП: концентрация частиц плазмы 10^9 – 10^{18} см⁻³, температура 1 эВ и выше, скорость 10^3 – 10^5 м/с, длительность облучения 10^{-6} – 10^{-3} с. Исследована природа явлений, определяющих формирование рельефа облучаемой поверхности, массопереноса вещества. Было показано, что за счет давления, которое оказывает ударно-сжатый поток на мишень, ванна расплава вытесняется из центра пятна воздействия на периферию. В случае, если геометрические размеры мишени меньше диаметра плазменного потока, то ванна расплава будет вытесняться за пределы мишени. Такой подход позволяет объяснить экспериментально определенные величины толщины расплава и унесенной массы.

THE EROSION OF THE TARGET MATERIAL WHEN EXPOSED TO INTENSE PLASMA FLOWS

A. Ya. Leyvi, A. P. Yalovets

South Ural State University (national research university),
Chelyabinsk, Russia

E-mail: leiviai@susu.ru

Treatment of various types of structural materials by intense flows (with a power density of 10^5 – 10^8 W/cm²), accelerated charged particles, or plasma is one of the most promising methods to improve their performance. Question of intensive interaction of plasma flows and matter is also associated with a fundamental challenge, as the radiation resistance of the walls of a fusion reactor in experiments on controlled thermonuclear fusion.

In this paper we carried out experimental and theoretical studies of the effects of compression plasma flows (CPF) on the matter. The CPF parameters: the concentration of particles in the plasma is up to 10^{18} cm⁻³, the temperature is 1 eV or higher, speed 10^3 – 10^5 m/s, the irradiation duration of 10^{-6} – 10^{-3} s. The nature of the phenomena that determine the formation of the relief of the irradiated surface, mass transfer material. It is shown that due to the pressure exerted on the shock-compressed target melt bath is displaced from the center of the spot to the periphery of the impact. If the geometric dimensions of the target is less than the diameter of the plasma flow, the molten pool will be displaced beyond the target. This approach allows us to explain the experimentally determined values of the melt thickness and erosion mass.

3-27

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОТНОГО ИОНИЗОВАННОГО ВЕЩЕСТВА

П. А. Лобода, А. А. Овечкин,
А. Л. Фальков, А. С. Королёв, А. А. Шадрин,
В. В. Попова, М. Е. Березовская

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

E-mail: p.a.loboda@vniitf.ru

В настоящее время востребованность надежных систематических данных по теплофизическим (т. е., структурным, термодинамическим, оптическим и транспортным) свойствам вещества при экстремальных воздействиях определяется широким кругом актуальных научных и практических приложений. Так, эти данные необходимы для ведения исследований по физике высоких плотностей энергии и астрофизике, изучения строения и состояния недр планет, разработки источников рентгеновского излучения высокой яркости для применения во многих областях науки, в новых технологиях и медицине.

Получение таких данных предполагает развитие теоретических методов реалистического представления плотного ионизованного вещества в широкой области плотностей и температур, а также согласованного описания его теплофизических свойств. Развитие таких методов в настоящее время проводится в РФЯЦ – ВНИИТФ на основе современных моделей среднего иона с различными способами учета межионных корреляций и «химической» модели неидеальной плазмы с полностью квантовомеханическим описанием свойств электронной компоненты.

В докладе представлен обзор работ, проведенных в РФЯЦ – ВНИИТФ по данной тематике, приведены результаты моделирования теплофизических характеристик различных веществ в сравнении с экспериментальными и расчетными данными других авторов.

MODELING OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF DENSE IONIZED MATTER

P. A. Loboda, A. A. Ovechkin,
A. L. Falkov, A. S. Korolev, A. A. Shadrin,
V. V. Popova, M. E. Berezovskaya

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

E-mail: p.a.loboda@vniitf.ru

At present, the need for reliable systematic data on thermophysical (structural, thermodynamical, optical, and transport) properties of matter interacting with intense energy fluxes stem from a broad range of scientific

and practical applications. Specifically, these data are necessary for doing research on high-energy-density physics and astrophysics, for the studies of planet interiors and the development of high-brightness x-ray sources to be employed in many fields of science, novel technologies, and medicine.

To generate such data, one needs to develop a handful of theoretical methods that would provide realistic representation of dense ionized matter in a broad density and temperature range along with the consistent description of its thermophysical properties. RFNC-VNIITF efforts in this direction are based on the use of the up-to-date average atom models enabling one to include ion-ion correlations and the chemical-picture model of nonideal plasmas that all allow for the fully quantum-mechanical description of electronic subsystem.

We present a review of theoretical work performed at RFNC-VNIITF on the modeling of thermophysical properties of dense ionized matter being exemplified by a number of cases in comparison to the experimental and other theoretical data.

3-28

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНИЦИИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ

М. Г. Лобок, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков

Центр фундаментальных и прикладных исследований,
Всероссийский научно исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва,
Россия

E-mail: mglobok@vniia.ru

Яркие и компактные источники рентгеновского излучения, основанные на лазерных методах ускорения электронов, имеют широкий спектр потенциальных применений для построения фазово-контрастного изображения в медицине, биологии, материаловедении, и высококонтрастной гамма-радиографии в области обеспечения безопасности и контроля.

С использованием трехмерного численного моделирования исследованы зависимости температуры и числа горячих электронов от размеров плазменной короны. Моделирование выполнялось с помощью трехмерных кодов «частица-в-ячейке» Мандор и VSim. В проведенных трехмерных расчетах линейно-поляризованный лазерный импульс длительностью 30 фс (с гауссовым временным распределением интенсивности) фокусировался на переднюю поверхность мишени в фокальное пятно с размером 4 мкм с гауссовым распределением интенсивности по радиусу. Максимальное значение интенсивности лазерного излучения 5×10^{19} Вт/см² (что соответствует $a_0 = 6$ для длины волны $\lambda = 1$ мкм) отвечало энергии лазерного импульса равной 0,3 Дж.

Изучена генерация гамма излучения лазерно-ускоренными электронами, бомбардирующими мишени-конвертеры позади лазерной мишени. В качестве конвертера использовались фольги из тантала, золота и меди толщиной 400 мкм и 2 мм. Найден оптимальный размер преплазмы для эффективного ускорения электронов фемтосекундным лазерным импульсом с энергией 300 мДж.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения» и грантов РФФИ (14-29-09244-офи-м, 15-02-03042-а, 16-02-00088-а).

THREE DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODELING OF LASER INITIATED GAMMA SOURCE

M. G. Lobok, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov

Center for Fundamental and Applied Studies, Dukhov All-Russian Research Institute of Automatics, Moscow, Russia.
P.N. Lebedev Physical Institute Russian Academia of Science, Moscow, Russia.

E-mail: mglobok@vniia.ru

Brilliant and compact gamma light sources based on laser plasma accelerated electrons are promising in a wide range of fields, such as medical and biological applications, military, defense and industrial applications, and condensed matter and high energy density science.

Temperature and number of accelerated electrons were studied in three dimensional simulations using 3D PIC codes MANDOR and VSim. In simulation a linear polarized laser pulse with duration 30 fs (Gaussian time profile) was focused in 4 micron spot. Maximum intensity was 5×10^{19} W/cm², the total energy was 300 mJ.

Different regimes of electron acceleration from low-density targets and multiple spatial target density profiles were examined. The generation of gamma radiation by laser accelerated electrons, which impact the converter target located behind the laser target, was studied. The light source gamma spectra were computed using Monte-Carlo simulations for converter targets made of Au and Cu foils 400 microns and 2 mm thickness.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (14-29-09244-офи-м, 15-02-03042-а, 16-02-00088-а).

3-29

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ С УЧЕТОМ ГЕНЕРАЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОЦЕССАХ ДВУХПЛАЗМОННОГО РАСПАДА И ВЫНУЖДЕННОГО РАМАНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ

В. А. Лыков, Е. С. Бакуркина, Н. Г. Карлыханов,
В. Е. Черняков, Е. В. Щёголев

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

E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

Согласно концепции [1] российская мегаджоульная лазерная установка будет работать на 2-ой гармонике излучения Nd-лазера, – в отличие от лазера NIF (США), который работает на 3-ей гармонике излучения Nd-лазера [2]. Известно, что при увеличении длины волны лазера снижается эффективность столкновительного поглощения и усиливается роль нелинейных процессов, приводящих к рассеянию лазерного излучения и генерации надтепловых (быстрых) электронов. Быстрые электроны, проникая в плотные слои мишени, вызывают их разогрев, который препятствует достижению высоких плотностей термоядерного топлива. В работе [2] отмечается, что сжатие мишени значительно ухудшится, если ~0,6% лазерной энергии будет передано в быстрые электроны с энергиями более ~50 кэВ. Поэтому вопросы взаимодействия лазерного излучения с плазмой представляются весьма актуальными, особенно при планировании экспериментов с мишенями прямого облучения на мегаджоульной установке с длиной волны лазерного излучения $\lambda=0,53$ мкм.

В докладе описана модель поглощения лазерного излучения для проведения одномерных расчетов мишеней прямого облучения с учетом генерации быстрых электронов в процессах двухплазмонного распада (ДПР) и вынужденного Рамановского (комбинационного) рассеяния (ВКР). В модели используются три группы быстрых электронов, поскольку их эффективные температуры значительно отличаются при генерации в различных процессах. Новая модель удачно дополнила прежнюю, которая учитывала обратнo-тормозное, резонансное и параметрическое поглощение, укручение профиля плотности, рефракцию лазерного излучения, вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) и особенности фокусировки лазерного излучения на мишень [3].

С новой моделью поглощения лазерного излучения проведены одномерные расчеты мишени с прямым облучением, которая была предложена в работе [4] для экспериментов на российской мегаджоульной лазерной установке с длиной волны излучения $\lambda=0,53$ мкм. Показано, что учет ВРМБ и особенно

генерации быстрых электронов в процессах ДПР и ВКР может катастрофически снизить вероятность достижения условий термоядерного зажигания мишени в этом случае. Необходимо дальнейшее теоретическое и экспериментальное изучение нелинейных процессов взаимодействия лазерного излучения с плазмой и проведение оптимизации мишеней с их учетом для условий предполагаемых экспериментов на мегаджоульной российской установке.

Литературы

1. С. Г. Гаранин. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии. УФН, 181, 434 (2011).
2. M. Hohenberger et al. Polar – Direct – Drive Experiments at the National Ignition Facility, Phys. Plasmas 22, 056308 (2015).
3. Е. Н. Аврорин, А. И. Зуев, Ю. Н. Лазарев и др. Расчеты мишеней для ЛТС по программе «ЗАРЯ». Модель поглощения лазерного излучения сферической мишенью. ВАНТ. Методики и программы численного решения задач математической физики, вып. 2, 10–20 (1985).
4. С. А. Бельков, С. В. Бондаренко, Г. А. Вергунова и др. Термоядерные мишени прямого облучения лазерным импульсом мегаджоульного уровня. ЖЭТФ, 148, вып. 4. С. 784–798 (2015).

SIMULATION OF FUSION TARGETS WITH CONSIDERATION FOR FAST ELECTRONS GENERATION IN PROCESSES OF TWO-PLASMON DECAY AND STIMULATED RAMAN SCATTERING OF LASER RADIATION IN PLASMA

V. A. Lykov, E. S. Bakurkina, N. G. Karlykhanov,
V. E. Chernyakov, E. V. Shchegolev

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

E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

According to [1], the megajoule laser facility in Russia is expected to operate at the 2-nd harmonic of the Nd-laser radiation in contrast to the NIF laser (USA) that operates at the 3-rd harmonic of the Nd-laser radiation [2]. It is known that the increase of laser wavelength leads to decrease of collisional absorption efficiency, an enhancement of laser radiation scattering and a generation of super-thermal (fast) electrons. While penetrating into the high-density layers of the target, fast electrons preheat them thus preventing attaining of high densities of thermonuclear fuel. The target compression would seriously degrade if ~0.6% laser energy is transferred to fast electrons with energy more than ~50 keV [2]. So, aspects of laser – plasma interaction are of great significance especially when planning experiments with direct-drive targets on the MJ-laser with laser radiation wavelength $\lambda=0.53 \mu\text{m}$.

We describe a laser radiation absorption model for one-dimensional calculations of direct-drive targets with allowance for generation of fast electrons in processes of

the two-plasmon decay (TPD) and the stimulated Raman scattering (SRS). The model uses three groups of fast electrons, since their effective temperatures substantially vary in different processes. The new model favorably supplemented the previous one that took into account the inverse bremsstrahlung, resonant, and parametric absorption, as well as the density profile steepening, the laser radiation refraction, the stimulated Brillouin scattering (SBS), and specific features of laser radiation focusing on a target [3].

The new laser radiation absorption model was used for one-dimensional calculations of the direct-drive target proposed in [4] for experiments on the Russian MJ laser facility with laser radiation wavelength $\lambda=0.53 \mu\text{m}$. It is shown that allowance for SBS and especially for a generation of fast electrons during TPD and SRS processes can dramatically reduce probability to achieve a thermonuclear ignition in this case. Further theoretical and experimental investigations of nonlinear processes of laser-plasma interaction are required, as well as the consideration of these processes in further target optimization for experiments on the Russian MJ laser facility.

References

1. S. G. Garanin. High-power lasers and their application in high energy density physics studies. UFN, 181, 434 (2011).
2. M. Hohenberger et al, Polar – Direct – Drive Experiments at the National Ignition Facility, Phys. Plasmas 22, 056308 (2015).
3. E. N. Avrorin, A. I. Zuev, Yu. N. Lazarev, V. A. Lykov, N.P. Sitnikov, O. S. Shirokovskaya. Calculations of laser fusion targets with ZARYa code. I. Model of laser radiation absorption by a spherical target. VANT. Methods and codes for numerical solution of mathematical physics problems, issue 2, 10-20 (1985). (in Russian)
4. S.Ya. Belkov, S.V. Bondarenko, G.A. Vergunova, S.G. Garanin, S.Yu. Guskov, N.N. Demchenko, I.Ya. Doskach, P.A. Kuchugov, N.V. Zmitrienko, V.B. Rozanov, R.V. Stepanov, R.A. Yakhin. Thermonuclear targets directly driven by a MJ-laser pulse. ZhETF (Journal of experimental and theoretical physics), 148, issue 4. pp. 784-798 (2015). (in Russian)

3-30

ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕРХКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С ПРОТЯЖЕННОЙ ПРЕПЛАЗМОЙ

К. С. Назаров, И. В. Глазырин, О. Г. Котова

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

Твердотельные мишени используются для ускорения электронов до релятивистских энергий сверхкоротким лазерным импульсом (ЛИ) [1]. В реальном ЛИ с конечным контрастом материал мишени разлетается и тем самым меняется профиль плотности на момент прихода основного ЛИ [2].

В данной работе представлены результаты моделирования формирования пучка электронов из преплазмы. Профили плотности, температуры и среднего заряда преплазмы рассчитываются газодинамическим кодом [3] для различного уровня контраста ЛИ. Получена зависимость масштаба разлета преплазмы от интенсивности предимпульса.

Рассчитанные распределения плотности передаются в 3D PIC код [4], в котором рассчитывается ускорение электронов основным ЛИ. Получено, что в случае протяженной преплазмы с масштабом несколько десятков микрон пучок электронов для ЛИ интенсивностью $I \sim 10^{18}$ Вт/см² достигает энергии порядка 27 МэВ.

Литература

1. Malka G., Aeonard M. M., Chemin J. F. et al. // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 66. P. 066402.
2. Norreys P. A., Santala M., Clark E. et al. // Physics of Plasmas. 1999. Vol. 6. P. 2150.
3. Mikhailov N. A. // The Convergence Order of Weno Schemes Behind a Shock Front. Mathematical Models and Computer Simulations. 2015, Vol. 27, №. 2. P. 129–138.
4. McGuffey C., Thomas A.G.R., Glazyrin I. V. et al. // Ionization induced trapping in a laser wakefield accelerator, Physical Review Letters. 2010. Vol. 104, P. 025004.

GENERATION OF THE BUNCH OF ELECTRONS AT INTERACTION OF THE ULTRASHORT LASER PULSE WITH LONG PREPLASMA

K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin, O. G. Kotova

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

Solid-state targets are used for acceleration of electrons to the relativistic energies by a ultrashort laser pulse (LP) [1]. In a real LP with finite contrast the target material scatters and by that the profile of density at the moment of arrival of the basic laser pulse [2] changes.

In this report results of modelling of formation of a bunch of electrons from the preplasma are presented. The profiles of density, temperature and average charge of the preplasma calculates by gas-dynamics code [3] for various level of contrast of the LP. Dependence of scale of scattering preplasma from intensity of the prepulse is obtained.

The calculated distributions of density are transmitted in 3D PIC a code [4] in which acceleration of electrons by the basic LP calculated. It is gained, that in a case of long preplasma with scale of tens micron the bunch of electrons for the LP intensity $I \sim 10^{18}$ W/cm² reaches energies of the order 27 MeV.

References

1. Malka G., Aeonard M. M., Chemin J. F. et al. // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 66. P. 066402.
2. Norreys P. A., Santala M., Clark E. et al. // Physics of Plasmas. 1999. Vol. 6. P. 2150.

3. Mikhailov N. A. // The Convergence Order of Weno Schemes Behind a Shock Front. Mathematical Models and Computer Simulations. 2015, Vol. 27, №. 2. P. 129–138.
4. McGuffey C., Thomas A.G.R., Glazyrin I. V. et al. // Ionization induced trapping in a laser wakefield accelerator, Physical Review Letters. 2010. Vol. 104, P. 025004.

3-31

РАСЧЕТЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ И СРЕДНИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИОНИЗАЦИОННОГО РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ

М. Е. Березовская, С. В. Кольчугин,
А. С. Королёв, 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: ovechkin.an@mail.ru

В модели ионизационного равновесия плотной плазмы CP-SC [1] реализована возможность расчета спектральных и средних коэффициентов поглощения фотонов. Коэффициенты линейчатого фотопоглощения вычисляются по суперконфигурационной модели STA [2, 3] с использованием атомных характеристик (одноэлектронных энергий, матричных элементов взаимодействия электронов и матричных элементов радиационных переходов), рассчитанных в последовательной релятивистской постановке с помощью программного пакета FAC (Flexible Atomic Code) [4]. Для вычисления коэффициентов связанно-свободного и свободно-свободного фотопоглощения используются формула Крамерса, обобщенная на случай суперконфигурационного подхода, и формула Борна–Эльверта. Распределения по сортам ионов в плазме и коэффициенты поглощения фотонов, рассчитанные по модели CP-SC, хорошо согласуются с результатами расчетов по модели RESEOS [5], основанной на модели Либермана [6] для среднего атома.

Литература

1. P. A. Loboda, V. V. Popova, A. A. Shadrin. Contrib. Plasma Phys. 49, 738–747 (2009).
2. A. Bar-Shalom, J. Oreg, W.H. Goldstein, D. Shvarts, A. Zigler. Phys. Rev. A 40, 3183 – 3193 (1989).
3. A. Bar-Shalom, J. Oreg, W.H. Goldstein. Phys. Rev. E 51, 4882 – 4890 (1995).
4. M. F. Gu. Astrophys. J. 590, 1131 – 1140 (2003).
5. A. A. Ovechkin, P. A. Loboda, V. G. Novikov, A. S. Grushin, A. D. Solomyannaya. HEDP 13, 20 – 33 (2014).
6. D. A. Liberman. Phys. Rev. B 20, 4981 – 4989 (1979).

OPACITY CALCULATIONS BASED ON THE CHEMICAL-PICTURE MODEL OF PLASMAS

M. E. Berezovskaya, S. V. Kolchugin,
A. S. Korolev, 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: ovechkin.an@mail.ru

Recently, the chemical-picture based CP-SC model [1] has been extended to calculate opacities of hot dense plasmas. Bound-bound spectral opacities are calculated using the superconfiguration approach [2, 3] supplied by the atomic data (one-electron energies, Slater integrals, and radial transition integrals) generated by using the fully relativistic parametric-potential model implemented in the Flexible Atomic Code (FAC) [4]. Bound-free and free-free opacities are calculated with the superconfiguration-generalized Kramers formula and the Born-Elwert formula, respectively. The CP-SC ionization balance and opacity data agree well with those ones calculated by using the RESEOS model [5] based on Liberman's average-atom model [6].

References

1. P. A. Loboda, V. V. Popova, A. A. Shadrin. *Contrib. Plasma Phys.* 49, 738 – 747 (2009).
2. A. Bar-Shalom, J. Oreg, W.H. Goldstein, D. Shvarts, A. Zigler. *Phys. Rev. A* 40, 3183 – 3193 (1989).
3. A. Bar-Shalom, J. Oreg, W.H. Goldstein. *Phys. Rev. E* 51, 4882 – 4890 (1995).
4. M. F. Gu. *Astrophys. J.* 590, 1131 – 1140 (2003).
5. A. A. Ovechkin, P. A. Loboda, V. G. Novikov, A. S. Grushin, A.D. Solomyannaya. *HEDP* 13, 20 – 33 (2014).
6. D. A. Liberman. *Phys. Rev. B* 20, 4981 – 4989 (1979).

3-32

ОТЛИЧИЕ СТАТИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ОТ ГАУССОВА ВИДА

Л. Л. Огородников^{1,2}, С. С. Вергелес^{1,3},
В. В. Лебедев^{1,3}, И. В. Колоколов^{1,3}

¹Московский физико-технический институт
(государственный университет), Москва, Россия

²Сколковский институт науки и технологий, Сколково,
Россия

³Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: noel95@mail.ru, ssver@itp.ac.ru, lebede@itp.ac.ru,
kolokol@itp.ac.ru

В последнее время большой интерес вызывают исследования в активно развивающейся области физики, связанной со случайными волоконными лазерами. Их создание и развитие имеют большое значение

для различных телекоммуникационных средств связи [1–4].

В [5] построена волновая кинетическая теория для активных циклических слабонелинейных волновых систем, которая может быть использована для описания работы случайного волоконного лазера. В частности, были установлены спектры излучения при разных мощностях порога генерации, зависимость интенсивности излучения от частоты и зависимость ширины спектра от выходной мощности, которые хорошо описывают имеющиеся экспериментальные результаты [5].

Одним из неисследованных вопросов, связанных со случайным волоконным лазером, является статистика излучения данного лазера. В [5] было использовано предположение о том, что функция распределения напряженности выходного излучения слабо отличается от гауссовой. Значимость этого отличия можно определить путем использования теоремы Вика.

Целью данной работы является определение отличия статистики излучения данного лазера от гауссовой. Поставленная задача решается путем вычисления корреляционного момента четвертого порядка $I^{(4)}$ поля $\psi(I^{(4)} = |\psi|^4)$ и сравнения его с квадратом интенсивности выходного излучения I ($I = |\psi|^2$). Решение поставленной задачи позволит оценить статистику излучения лазера, что может иметь большое значение для различных практических применений.

В данной работе производится вычисление коррелятора четвертого порядка с использованием диаграммной техники Уайльда в первом и во втором порядках по теории возмущений по малому параметру нелинейности.

Литература

1. Turitsyn S. K. et. all. «Random distributed feedback lasers», *Physics Reports*, 2014.
2. Звелто О. «Принципы лазеров», 4-е изд., СПб.: Издательство «Лань», 2008.
3. Turitsyn S. K. et. all. «Random distributed feedback fibre lasers», *Nature Photonics*, 2010.
4. Wiersma D. S. «The physics and applications of random lasers», *Nature Physics* 4, 359-367, 2008.
5. Churkin D. V. et. all. «Wave kinetics of random fibre lasers», *Nature Communications*, 2, 2015.

THE DIFFERENCE OF THE STATISTICS OF RANDOM FIBER LASER EMISSION FROM GAUSSIAN ONE

L. L. Ogorodnikov^{1,2}, S. S. Vergeles^{1,3},
V. V. Lebedev^{1,3}, I. V. Kolokolov^{1,3}

¹Moscow Institute of Physics and Technology (state university),
Moscow, Russia

²Skolkovo Institute of Science and Technology, Skolkovo,
Russia

³Landau institute for theoretical physics, RAS, Chernogolovka,
Russia

E-mail: noel95@mail.ru, ssver@itp.ac.ru, lebede@itp.ac.ru,
kolokol@itp.ac.ru

The investigations in rapidly developing field of science connected with random fiber lasers are of interest recently. The construction of this lasers has a great impact on various telecommunication means [1–4].

The wave kinetics theory for active cyclic systems with weak nonlinearity that can be used for random fiber laser work's description was made in [5]. In particular, the emission spectra at various levels of the lasing threshold, the dependence of the radiation intensity and the frequency dependence of the spectral width of the output power were established and they describe the experimental results good [5].

One of the unexamined issues associated with random fiber laser is the statistics of laser radiation. In [5] the assumption that the distribution function of the output radiation intensity slightly differs from the Gaussian was used. The value of this difference can be identified by use of Wick's theorem.

The aim of this work is to estimate the differences of the laser emission statistics from the Gaussian. The problem is solved by calculating the correlation points in the fourth order $I^{(4)}$ of the field $\psi(I^{(4)} = |\psi|^4)$ and by comparing it to the square of the output radiation intensity I ($I = |\psi|^2$). The solving of this problem will allow to evaluate the statistics of laser radiation, which may be important for a variety of practical applications.

The the fourth order correlator is obtained in this paper using the Wyld's diagram technique in the first and in the second order of perturbation theory in the small parameter of nonlinearity.

References

1. Turitsyn S. K. et. all. «Random distributed feedback lasers», Physics Reports, 2014.
2. Звелто О. «Принципы лазеров», 4-е изд., СПб.: Издательство «Лань», 2008.
3. Turitsyn S. K. et. all. «Random distributed feedback fibre lasers», Nature Photonics, 2010.
4. Wiersma D. S. «The physics and applications of random lasers», Nature Physics 4, 359-367, 2008.
5. Churkin D. V. et. all. «Wave kinetics of random fibre lasers», Nature Communications, 2, 2015.

3-33

**ДИФРАКТАЛЫ НА ЧАСТОТЕ 36 ГГц,
НАБЛЮДАЕМЫЕ ПРИ
РАДИОЛОКАЦИОННОМ РАССЕЯНИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ
ФРАКТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ,
И ВОЛНОВЫЕ КАТАСТРОФЫ
ВО ФРАКТАЛЬНЫХ
СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ**

А. А. Потапов

Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru

Прохождение излучения через фрактальные экраны было впервые теоретически рассмотрено в фундаментальных работах М. В. Берри [1, 2]. Формирующиеся после прохождения таких экранов волны были названы дифрактами. Катастрофы и фрактальные режимы в случайных волнах также были описаны М. В. Берри в [3]. В данном докладе впервые приведены результаты экспериментальных исследований дифрактов в диапазоне миллиметровых волн (ММВ) на частоте 36 ГГц для различных покровов. Были использованы результаты экспериментов из [4]. Длительность зондирующего импульса составляла 300 нс, высота радиолокационного зондирования с борта вертолета в режиме зависания находилась в пределах 1000 м. Эксперимент проводился в летнее время. Предложен алгоритм нахождения принципиально нового класса признаков, основанных на тонкой структуре модулированных сигналов, рассеянных статистически неровной классической и фрактальной поверхностью. Показано, что при условии выделения средней формы импульса можно сформировать на основе выборки стационарных внутриимпульсных амплитудных флуктуации принципиально новый универсальный класс признаков, в которых используется тонкая структура сигнала. Для волновых задач важнейшей особенностью фрактальных моделей является степенной вид пространственного спектра неровностей. При этом «хвост» отраженного импульса имеет также степенную форму [5–8]. В случае фрактальной среды распространения по мере уменьшения длины волны предел геометрической оптики не может быть достигнут. Суммарный набор критических показателей, которыми определяются моменты флуктуаций интенсивности, завит от размерности топологического пространства распространения волны. В обоих случаях теорий катастроф и фракталов форма распределений вероятностей интенсивности является заведомо негауссовой.

Литература

1. Berry M.V. Diffractals // J. Phys. A: Math. Gen. 1979. V. 12. No 6. P. 781–797.
2. Berry M.V., Blackwell T.M. Diffractional echoes // J. Phys. A. Math. Gen. 1981. V. 14. P. 3101–3110.
3. Berry M. V. Catastrophe and fractal regimes in random waves. In: Structural Stability in Physics / Eds. W. Guttinger and H. Eikemeier, Springer, 1979. P. 43–50.
4. Павельев В. А., Потапов А. А. Влияние земной поверхности на структуру импульсного сигнала в диапазоне миллиметровых волн // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 4. С. 573–582.
5. Потапов А. А., Герман В. А., Чеканов Р. Н. Теории катастроф и фракталов в волновой физике // Тр. VII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», (Красновидово МО, 22–27 мая 2000 г.). – М.: Изд. МГУ. 2000, Т. 2. С. 62–66.
6. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп.- М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
7. Potapov Alexander A. New Conception of Fractal Radio Device with Fractal Antennas and Fractal Detectors in the MIMO

Systems // Book of Abstracts 9th Int. Conf. (CHAOS' 2016) on Chaotic Modeling, Simulation and Applications (23–26 May 2016, Senate House, University of London, London, UK). – London: University of London, 2016. P. 85.

8. Potapov Alexander A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. Chapter 12 in the book: The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / Ed. Skiadas, C.-Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. P. 195–218.

DIFFRACTALS AT FREQUENCY 36 GHZ WHICH ARE OBSERVED AT RADAR SCATTERING OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE BY A FRACTAL SURFACE AND WAVE CATASTROPHES IN FRACTAL RANDOMLY INHOMOGENEOUS MEDIA

A. A. Potapov

V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia

E-mail: potapov@cplire.ru

Radiation transmission through fractal screens was theoretically considered in fundamental works of M. V. Berry [1, 2] for the first time. The waves which are formed after transmission through such screens were called the diffractals. Catastrophes and fractal regimes in random waves were also described by M. V. Berry in [3]. The results of experimental researches of diffractals at wavelength 36 GHz in the millimeter waves range for various coverings were for the first time presented in the given report. The experiments' results from [4] were used. The pulse duration was 300 ns, the height of radar detection from a helicopter in a hovering mode was within 1000 m. The experiment was conducted in summer. An algorithm of finding of a fundamentally new class of signs based on the fine structure of modulated signals scattered by a statistically rough classical and fractal surface was proposed. It was shown that one can form a fundamentally new universal class of signs which the signal fine structure is used in basing on a sample of stationary intrapulse amplitude fluctuations provided selecting the mean form of the pulse. A power form of the space spectrum of irregularities is the main feature of fractal models for waves problems. At that a «tail» of the reflected impulse has also a power form [5–8]. In case of the fractal propagation medium with decreasing wavelength the limit of geometrical optics cannot be reached. A total set of critical indexes which define moments of intensity fluctuations depends on the dimension of the topological space of wave propagation. In both cases of catastrophes theories and fractals theories the form of distributions of intensity probabilities is a priori non-Gaussian.

References

1. Berry M. V. Diffractals // J. Phys. A: Math. Gen. 1979. V. 12. No 6. P. 781–797.
2. Berry M. V., Blackwell T. M. Diffractal echoes // J. Phys. A. Math. Gen. 1981. V. 14. P. 3101–3110.

3. Berry M. V. Catastrophe and fractal regimes in random waves. In: Structural Stability in Physics / Eds. W. Guttinger and H. Eikemeier, Springer, 1979. P. 43–50.

4. Paveliev V. A., Potapov A. A. Earth surface effect on the pulse signals structure in millimeter wave range // Radiotekh. Elektron., 1994]. V. 39. No. 4. PP. 573–582

5. Potapov A. A., German V. A., Chekanov R. N. Catastrophes and fractals theories in wave physics // Proceedings of the VII All-Russian workshop «Volnovye yavleniya v neodnorodnyh sredah», (Krasnovidovo Moscow oblast, May 22–27, 2000). – M.: MSU publishing house. 2000, V. 2. PP. 62–66.

6. Potapov A. A. Fractals in radio physics and radio location: Epy sampling topology. The 2-nd revised and enlarged edition. – M.: Universitetskaya kniga, 2005. 848 pages.

7. Potapov Alexander A. New Conception of Fractal Radio Device with Fractal Antennas and Fractal Detectors in the MIMO Systems // Book of Abstracts 9th Int. Conf. (CHAOS' 2016) on Chaotic Modeling, Simulation and Applications (23–26 May 2016, Senate House, University of London, London, UK). – London: University of London, 2016. P. 85.

8. Potapov Alexander A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. Chapter 12 in the book: The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / Ed. Skiadas, C.-Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. P. 195–218.

3-34

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ВЗРЫВЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ПРОВОДНИКОВ В БЫСТРОНАРАСТАЮЩИХ МЕГАГАУССНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Н. А. Лабеецкая¹, В. А. Ванькевич¹, И. М. Дацко¹,
В. И. Орешкин¹, Д. В. Рыбка¹,
С. А. Чайковский², В. В. Шугуров¹

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

²Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
E-mail: RDm@ovpe.hcei.tsc.ru

Электрический взрыв проводников в режиме скинирования тока представляет интерес с точки зрения различных приложений, одним из которых является проблема транспортировки электромагнитной энергии от мощного импульсного генератора тока к нагрузке. При проектировании мультимегаамперных импульсных генераторов тока вопрос плазмообразования на поверхности проводника весьма актуален, так как при таком уровне тока может произойти взрыв проводящей поверхности и образование плазмы, ведущие к перекрытию плазмой зазора вакуумной магнитоизолированной линии и к снижению эффективности транспортировки электромагнитной энергии в нагрузку.

В работе представлены экспериментальные данные, полученные на сильноточном генераторе МИГ

(при амплитуде тока до 2,5 МА и времени его нарастания 100 нс), по взрыву цилиндрических проводников в магнитных полях до 4 МГс, цель которых состояла в сравнении процесса плазмообразования при скин-вом взрыве однородных и двухслойных проводников. Исследовались цилиндрические проводники из стали 3 диаметром 2 и 3 мм, на половину поверхности которых методом вакуумного напыления наносился слой толщиной до сотни мкм, обладающий меньшей проводимостью. В качестве материалов для внешнего слоя применялись титан, цирконий и висмут. Использование такого типа нагрузки позволяло в идентичных условиях сравнить поведение однородных и двухслойных проводников.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 16-08-00658).

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, двухслойные проводники, сильные магнитные поля, сильноточный импульсный генератор

**THE PLASMA FORMATION DYNAMICS
RESEARCH UNDER SURFACE EXPLOSION
OF DOUBLE-LAYER CONDUCTORS
IN A FAST-RISING MEGAGAUSS
MAGNETIC FIELDS**

N. A. Labetskaya¹, V. A. Vankevich¹, I. M. Datsko¹,
V. I. Oreshkin¹, D. V. Rybka¹,
S. A. Chaikovskiy², V. V. Shugurov¹

¹Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

²Institute of Electrophysics UD RAS, Ekaterinburg, Russia

E-mail: RDm@ovpe.hcei.tsc.ru

Electric explosion of conductors in a skin-effect mode is interesting from the viewpoint of various applications, one of which is the problem of electromagnetic energy delivery from the pulsed power facility to the load. The problem of plasma formation on the surface of the conductor is very important at the designing of multi-megampere pulse generators, since the explosion of the conductive surface and the plasma formation may occur at this current level. It leads to shortening of the magnetically insulated transmission lines by the plasma and could reduce the efficiency of electromagnetic energy delivery to the load.

The paper presents the experimental data obtained on the high-current MIG facility (the current amplitude up to 2.5 MA and rise time to 100 ns) about the explosion of cylindrical conductors in magnetic fields up to 4 MG, the purpose of which was to compare the plasma formation process in the skin-mode explosion of homogeneous and double-layer conductors. The cylindrical conductors made of steel 3 with diameter of 2 and 3 mm were investigated. Their half of surface had additional layer with a thickness up to hundreds microns and having lower conductivity. The layer was made of titanium, zirconium or bismuth by vacuum-sputtering. The use of such type of load allowed us comparing the plasma formation dynam-

ics for a homogeneous and double-layer conductor under identical conditions.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant № 16-08-00658).

Keywords: electrical explosion of conductors, double-layer conductors, strong magnetic field, high-current pulse generator

3-35

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ПОДАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ
КРУПНОМАСШТАБНЫХ
НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПЛАЗМЫ
В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Н. А. Лабецкая¹, В. А. Ванькевич¹, И. М. Дацко¹,
В. И. Орешкин¹, Д. В. Рыбка¹, С. А. Чайковский²

¹Институт Сильноточной Электроники СО РАН, Томск,
Россия

²Институт Электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: RDm@ovpe.hcei.tsc.ru

В работе представлены экспериментальные результаты по взрыву тяжелых алюминиевых цилиндрических лайнеров. Эксперименты проводились на сильноточном генераторе МИГ с амплитудой тока до 2,5 МА и временем его нарастания 100 нс. Исследовались цилиндрические проводники из дюрала диаметром 3 мм, на прикатодную часть которых методом вакуумного напыления наносился слой титана толщиной 20–70 мкм, обладающий меньшей проводимостью. Использование такого типа нагрузки позволяло в идентичных условиях сравнить развитие крупномасштабных неустойчивостей плазмы на поверхности однородных и двухслойных проводников.

В процессе экспериментальных исследований было определено, что оптимальная с точки зрения подавления МГД-неустойчивостей толщина внешнего слоя титана составляет приблизительно 50 мкм. Увеличение толщины внешнего слоя от 50 мкм до 70 мкм не дает значительного эффекта с точки зрения задержки роста неустойчивостей, а нанесение внешнего слоя толщиной свыше 100 мкм на поверхности сложной формы способом вакуумного напыления вообще нецелесообразно.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 16-19-10142).

Ключевые слова: сверхсильные магнитные поля, скиновый взрыв проводников, нелинейная диффузия магнитного поля, крупномасштабные неустойчивости.

**INVESTIGATION THE POSSIBILITY
OF SUPPRESSING THE DEVELOPMENT
OF LARGE-SCALE PLASMA INSTABILITIES
IN STRONG MAGNETIC FIELDS**

N. A. Labetskaya¹, V. A. Vankevich¹, I. M. Datsko¹,
V. I. Oreshkin¹, D. V. Rybka¹, S. A. Chaikovskiy²

¹Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

²Institute of Electrophysics UD RAS, Ekaterinburg, Russia

E-mail: RDm@ovpe.hcei.tsc.ru

The paper presents experimental results on the explosion of heavy aluminum cylinder liners. The experiments were performed on the high-current MIG facility with current amplitudes up to 2.5 MA and its rise time of 100 ns. The cylindrical conductors made of duralumin 3 mm in diameter were investigated. Thin layer of titanium with lower conductivity has been coated onto near-cathode part of conductors by vacuum-sputtering. Thickness of coat was 20–70 μm. The use of such type of load allowed us comparing the growth of large-scale plasma instabilities on the surface of homogeneous and two-layer conductors under identical conditions.

During the experiments it was determined that the optimum thickness of the outer layer of titanium for suppression of MHD instability is approximately 50 microns. Increase of the outer layer thickness from 50 to 70 μm gives negligible delay in growth of instabilities, and outer coating of thickness of 100 microns on a complex surface made by vacuum-sputtering generally unpractical.

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant № 16-19-10142)

Keywords: strong magnetic fields, skin explosion of conductors, nonlinear diffusion of magnetic field, large-scale instability.

анализе геологических процессов зачастую требуется получить достоверную информацию о термодинамических параметрах систем на основе SiO₂ достаточно сложного стехиометрического состава. В данной работе на примере диоксида кремния рассмотрена первопринципная методика построения уравнений состояния оксидов и их смесей, образующих горные породы, с возможностью варьирования плотности и химического состава.

Оптимальные параметры выполненных в работе расчетов были определены на основе анализа равновесных объемов элементарных ячеек двух полиморфных модификаций SiO₂ (α-кварца и стишовита), нулевых изотерм, а также границ их термодинамической фазовой устойчивости с использованием четырех обменно-корреляционных функционалов (LDA, PBE, AM05 и PBEsol).

Псевдопотенциальное приближение, широко применяемое в последние годы для трактовки экспериментальных данных и построения уравнений состояния веществ методами квантовой молекулярной динамики, имеет ряд внутренних ограничений. В частности, явный учет лишь валентных электронов не позволяет проводить моделирование при сколь угодно высокой температуре. В данной работе мы определяем верхнюю температурную границу применимости стандартных псевдопотенциалов ряда вычислительных приложений для SiO₂, опираясь на данные по электронной теплоемкости, рассчитанной полно электронным методом FP-LAPW.

Анализ радиальных функций распределения показал, что вплоть до наивысших достигнутых температур (≈63 кК) в жидком SiO₂ могут существовать ассоциаты Si...Si и Si...O, следовательно, верхняя граница области структурированной жидкости на фазовой диаграмме проходит выше, чем предполагалось ранее [2].

Литература

1. M. D. Knudson, M. P. Desjarlais // Phys. Rev. B – 2013. – V. 88. – P. 184107.
2. D. G. Hicks, T. R. Boehly, J. H. Eggert et al. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 97. – P.025502.

3-36

**ДИОКСИД КРЕМНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОГО
ПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА: АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ
И ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА
ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛОВ**

А. А. Рыкунов

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

E-mail: arykounov@gmail.com

С появлением новых экспериментальных и расчетных данных по ударно-волновым свойствам диоксида кремния (SiO₂), являющегося одним из эталонных материалов в физике высоких плотностей энергии [1], назрел вопрос о корректировке существующих широкодиапазонных уравнений состояния этого соединения с привлечением современных вычислительных средств и методов. Кроме того, при

**WARM DENSE SILICA: ANALYSIS
OF PROBLEMS AND APPLICABILITY LIMITS
FOR THE PSEUDOPOTENTIAL APPROACH**

A. A. Rykounov

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

E-mail: arykounov@gmail.com

Owing to the appearance of new experimental and computational results on the shock response properties of silica (SiO_2) – a reference material in high energy density physics [1], it has become necessary to correct existing wide-range equations of state (EoS) for this compound by means of state-of-the-art computational tools and methods. Furthermore, the analysis of geological processes often requires reliable information on the thermodynamic parameters of rather stoichiometrically complex systems based on SiO_2 . The work employs silica as an example to elaborate the ab initio technique of constructing equations of state for rock-forming oxides and their mixtures that allows density and composition of the system to alter.

Optimal parameters for the reported calculations are determined from the analysis of equilibrium cell volumes for two polymorphic modifications of SiO_2 (α -quartz and stishovite), their zero isotherms, and the boundaries of their thermodynamic phase stability using four exchange-correlation functionals (LDA, PBE, AM05 and PBEsol).

The method of pseudopotentials, which has widely been used in recent years for the interpretation of experimental data as well as construction of EoS by quantum molecular dynamics methods, has a number of inherent restrictions. In particular, the explicit consideration of only valence electrons does not allow modeling the system under study at arbitrarily high temperatures. We determine the upper temperature which limits the applicability of pseudopotentials used in standard libraries of some applications for SiO_2 , employing data on electronic specific heat obtained with the all-electron FP-LAPW method.

An analysis of radial distribution functions suggests that $\text{Si}\dots\text{Si}$ and $\text{Si}\dots\text{O}$ associates may exist in liquid SiO_2 till the highest temperatures (≈ 63 kK) are reached in the study and therefore the upper boundary of the structured liquid region on the phase diagram situated higher than it was supposed earlier [2].

References

1. M. D. Knudson, M. P. Desjarlais // Phys. Rev. B – 2013. – V. 88. – P. 184107.
2. D. G. Hicks, T. R. Boehly, J. H. Eggert et al. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 97. – P. 025502.

3-37

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЛИЯНИЯ ПРЕДЫМПУЛЬСОВ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ
ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
С ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ МИШЕНЯМИ**

К. В. Сафронов, С. А. Горохов, В. А. Флегентов,
Д. С. Гаврилов, Е. А. Лобода,
А. Г. Какшин, Д. А. Вихляев

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

Характер взаимодействия высокоинтенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями существенно меняется при наличии перед поверхностью протяженной низкоплотной плазменной короны, возникающей за счет действия различных предымпульсов. Распространение лазерных импульсов в низкоплотной среде может приводить к ускорению электронов до энергий, превышающих пондеромоторный потенциал. Существует ряд экспериментальных исследований, в которых изучалось взаимодействие мощных лазерных импульсов с твердотельными мишенями в присутствии низкоплотной плазмы перед поверхностью. Так в различных работах показано, что размер предплазмы влияет на ускорение протонов [1], генерацию $K\alpha$ излучения [2], спектр тормозного излучения [3].

В настоящей работе представлены выполненные на 30 ТВт пикосекундной лазерной установке исследования взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с твердотельными мишенями с предплазмой у поверхности. Цель экспериментов состояла в поиске условий облучения мишеней, приводящих к повышению выхода рентгеновского излучения. Предплазма формировалась на мишени под действием специально сгенерированного в усилительном тракте лазерной установки предымпульса пикосекундной длительности. В экспериментах была изучена генерация $K\alpha$ излучения, тормозного излучения в широком спектральном диапазоне, а также в относительных единицах измерен коэффициент отражения лазерного излучения. Установлено, что с увеличением контраста выход рентгеновского излучения возрастает, что сопровождается снижением коэффициента отражения. Максимальный выход наблюдается при контрасте 10^3 .

Литература

1. P. McKenna et al., Laser Part. Beams 26, 591 (2008).
2. X. X. Lin et al., Phys. Rev. E 82, 046401 (2010).
3. K. A. Ivanov et al., Phys. Plasmas 21, 093110 (2014).

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF
PREPULSE IMPACT ON X-RAYS GENERATION
EFFECTIVENESS AT INTERACTION
OF HIGH INTENSE LASER PULSES
WITH SOLID TARGETS**

K. V. Safronov, S. A. Gorokhov, V. A. Flegentov,
D. S. Gavrilov, E. A. Loboda,
A. G. Kakshin, D. A. Vikhlyaet

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

Interaction of ultraintense laser pulses with solid targets changes drastically in the presence of low density plasma corona created by prepulses of different nature. Laser pulses propagating in low density medium can accelerate electrons to energies higher than ponderomotive potential. There exist some experimental investigations where it was shown that preplasma influences proton acceleration [1], $K\alpha$ [2] and bremsstrahlung [3] generation.

In the report, we present the results of experiments on interaction of ultraintense laser pulses with solid targets with preplasma at surface. Studies were performed on 30 TW picosecond laser facility. Preplasma was created by the action of prepulse specially generated in amplification channel of laser facility. Experiments aimed at increasing yield of X-rays. We measured $K\alpha$ yield, bremsstrahlung spectrum and laser pulse reflection coefficient in relative units. It was found that increase of main laser pulse contrast leads to growth of X-ray yield which is accompanied by reduction of reflection coefficient. Maximal X-ray yield was observed at contrast of 10^3 .

References

1. P. McKenna et al., Laser Part. Beams 26, 591 (2008).
2. X. X. Lin et al., Phys. Rev. E 82, 046401 (2010).
3. K. A. Ivanov et al., Phys. Plasmas 21, 093110 (2014).

3-38

**РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МИШЕННОЙ
ПЛАЗМЫ НА ФОКУСИРОВКУ ПУЧКА ЛИУ**

Д. И. Сковородин¹, Ю. А. Трунев¹, В. В. Куркучеков¹,
С. С. Попов¹, В. В. Данилов¹, А. В. Бурдаков¹,
В. Т. Астрелин¹, А. С. Аракчеев¹, М. Г. Атлуханов¹,
Д. А. Старостенко¹, А. А. Старостенко¹,
Я. В. Куленко¹, Л. Н. Вячеславов¹, С. Л. Сеницкий¹,
И. В. Тимофеев¹, А. Е. Кузьменко¹, О. А. Никитин²,
П. А. Колесников², Е. С. Ли², А. Р. Ахметов²,
С. Д. Хренков², Д. В. Сысков²,
В. Ю. Политов², В. Д. Легоньков²

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

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

Для исследования быстропротекающих процессов в оптически непрозрачных средах используется метод импульсной рентгенографии. Он основан на конверсии электронного пучка в рентгеновское излучение на мишени из материала с большим Z . Пространственное разрешение метода определяется поперечным размером источника излучения. Одной из проблем, препятствующей получению малого размера источника, является образование плазмы на мишени-конверторе. Согласно расчетам, плотность энергии, которая выделяется пучком в мишени, достаточна для испарения и ионизации вещества. Образование мишени плазмы может приводить к дефокусировке пучка за счет формирования встречного ионного потока, нейтрализующего заряд пучка. После импульса ускорителя плазма расширяется внутрь ускорительной камеры, что препятствует фокусировке последующих импульсов. Специально для исследования проблемы влияния мишени плазмы на фокусировку пучка электронов была разработана быстрая система регистрации тормозного излучения. Система регистрации позволяет производить измерения с временным разрешением 20 нс, что обеспечивает более 10 кадров за время импульса ЛИУ-2. В экспериментах на ускорителе ЛИУ-2 зафиксировано динамическое изменение размеров фокусного пятна.

THE ORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF TARGET PLASMA INFLUENCE ON ELECTRON BEAM OF LIA

D. I. Skovorodin¹, Yu. A. Trunev¹, V. V. Kurkuchekov¹,
S. S. Popov¹, V. V. Danilov¹, A. V. Burdakov¹,
V. T. Astrelin¹, A. S. Arakcheev¹, M. G. Atlukhanov¹,
D. A. Starostenko¹, A. A. Starostenko¹, Ya. V. Kulenko¹,
L. N. Vyacheslavov¹, S. L. Synitskiy¹, I. V. Timofeev¹,
A. E. Kuzmenko¹, O. A. Nikitin², P. A. Kolesnikov²,
E. S. Li², A. R. Akhmetov², S. D. Khrenkov²,
D. V. Syiskov², V. Yu. Politov², V. D. Legonkov²

¹Budker Institute of Nuclear Physics,
Novosibirsk, Russia

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

To study dynamic processes in optically opaque media the flash radiography is used. It is based on the conversion of the electron beam in X-rays on a target of high-Z material. Performance of the technique requires high spatial resolution. The formation of dense plasma on the target affects the focusing of electron beam. The energy deposited by electron beam is high enough to evaporate and ionize target material. Target plasma formation can lead to emission of back-streaming ions and the neutralization of the beam. After the accelerator pulse, the plasma expands into vacuum and fills the target chamber. To study defocusing of the beam the fast system for registration bremsstrahlung radiation was created. The registration system allows measurements with a time resolution of 20 ns, which provides more than 10 frames during the LIA-2 pulse. In experiments on the accelerator LIU-2 dynamic change of the focal spot size was observed.

3-39

СЖАТИЕ ФОЛЬГОВЫХ ЛАЙНЕРОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА

С. А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

На сильноточном генераторе МИГ (ИСЭ СО РАН) со временем нарастания тока около 80 нс проведены эксперименты по быстрому сжатию фольговых цилиндрических лайнеров. Для ускорения лайнеров диаметром около 1 мм до скоростей 10^7 см/с при эффективной передаче энергии генератора тока в лайнер необходимо обеспечить время нарастания ток через лайнер в несколько наносекунд. Для обострения фронта тока через лайнер в область лайнера с помощью набора радиальных плазменных пушек предварительно инжектируется плазма плотностью около 10^{17} см⁻³. Плазма сгребается по направлению к лайнеру, а, за-

тем, оттесняется от него $J \times B$ силой, в результате ток переключается на лайнер. Скорость движения плазмы у поверхности лайнера близка к локальной скорости Альфена, а время переключения тока на лайнер составляет несколько наносекунд. Снижение времени ускорения лайнера повышает устойчивость процесса его сжатия. Малый исходный диаметр лайнера и более устойчивое его сжатие позволяют существенно повысить компактность формируемого пинча и плотность плазмы в нем. В эксперименте при сжатии лайнеров диаметром 1–2 мм из алюминиевой фольги толщиной 8 мкм получен столб плазмы диаметром менее 0,3 мм с плотностью близкой к твердотельной.

SMALL-DIAMETER FOIL-LINER IMPLOSIONS

S. A. Sorokin

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk Russia

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Experiments on fast aluminum-foil-liner implosions on the high-current MIG generator with current rise time about 80 ns have been performed. To accelerate a liner with a diameter of about 1 mm up to velocities of 10^7 cm/s (at effective transfer of generator energy to the liner) a few nanoseconds rise time of current through the liner must be provided. To decrease the rise time of current through the liner, plasma with density about 10^{17} cm⁻³ was injected in the liner area using a set of radial plasma guns. The injected plasma is swept up to the liner and then pushed away from it by the $J \times B$ force. As a result, the current switches to the liner. The plasma velocity near the surface of the liner is close to the local Alfvén velocity and switching the current on the liner is a few nanoseconds. Reduction of liner acceleration time improves the liner implosion stability. The small diameter of the original liner and more stable its implosion can significantly increase compactness of the formed pinch and plasma density in it. Plasma columns with a diameter of less than 0.3 mm with a density close to the solid state were obtained in the experiments by imploding (1–2)-mm diameter liners made of 8-μm-thick aluminum foil.

3-40

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЗАКОРОЧЕННЫМ
НАБОРОМ РАДИАЛЬНЫХ ПРОВОЛОЧЕК
СТЕРЖНЕВЫМ ПИНЧ-ДИОДОМ
НА ГЕНЕРАТОРЕ МИГ**

С. А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Рассматриваемый в этой статье низкоимпедансный стержневой пинч-диод исходно закорочен набором радиальных проволочек. В начальной стадии импульса тока генератора происходит накопление энергии в индуктивной нагрузке. Плазма проволочек ускоряется $J \times B$ силой к кончику анодного стержня. Вакуумный зазор (электронный диод) формируется, когда плазма проволочек отрывается от анодного стержня. В последующее время величина зазора и импеданс диода определяются движением плазмы проволочек и плазмы анодного стержня. Эксперименты проводились на импульсном генераторе тока МИГ (1 МВ, 1.5 МА, 80 нс) в Институте сильноточной электроники СО РАН. Показано, что переход от осесимметричной конфигурации с инжектированной плазмой или радиальной фольгой к существенно не осесимметричной конфигурации с несколькими проволочками не меняет сколь-либо существенно результат в части фокусировки электронного пучка на кончик стержня.

**EXPERIMENTS
WITH A WIRE-ARRAY-SHORTED
ROD-PINCH DIODE ON THE MIG GENERATOR**

S. A. Sorokin

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Low-impedance rod-pinch diode, described in this paper, is preliminarily shorted with a radial wire array. In the initial stage of the generator current pulse energy accumulates in the inductive load. The $J \times B$ force accelerates the wire plasma to the anode rod tip. A vacuum gap (electron diode) forms when plasma of the wire material is detached from the anode rod. In the subsequent time, the size of the gap and diode impedance is determined by the movement of wire and rod plasmas. The experiments were performed on the MIG pulsed power generator (1 MV, 1.5 MA, 80 ns) at Institute of High Current Electronics SB RAS. It is shown that the transition from axisymmetric configuration with injected plasma or radial foil to not significantly axisymmetric configuration with multiple wire array does not modify any substantial result in part of the electron beam focusing on the rod tip.

3-41

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ
ПЛАЗМЫ И УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ
НА СУБПЕТАВАТТНОМ
ЛАЗЕРНОМ СТЕНДЕ PEARL**

А. А. Соловьев, К. Ф. Бурдонов, А. А. Еремеев,
В. Н. Гинзбург, Е. А. Хазанов, А. А. Кочетков,
А. А. Кузьмин, И. А. Шайкин, А. А. Шайкин,
И. В. Яковлев, А. Д. Сладков, А. В. Коржиманов,
G. Revet¹, S. N. Chen¹, С. А. Пикуз², И. Ю. Скобелев²,
С. Н. Рязанцев², М. А. Алхимова², Е. Д. Филиппов²,
Т. А. Пикуз², А. Ciardi³, В. Khair³,
М. В. Стародубцев, J. Fuchs¹

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

¹Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

²ОИВТ РАН, Москва, РФ

³LERMA, Observatoire de Paris, CNRS UMR 8112,
Paris, France

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований процессов лазерно-плазменного взаимодействия, проведенных на стенде PEARL (ИПФ РАН) и связанных с задачами ускорения заряженных частиц и созданием плазмы с высокой плотностью энергии для исследования задач астрофизики и пр.

Представлены результаты экспериментов по ускорению протонов при помощи лазерного импульса мощностью до 170 ТВт (<8 Дж, 60 фс), сфокусированного внеосевой параболой F/4 в пятно диаметром порядка 6 мкм на тонкую алюминиевую мишень (0,5–10 мкм), ориентированную под 45° к лазерной оси. Интенсивность лазерного излучения в фокальном пятне достигала $3 \cdot 10^{20}$ Вт/см². Исследовался TNSA (target normal sheath acceleration) режим ускорения протонов, в ходе которого протоны ускоряются электростатическим полем разделения зарядов, возникающим в результате нагрева электронов мишени лазерным излучением. В ходе экспериментов достигнуты энергии протонов, превышающие 43 МэВ, что является рекордом для лазерных систем с выходной энергией до 20 Дж.

Другое направление исследований на лазерном стенде PEARL состоит в лабораторном моделировании астрофизических задач. В экспериментах исследовались процессы взаимодействия высокоскоростных потоков горячей плотной лазерной плазмы с внешними магнитными полями, направленные на моделирование магнитогидродинамических процессов, развивающихся в окрестности аккрецирующих астрофизических систем. Изучались физические процессы в пограничном слое между движущейся плазмой и магнитным полем, важные для создания физических моделей внутреннего края аккреционных дисков, аккреционных колонок, астрофизических джетов и пр. Представлены первые экспериментальные результаты, моделирующие аккрецию вещества на астрофизические объекты, обладающие собственным магнитным полем.

**PLASMA PHYSICS AND PARTICLE
ACCELERATION STUDIES
AT THE PEARL LASER FACILITY**

A. A. Soloviev, K. F. Burdonov, A. A. Ereemeev,
V. N. Ginzburg, E. A. Khazanov, A. A. Kochetkov,
A. A. Kuzmin, I. A. Shaykin, A. A. Shaykin,
I. V. Yakovlev, A. D. Sladkov, A. V. Korzhimanov,
G. Revet¹, S. N. Chen¹, S. A. Pikuz², I. Yu. Skobelev²,
S. N. Ryazantsev², M. A. Alkhimova², E. D. Filippov²,
T. A. Pikuz², A. Ciardi³, B. Khia³,
M. V. Starodubtsev, J. Fuchs¹

IAP RAS, Nizhny Novgorod, Russia

¹Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

²ИИТ RAS, Moscow, Russia

³LERMA, Observatoire de Paris, CNRS UMR 8112,
Paris, France

Recent results on the experimental investigations of laser-plasma interaction at the PEARL laser facility (IAP RAS) is reported. Our research areas are related to the laser-driven proton acceleration and to the laboratory astrophysics.

The experimental results on the laser-driven proton acceleration using a femtosecond laser pulse with the maximal power up to 170 TW (<8 J, 60 fs) focused by a F/4 off-axis parabola in the focal spot of 6 μm diameter on the surface of a thin aluminum target (whose thickness varied from 0.5 to 10 μm). The target has been oriented at 45° with respect to the laser axis. The intensity of the laser radiation in the focal spot reached up to $3 \cdot 10^{20}$ W/cm². TNSA (target normal sheath acceleration) was the main regime of proton acceleration in our experiments was. In this regime, protons are accelerated by the electrostatic field due to space charge separation caused by the heating of the target electrons by the laser radiation. During the experiments, energies of the accelerated proton achieved more than 43 MeV, which is a record value for the laser systems with output energy less than 20 Joules.

Another field of research at the PEARL laser facility is the laboratory modeling of astrophysical problems. We studied the coupling of a high-amplitude and large-scale magnetic field to high-velocity plasma flows in order model the magnetohydrodynamic processes in the vicinity of accreting astrophysical systems. In the course of this work we studied the physical processes in the boundary layer between the moving plasma with a magnetic field, which is a key factor for the development of physical models of different astrophysical objects, such as accretion disks, accretion columns, astrophysical jets etc. The experimental results modeling the accretion processes on the magnetized astrophysical objects are presented.

3-42

**ЭКРАНИРУЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЛАВИНО-СТРИМЕРНОГО
РАЗРЯДА НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ**

В. С. Сысоев¹, Ю. А. Кузнецов¹, М. У. Булатов¹,
Д. И. Сухаревский¹, М. Ю. Наумова¹, Н. М. Лепехин¹,
Л. М. Макальский², В. В. Сиденко²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Высоковольтный научно-исследовательский центр 900,
Истра, Россия

²НИУ Московский энергетический институт (ТУ), Москва,
Россия

E-mail: Syssoev467@mail.ru

Применение плазмы электрического разряда для экранировки объектов от зондирующего излучения в СВЧ диапазоне сталкивается со значительными трудностями. Прежде всего это связано с трудностью создания экранирующей плазмы достаточного геометрического размера, позволяющей перекрыть объект, а также большую энергоёмкость поддержания непрерывного горения такой плазмы. Это обуславливает сложность технической реализации необходимого генератора электроразрядной плазмы.

В работе описаны экспериментальные результаты изучения экранирующих свойств плазмы объемного лавино-стримерного электрического разряда для случая периодического импульсного излучения в СВЧ диапазоне. При экспериментах горение экранирующей плазмы происходит только в тот момент времени, когда зондирующий импульс СВЧ генератора приходит на объект и продолжается только время, соответствующее длительности этого импульса. Учитывая временные характеристики зондирующих импульсов СВЧ генератора (длительность и скважность импульсов) таким образом удается значительно, на 1,5–2 порядка, снизить потребляемую мощность генератора плазмы и обеспечить возможность проведения испытаний в лабораторных условиях.

Разработанный специальный генератор лавино-стримерного разряда (обеспечивающий получение высоковольтных импульсов в субмикросекундном диапазоне) со специальными высоковольтными электродами разрядного промежутка позволяет производить быстрое включение зажигания электроразрядной плазмы необходимого объема. Кроме того, разработана и реализована специальная схема управления, обеспечивающая синхронизацию момента включения горения плазмы в промежутке с импульсом генератора СВЧ сигнала.

Приведены результаты экспериментов для экранировки конкретных объектов различного геометрического размера.

**THE IMPROVEMENT OF METHODS
OF THE PREVENTION
OF THE THUNDER-STORM SHIELDING
IMPACT OF PLASMA OF ELECTRIC
LAVINO-STRIMERNOGO OF THE CATEGORY
ON ELECTROMAGNETIC RADIATION
IN THE MICROWAVE OVEN RANGE**

V. S. Syssoev¹, Yu. A. Kuznetsov¹, M. U. Bulatov¹,
D. I. Sukharevsky¹, M. Yu. Naumova¹, N. M. Lepekhn¹,
L. M. Makalsky², V. V. Sidenko²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia,
VNITZ 900, Istra, Russia

²НИУ Moscow power institute (TU), Moscow, Russia
E-mail: Syssoev467@mail.ru

Use of plasma of electric discharge for shielding of objects from the probing radiation in the microwave oven range meets considerable difficulties. First of all it is connected with difficulty of creation of the shielding plasma of the sufficient geometrical size allowing to block an object, and also big power consumption of maintenance of continuous burning of such plasma. It causes complexity of technical realization of the necessary generator of electrodigit plasma.

In work experimental results of studying of the shielding properties of plasma of volume lavino-streamer electric discharge for a case of periodic pulse radiation in the microwave oven range are described. At experiments burning of the shielding plasma happens only in that time-point when the probing impulse of the microwave oven of the generator comes to an object and only time corresponding to duration of this impulse proceeds. Considering characteristics in time of probing generator microwave oven impulses (duration and porosity of impulses) thus it is possible considerably, on 1,5–2 about, to reduce the power consumption of the generator of plasma and to provide a possibility of carrying out tests in vitro.

The developed special generator of the lavino-streamer category (providing high-voltage impulses in the submicrosecond range) with special high-voltage electrodes of a digit interval allows to make quickly inclusion of ignition of electrodigit plasma of necessary volume. Besides, the special scheme of management providing synchronization of the moment of inclusion of burning of plasma in an interval with a signal microwave oven generator impulse is developed and realized.

Results of experiments for shielding of concrete objects of various geometrical size are given.

3-43

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКОГО ХОЛЬРАУМА
С Z-ПИНЧЕМ**

Сяоцзянь Шу, Дэлун Сяо, Нин Дин, Шункай Сунь,
Чуан Сюэ и Ян Чжан

Институт прикладной физики и вычислительной
математики, Пекин 100088, Китай

E mail: shu_xiaojian@iapcm.ac.cn

Динамический хольраум представляет собой возможный вариант для получения ядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы. С помощью одномерного кода RMHD численно исследуется динамика имплозии Z-пинча вольфрамовой проволочной сборки, погруженной в конвертер из СН пены, в случае максимальных токов установки 8 МА. Особенно подробно рассматривается взаимодействие столкновения плазмы проволочной сборки с плазмой СН-конвертера. Показано, что локальная область высокого давления, образующаяся вследствие столкновения вольфрамовой плазмы с плазмой конвертера, является решающей для инициирования сильно излучающей ударной волны и для формирования динамического хольраума. По мере распространения ударной волны по направлению к оси область хольраума уменьшается, а температура излучения увеличивается. Излучение хольраума в основном определяется подробными распределениями параметров плазмы при столкновении плазмы проволочной оболочки с плазмой СН-конвертера. А эти распределения, в свою очередь, определяются множеством факторов, таких как ток генератора, начальные массы и радиусы проволочной сборки и конвертера, а также материал конвертера. При постоянном токе генератора можно определить оптимальную проволочную сборку. Результаты численного моделирования показывают, что подходящее соотношение масс проволочной сборки и СН-конвертера чрезвычайно важно в плане влияния на излучение хольраума. Когда соотношение масс немного меньше единицы и составляет, например, 0,75, можно получить относительно оптимальный динамический хольраум. Кроме того, соотношение начального радиуса проволочной сборки к радиусу конвертера является важным для определения формы излучения хольраума. Необходимо выбрать правильное соотношение, которое будет ни слишком большим, чтобы вызвать сильную магнитную неустойчивость Рэля–Тейлора, ни слишком маленьким, чтобы набрать маленькую кинетическую энергию проволочной сборки до соударения с поверхностью конвертера. В настоящее время в экспериментах с динамическим хольраумом на установке PTS с током ~8 МА проводятся исследования излучающих ударных волн с использованием конструкций с нашими параметрами. Образование динамического хольраума подтверждается распространением ударной вол-

ны и радиальным профилем излучения. Характеристики измеренной мощности излучения в радиальном и осевом направлении, как и изменение динамических параметров, также подтверждают наше качественное понимание динамических хольраумов.

Ключевые слова: динамический хольраум; динамика имплозии; численное моделирование; Z-пинч.

**NUMERICAL SIMULATIONS
ON THE FORMATION PROCESS
OF Z-PINCH DYNAMIC HOHLRUAMS**

Xiaojian Shu, Delong Xiao, Ning Ding, Shunkai Sun,
Chuang Xue and Yang Zhang

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics,
Beijing 100088, China

E-mail: shu_xiaojian@iapcm.ac.cn

The dynamic hohlraum is a possible selection to drive inertial confinement fusion. The implosion dynamics of a tungsten wire-array Z-pinch embedded with a CH foam converter, especially the impaction interaction of the wire-array plasma with the CH converter plasma, is numerically investigated using a one-dimensional RMHD code in the case of peak drive currents of 8 MA. It is shown that a local high pressure region, which is generated by the impaction of the tungsten plasma with the converter plasma, is crucial to launch the strongly radiating shock wave and to form the dynamic hohlraum. As the shock propagates to the axis, the hohlraum becomes small and the radiation temperature is also increased. Basically, the hohlraum radiation is determined by the detailed profiles of plasma conditions when the wire-array plasma impacts onto the CH converter plasma. And these profiles are determined by many factors, such as the drive current, initial masses and radii of the wire-array and the converter, as well as the material of the converter. When the drive current is fixed, the optimal wire-array can be determined. Numerical results show that a suitable mass ratio of the wire-array to the CH converter is very important to affect the hohlraum radiation. When this mass ratio is slightly lower than unity, for example 0.75, a relatively optimal dynamic hohlraum can be produced. Also, the ratio of the initial wire-array radius to the converter radius is important to determine the shape of the hohlraum radiation. A suitable ratio, neither too large to induce strong Magneto-Rayleigh–Taylor instability nor too small to gain a small kinetic energy of the wire-array before impacting onto the converter surface, should be selected. Currently, on dynamic hohlraum experiments on the ~8 MA PTS facility, the radiating shock were investigated using our parameter designs. The formation of dynamic hohlraum is confirmed by the shock propagation and the radial radiation profile. The characteristics of measured radial and axial radiation power, as well as the variation of dynamic parameters also validate our qualitative understanding of dynamic hohlraums.

Keywords: dynamic hohlraum; implosion dynamics; Numerical simulation; Z-pinch.

3-44

**ИОННО-КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ
ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ:
ВЗАИМОСВЯЗЬ МИКРОСТРУКТУРЫ
ТЕПЛОГО ПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА
И ЕГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

А. Л. Фальков^{1,2}, А. А. Овечкин¹, П. А. Лобода^{1,2}

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

²Национальный исследовательский ядерный университет
МИФИ, г. Москва

E-mail: sinarit9091@mail.ru

Плазма с температурой порядка энергии Ферми и плотностью вблизи нормальной плотности вещества – т. н. теплое плотное вещество (Warm Dense Matter – WDM) – реализуется в астрофизических объектах и недрах планет [1, 2], а также в лабораторных экспериментах по физике высоких плотностей энергии [3]. Знание термодинамических свойств WDM необходимо для построения широкодиапазонных уравнений состояния (УРС) вещества, используемых в расчетах динамики плазмы. При построении теоретических УРС ионизованного вещества основное внимание, как правило, уделяется электронной подсистеме плазмы [4]. Однако ионная подсистема плазмы в состоянии WDM является сильнонеидеальной, и средняя кулоновская энергия взаимодействия между ионами может значительно превышать из среднюю кинетическую энергию, что приводит к формированию ближнего порядка.

В работе рассматривается развитие модели, сформулированной Старреттом и Саумоном (С. Е. Starrett, D. Saumon) [5], направленное на описание взаимосвязи между микроструктурой неупорядоченной ионной подсистемы плотного ионизованного вещества и его термодинамическими свойствами. Данная методика не требует проведения молекулярно-динамических (МД) расчетов пространственных конфигураций ионов (как это происходит при использовании псевдоатомной МД [6]) и основана на использовании формализма кластерного разложения [7] для удельной свободной энергии, позволяющего путем численного дифференцирования удельной свободной энергии вещества по плотности и температуре строить термодинамически согласованные УРС WDM, в которых учитываются эффекты сильного кулоновского взаимодействия между компонентами плазмы.

Микроструктура однотемпературного вещества с квантовой электронной подсистемой и несколькими сортами классических ионов описана при помощи сферически симметричных ион-ионных парных корреляционных функций – радиальных функций распределения (РФР), характеризующих относительную вероятность обнаружения ионов заданного сорта на определенном расстоянии между ними. Ион-ионные РФР найдены в результате численного решения системы уравнений Орнштейна–Цернике с гиперцепным

замыканием [8] и с эффективными ион-ионными потенциалами, рассчитанными в соответствии с оригинальной моделью [5]. Электронная подсистема описана статистически в приближении Томаса–Ферми–Дирака, причем влияние неоднородности радиального распределения ионной плотности на электронную подсистему вещества может быть учтено самосогласованным образом, что означает выход за рамки модели среднего атома, заключенного в сферическую ячейку Вигнера–Зейтца. Отметим, что в рассматриваемой модели уравнения для подсистем решаются во всем пространстве, для которого и достигается полная электронейтральность электрон-ионной системы.

Приведено сравнение расчетных ион-ионных РФР с результатами рентгеновских дифрактометрических экспериментов [9] для расплавов простых веществ и их смесей. Проанализирован ход термодинамических функций и ударных адиабат для различных веществ. Уделено внимание вопросу об определении области применимости рассматриваемой модели, учитывающей ионные корреляции.

Литература

1. H. M. Van Horn. // *Science*. – 1991. – Vol. 252. – Pp. 384–389.
2. Литасов К. Д., Шацкий А. Ф. Состав и строение ядра Земли. – Новосибирск: Инс-т геологии и минералогии СО РАН им. В. С. Соболева, изд-во СО РАН, 2016.
3. Фортгов В. Е., Храпак А. Г., Якубов И. Т. Физика неидеальной плазмы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
4. Никифоров А. Ф., Новиков В. Г., Уваров Б. В. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы и методу расчета росселандовых пробегов и уравнений состояния. – М.: Физико-математическая литература, 2000.
5. C. E. Starrett, D. Saumon. // *Phys. Rev. E*. – 2013. – Vol. 87. – Pp. 013104(14).
6. C. E. Starrett, D. Saumon. // *Phys. Rev. E*. – 2016. – Vol. 93. – Pp. 063206(11).
7. T. Blenski, B. Chichoki. // *Phys. Rev. E*. – 2007. – Vol. 75. – Pp. 056402(22).
8. Крокстон К. Физика жидкого состояния: статистическое введение. – М.: Мир, 1978.
9. H. F. Y. Waseda. The structure of non-crystalline materials. – 1980 – 2014. <http://res.tagen.tohoku.ac.jp/waseda/scm/index.html>.

ION-CORRELATION MODEL OF DENSE PLASMAS. INTERRELATION OF WARM-DENSE-MATTER MICROSTRUCTURE AND ITS THERMODYNAMICAL PROPERTIES

A. L. Falkov^{1,2}, A. A. Ovechkin¹, P. A. Loboda^{1,2}

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

²National Nuclear Research University MEPhI, Moscow

E-mail: sinarit9091@mail.ru

Plasma state with a density close to the normal-phase solid density and a temperature of about the Fermi energy is known as the warm dense matter (WDM) state. It is

widely met in various astrophysical [1] and planetology [2] studies as well as in high-energy-density physics experiments [3]. Appropriate characterization of WDM thermodynamical properties is of high importance for the construction of wide-range equations of state (EOS) being an integral part of the plasma-dynamics modeling. Theoretical studies of EOS are usually focused on the electronic subsystem of WDM [4]. At the same time the WDM ionic subsystem is however strongly nonideal and average interionic Coulomb potential energy may far exceed average ion kinetic energy. As a result, a short-range liquid-like ordering takes place.

Using the modified model of C. E. Starrett and D. Saumon [5] we give a description of the interrelation of the disordered-matter microstructure and its thermodynamical functions. We use the cluster expansion formalism for the single-atom Helmholtz free energy [6] enabling us to avoid making the pseudoatom molecular dynamics simulations [7] to generate spatial ionic configurations. The thermodynamically consistent EOS with realistic description of the Coulomb interactions can readily be constructed by means of numerical differentiation.

For the WDM state with the same temperatures of quantum-mechanically-treated electrons and various classical ions, ion microstructure can be characterized by using the spherically symmetric radial distribution functions (RDFs). The latter ones represent relative probabilities to find ion-ion pairs at specified distances between them. Ion-ion RDFs are obtained from the numerical solution of the Ornstein–Zernike (OZ) set of equations with the hypernetted-chain closure [8]. Following the original approach [5], we calculate effective interionic potentials and use those in the OZ set of equations. The electronic plasma subsystem is considered in the Thomas–Fermi–Dirac approximation with the self-consistent treatment of the ion-density inhomogeneity effect, thus driving the model developed beyond the scope of the conventional average-atom models bounded by the Wigner–Seitz cell. In the model, all the equations are solved over all space and therefore the electrical neutrality condition is satisfied by the numerical integration over all space as well.

The ion-ion RDFs obtained are in close agreement with the X-ray scattering experimental data [9] for the melted materials of single-element species and the mixtures of those. Thermodynamic functions and Hugoniot curves of various materials are presented. The applicability limits of the model are also discussed.

References

1. H. M. Van Horn. // *Science*. – 1991. – Vol. 252. – Pp. 384–389.
2. K. D. Litasov, A. F. Shatskii. Composition and structure of the Earth core [in Russian]. – Novosibirsk: SB RAS publisher, 2016. (in Russian)
3. V. E. Fortov, A. G. Khrapak, and I. T. Yakubov. Non-ideal plasma physics [in Russian]. – Moscow: FIZMATLIT publisher, 2010. (in Russian)
4. A. F. Nikiforov, V. G. Novikov, B. V. Uvarov. Quantum-statistical models of hot dense matter. Methods for computation

opacity and equation of state. – Basel, Boston, Berlin: Birkhauser Verlag, 2005.

5. C. E. Starrett, D. Saumon. // Phys. Rev. E. – 2013. – Vol. 87. – Pp. 013104(14).

6. T. Blenski, B. Chichoki. // Phys. Rev. E. – 2007. – Vol. 75. – Pp. 056402(22).

7. C. E. Starrett, D. Saumon. // Phys. Rev. E. – 2016. – Vol. 93. – Pp. 063206(11).

8. C. A. Croxton. Liquid state physics – a statistical mechanical introduction. – Cambridge: Cambridge University Press, 1974.

9. H. F. Y. Waseda. The structure of non-crystalline materials. – 1980 – 2014. <http://res.tagen.tohoku.ac.jp/waseda/scm/index.html>.

3-45

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ
В СТЕКЛЯННЫХ КАПИЛЛЯРАХ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

В. А. Флегентов, С. А. Горохов, К. В. Сафронов,
Д. С. Гаврилов, Е. А. Лобода, А. Г. Какшин,
Н. А. Пхайко, Д. А. Вихляев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия
E-mail: dep5@vniitf.ru

Ускорение электронов ультракоротким лазерным импульсом в настоящее время является бурно развивающейся областью научной деятельности. Получаемые на лазерных установках пучки релятивистских электронов и генерируемое ими тормозное жесткое рентгеновское излучение обладают рядом уникальных характеристик (малый размер и расходимость пучка, короткая длительность импульса), которые потенциально имеют большие возможности применений в неразрушающем контроле массивных объектов. Важной задачей с точки зрения применения в радиографии является повышение эффективности ускорения электронов.

Одним из привлекательных вариантов мишеней для генерации пучков релятивистских электронов являются капилляры. В капилляре возможно формирование распределения плотности плазмы с минимумом на оси. За счет этого можно увеличить длину ускорения, а также снизить угловой разброс пучков.

На 30 ТВт пикосекундной лазерной установке проведена серия экспериментов по генерации релятивистских электронов в капиллярных мишенях. Ускорительная плазменная среда формировалась за счет абляции внутренних стенок капилляра под действием специально сгенерированного предимпульса.

В результате исследования зарегистрированы пучки с углом раствора на полувысоте ~50 мрад, экспоненциальным спектром с максимальной энергией

около 20 МэВ и суммарным зарядом в пучке составляющим величину ~200 пКл. Полученный заряд не ниже значений получаемых в настоящее время при ускорении из газовых струй и газонаполненных ячеек, при этом существенно превышает значения, полученные ранее при использовании капилляров [1, 2].

Литература

1. Y. Kitagawa, Y. Sentoku, Sh. Akamatsu et al., Phys. Rev. Lett. 92, 205002 (2004)

2. Y. Mori, Y. Sentoku, K. Kondo et al., Phys. of Plasmas 16, 123103 (2009)

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION
OF RELATIVISTIC ELECTRON BEAM
GENERATION IN GLASS CAPILLARIES
UNDER THE ACTION OF ULTRASHORT
LASER PULSE**

V. A. Flegentov, S. A. Gorokhov, K. V. Safronov,
D. S. Gavrilov, E. A. Loboda, A. G. Kakshin,
N. A. Pkhaiko, D. A. Vihljayev

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

Laser plasma generated relativistic electron beams and related bremsstrahlung hard x-rays are characterized by unique features such as small spot size, low beam divergence and short pulse duration. These beams may be potentially used for nondestructive control of high density objects. The main problem for this goal is to increase electron acceleration efficiency.

One of the attractive targets for relativistic electron beams generation is a capillary. Inside capillary, it is possible to create plasma medium with axisymmetric density distribution. As a result acceleration length will increase and beam angle divergence can be reduced.

Experiments on electron acceleration in capillary targets were performed on 30 TW picosecond laser facility. Accelerating plasma medium was created by ablating capillary inner walls by specially generated prepulse of laser facility.

We have detected electron beams of exponential spectrum with maximum particle energy of ~20 MeV, ~50 mrad divergence angle and total charge of ~200 pC. Such charge is comparable to values obtained by different researchers in experiments with gas jets and gas cells, and significantly exceeds one achieved in experiments with capillary targets previously [1, 2].

References

1. Y. Kitagawa, Y. Sentoku, Sh. Akamatsu et al., Phys. Rev. Lett. 92, 205002 (2004)

2. Y. Mori, Y. Sentoku, K. Kondo et al., Phys. of Plasmas 16, 123103 (2009)

3-46

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ
ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ
АБЛЯЦИИ АЛЮМИНИЯ**

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

Объединенный институт высоких температур Российской
академии наук, Москва, Россия

E-mail: Vladimir.Fokin@phystech.edu

Наночастицы различных размеров и их коллоидные растворы широко применяются в науке и технике. Абляция фемтосекундным лазерным импульсом – довольно эффективный способ получения частиц различных размеров. Чтобы производить такие частицы более эффективно, важно понимать механизмы, лежащие в основе лазерной абляции.

Для моделирования лазерной абляции мы используем континуально-атомистическую модель, основанную на приближении [1], в которой для описания ионной подсистемы используется молекулярная динамика, тогда как электронная подсистема описывается путем решения уравнения сохранения энергии электронов. Основным преимуществом комбинированной модели по сравнению с гидродинамическим приближением является точное воспроизведение фрагментации металла как в твердой, так и в жидкой фазе на малых временных и пространственных масштабах. В нашей модели поглощение лазерного излучения рассчитывается путем решения уравнений Гельмгольца. Для описания диэлектрической проницаемости, электронной теплопроводности и электрон-ионного обмена мы используем широкодиапазонные модели [2], применение которых позволяет моделировать двухимпульсное и многоимпульсное воздействие.

Мы исследуем структуру абляционного плюма, механизмы формирования наночастиц и их распределение по размерам.

Литература

1. D. S. Ivanov, L. V. Zhigilei // *Phys. Rev. B*. 2003. Vol. 68. P. 064114.
2. M. E. Povarnitsyn, N. E. Andreev, E. M. Apfelbaum, T. E. Itina, K. V. Khishchenko, O. F. Kostenko, P. R. Levashov, M. E. Veysman // *Appl. Surf. Sci.* 2012. Vol. 258. P. 9480.

**NUMERICAL SIMULATION
OF NANOPARTICLES FORMATION DURING
FEMTOSECOND LASER ABLATION
OF ALUMINUM**

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

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: Vladimir.Fokin@phystech.edu

Nanoparticles of different sizes and colloid mixtures of them are widely used in science and technology. Femtosecond laser ablation is an effective way to produce particles of different sizes. In order to generate the particles more effectively, it is necessary to understand the mechanisms underlying laser ablation.

We use a continuum-atomistic model based on approach [1] for simulation of laser ablation, in which molecular dynamics is used for description of the atomic subsystem while the electronic one is described by the energy conservation equation solving. The main advantage of the combined model in comparison with hydrodynamic approaches is the accurate representation of fragmentation of a metal both in solid and liquid phases on small time and space scales. In our model the laser radiation absorption is calculated according to the Helmholtz equation. For description of permittivity, electron thermal conductivity and electron-ion coupling we apply wide-range models [2] which makes it possible to simulate double and multiple laser pulses.

We investigate the structure of the ablation plume, the mechanisms of nanoparticles formation and the size distribution of them.

References

1. D. S. Ivanov, L. V. Zhigilei // *Phys. Rev. B*. 2003. Vol. 68. P. 064114.
2. M. E. Povarnitsyn, N. E. Andreev, E. M. Apfelbaum, T. E. Itina, K. V. Khishchenko, O. F. Kostenko, P. R. Levashov, M. E. Veysman // *Appl. Surf. Sci.* 2012. Vol. 258. P. 9480.

3-47

**ПОГЛОЩЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В КОРОНЕ МИШЕНЕЙ С ПРЯМЫМ
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ РОССИЙСКОЙ
УСТАНОВКИ МЕГАДЖОУЛЬНОГО КЛАССА**

И. А. Химич^{1,2}, В. А. Лыков¹

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

²СФТИ НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия
E-mail: ivanx89@mail.ru

В приближении геометрической оптики и с учетом рефракции лазерного излучения проведены расчеты распространения лазерного излучения в изотермической короне мишени со степенным законом распределения электронной плотности от радиуса. Поглощение лазерного излучения рассчитывалось по обратнo-тормозному механизму, в приближении лучевых трубок [1]. Рассматривалось коническое схождение пучка с фокальными соотношениями $f/D=8$. Профиль интенсивности в пучках задавался в виде Гауссова распределения на линзе. При этом расположение 48-ми кластеров пучков на мишенной камере мегаджоульной лазерной установки рассмотрено в двух вариантах. В первой конфигурации (6×8) кластеры располагаются вокруг направлений, проходящих через центры граней куба [2], а в конфигурации (8×6) оси симметрии проходят через вершины куба. Согласно проведенным расчетам величина оптимума по асимметрии и среднеквадратичному отклонению поглощенной энергии в короне мишени не зависит от фокального соотношения f/D . Выяснено, что увеличение коэффициента поглощения приводит к ухудшению однородности поглощенной энергии, при этом положение оптимума по фокусировке остается неизменным. Среднеквадратичное отклонение поглощенной лазерной энергии по телесному углу составило $\sigma E \approx 0,74\%$ для конфигурации 6×8 и $\sigma E \approx 0,54\%$ для конфигурации 8×6 с фокальным соотношением $f/D=8$ для профиля электронной концентрации $n_e \sim 1/r^2$. А для профиля электронной концентрации $n_e \sim 1/r^3$ $\sigma E \approx 0,53\%$ для конфигурации 6×8 и $\sigma E \approx 0,49\%$ для конфигурации 8×6 с фокальным соотношением $f/D = 8$. Разложение по сферическим гармоникам поглощенной энергии в короне мишени показало, что для конфигураций 6×8 и 8×6 ведущими являются гармоники с номерами 4 и 8.

Литература

1. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред // М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. лит. 1980.
2. Бельков С. А. и др. Термоядерные мишени прямого облучения лазерным импульсом мегаджоульного уровня // ЖЭТФ. 2015. Т. 148, № 4(10). С. 784–798.

**LASER RADIATION ABSORPTION
IN A CORONA OF DIRECT DRIVEN TARGETS
FOR RUSSIAN MEGAJOULE FACILITY**

I. A. Khimich^{1,2}, V. A. Lykov¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
²SPTI NRNU MEPhI, Snezhinsk, Russia

E-mail: ivanx89@mail.ru

In approach of geometrical optics with taking into account a refraction of laser radiation was calculated laser light propagation in isothermal corona with a power law distribution of electronic density from radius. Absorption of laser radiation was calculated on the inverse bremsstrahlung mechanism in laser tube approximation [1]. The conical convergence of a beam was considered with focal ratio $f/D = 8$. Intensity in beams was set in the form of Gaussian spatial profile on lens. Thus the relative position 48 clusters of beams on targets chamber for the megajoule laser facilities is viewed in two configurations. In the first configuration (6×8) clusters are located around the directions transiting through centers of facets of a cube [2], and in a configuration (8×6) symmetry axes transit through cube vertexes. According to calculations, value of optimum of asymmetry and root-mean-square deviation of the absorbed laser energy in corona is independent of a focal ratio f/D . It is found out, that increase of absorption coefficient leads to symmetry degradation of absorbed laser energy, but optimal focus position in this case has not changed. The root-mean-square deviation of the absorbed laser energy is $\sigma E \approx 0.74\%$ for configuration and $\sigma E \approx 0.54\%$ for configuration with focal parity $f/D = 8$ for electronic density profile $n_e \sim 1/r^2$. But for electronic density profile $n_e \sim 1/r^3$ root-mean-square deviation of the absorbed laser energy is $\sigma E \approx 0.53\%$ for configuration and $\sigma E \approx 0.49\%$ for configuration with focal parity $f/D = 8$. Decomposition on spherical harmonics absorbed laser energy has shown that for configuration and configuration harmonics with numbers 4 and 8 are leaders.

References

1. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред // М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. лит. 1980.
2. Bel'kov, S. A. et al. Thermonuclear targets for direct-drive ignition by a megajoule laser pulse. JETP, 2015. Vol. 121, Issue 4, pp. 686–698.

3-48

**ИСТОЧНИК ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ,
ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ В ШИРОКОМ
СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ**

О. В. Чефонов¹, А. В. Овчинников¹, М. Б. Агранат¹,
С. Vicario², С. Р. Hauri²

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

²Paul Scherrer Institute, SwissFEL, 5232 Villigen PSI,
Switzerland

E-mail: oleg.chefonov@gmail.com

Идеальный источник лазерного излучения для исследований в области нелинейной терагерцовой спектроскопии должен обладать большой универсальностью, и обеспечивать генерацию, как высокоинтенсивных сверхширокополосных импульсов длительностью в один период, так и импульсов умеренной интенсивности длительностью в несколько периодов с узкой спектральной полосой в терагерцовом диапазоне частот. В докладе мы представляем компактную схему универсального настольного перестраиваемого источника терагерцового излучения в широком спектральном диапазоне от 0,5 ТГц до 7 ТГц с шириной спектра от 30 ГГц до 5 ТГц. Схема основана на оптическом выпрямлении модулированного по времени и частоте фемтосекундного лазерного импульса в нелинейном органическом кристалле и позволяет получать терагерцовые импульсы с энергией до 900 мкДж в однопериодном режиме генерации с конверсионной эффективностью до 3% и напряженностью электрического поля в несколько десятков МВ/см. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 14.613.21.0056, RFMEFI61316X0056 и Швейцарского национального научного фонда, проект № IZLRZ2_164051.

**HIGH-ENERGY TERAHERTZ RADIATION
SOURCE TUNABLE IN A WIDE SPECTRAL
RANGE**

O. V. Chefonov¹, A. V. Ovchinnikov¹, M. B. Agranat¹,
С. Vicario², С. Р. Hauri²

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

²SwissFEL, Paul Scherrer Institute, 5232 Villigen-PSI,
Switzerland

E-mail: oleg.chefonov@gmail.com

The ideal laser source for investigation in the area of nonlinear terahertz spectroscopy should have a large versatility, and provide the generation of high-intensity ultra-wideband single-cycle pulses and moderate-intensity multi-cycle pulses with a narrow spectral band in the terahertz frequency range. In this work we present a compact

scheme of versatile table-top source of terahertz radiation tunable in a wide spectral range of 0.5-7 THz with a spectral bandwidth between 30 GHz and 5 THz. The scheme is based on optical rectification of a temporally modulated chirped femtosecond laser pulse in a nonlinear organic crystal and in a single-cycle mode produces ultrahigh-energy terahertz pulses up to 900 uJ at a conversion efficiency of 3% with a several tens of MV/cm field strength. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project no. 14.613.21.0056, RFMEFI61316X0056 and by Swiss National Science Foundation project no.: IZLRZ2_164051.

3-49

КАМЕРЫ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ВНИИА

Д. А. Андреев, В. Г. Андреев, А. В. Голиков,
А. К. Дулатов, Б. Д. Лемешко, Ю. В. Михайлов,
И. А. Прокуратов, А. Н. Селифанов, Т. С. Фатиев

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

E-mail: bogolubov@vniia.ru

Во ВНИИА разработаны камеры плазменного фокуса для использования в генераторах нейтронов с емкостными накопителями энергии. При пропускании через камеру тока в сотни килоампер происходит пинчевание на оси плазменного шнура (образование плазменного фокуса) и генерация нейтронов с энергией 2,5 МэВ при дейтериевом наполнении или 14,1 МэВ при дейтериево-третиевом наполнении. Камеры выпускаются в виде отпаянных приборов для проведения различных экспериментов.

Разработаны камеры на различные разрядные токи и соответственно разные выходы нейтронов в диапазоне 10^6 – 10^{12} нейтронов за импульс длительностью несколько десятков нс. Отпаянные камеры плазменного фокуса имеют в своем составе генератор газа на основе пористого титана, который поглощает рабочий газ в выключенном состоянии, а при включении выделяет газ в объем камеры. Наличие генератора газа существенно улучшило основные потребительские свойства камер – ресурс и срок сохраняемости. Ресурс камер увеличился с 50–100 до 500–1000 и более включений. Срок сохраняемости камер возрос с трех до 8–10 лет.

VNIIA PLASMA FOCUS CHAMBERS

D. A. Andreev, V. G. Andreev, A. V. Golikov,
A. K. Dulatov, B. D. Lemeshko, Yu. V. Mikhailov,
I. A. Prokuratov, A. N. Selifanov, T. S. Fatiev

N. L. Dukhov Research Institute for Automatics,
Moscow, Russia
E-mail: bogolubov@vniia.ru

VNIIA develops plasma focus chambers for neutron generators with capacity energy storage. By passing discharge current up to hundreds kiloamperes through the chamber, on the axis occurs plasma column compression (plasma focus formation) that generates neutrons with 2.5 MeV energy in case of deuterium filling or 14.1 MeV in case of deuterium-tritium filling. VNIIA plasma focus chambers are sealed-off devices.

Designed chambers provide different discharge currents and different neutron yields in the range 10^6 – 10^{12} neutrons per pulse and duration of several tens of nanoseconds. Sealed-off plasma focus chambers has a gas generator based on porous titan as a part of the chamber which absorbs working gas in switch-off mode and allocate gas in the chamber volume in switch-on mode. Gas generator significantly improves the main consumer properties: resource and shelf life. Chamber resource increased from 50–100 to 500–1000 shots. Shelf life increased from 3 to 8–10 years.

Секция 4

**СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ
ПРОЦЕССАХ**

Section 4

**PROPERTIES OF MATTER
AT HIGH-INTENSITY
PROCESSES**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ Cu-Cr-Zr СПЛАВОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДКУП**

И. В. Хомская¹, В. И. Зельдович¹,
Е. В. Шорохов², Н. Ю. Фролова¹, А. Э. Хейфец¹,
Д. Н. Абдуллина¹, А. А. Гранский², К. В. Гаан²

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

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

E-mail: abdullina@imp.uran.ru

Методами металлографического, электронно-микроскопического анализа и дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD) исследованы эволюция структуры и термическая стабильность электротехнических сплавов меди, легированных микродобавками хрома (0,09–0,20%) и циркония (0,08–0,20%), подвергнутых динамическому канално-угловому прессованию (ДКУП). Способ ДКУП, разработанный в РФЯЦ – ВНИИТФ (Патент РФ, 2006 г.), представляет собой высокоскоростной ($\sim 10^5$ с⁻¹) вариант квазистатического метода РКУП. Ранее установлено, что при ДКУП на образец действует высокоскоростная деформация сдвига и ударно-волновая деформация сжатия (равномерная и локализованная), что создает добавочный источник деформационного наклепа. Было показано, что при ДКУП формирование неравновесной субмикроструктурной (СМК) структуры в сплавах меди, происходит в результате высокоскоростных процессов фрагментации, динамической полигонизации и частичного деформационного старения. Исследовано влияние ДКУП и отжига на механические свойства и удельное электросопротивление сплавов. Показано, что измельчение структуры сплавов Cu-Cr-Zr на три порядка (от 200–300 мкм до 0,2–0,4 мкм), и повышение σ_B и $\sigma_{0,2}$ в 2,6 и 3,3 раз, при сохранении удовлетворительной пластичности может быть достигнуто уже при трех-четырех проходах ДКУП. Определено, что СМК сплавы меди, полученные методом ДКУП, обладают повышенной по сравнению с крупнокристаллическим состоянием способностью выдерживать контактные механические нагрузки без пластического деформирования. Установлено, что повышенный уровень механических свойств исследованных сплавов, по сравнению медью, связан с дополнительным деформационным упрочнением, обусловленным выделением наноразмерных частиц Cr и Cu₅Zr в процессе ДКУП и последующего старения. Показано, что СМК сплавы меди, термически устойчивы при нагреве до 500–600°C. Начало рекристаллизации деформированных сплавов задерживается вследствие закрепления дислокаций и субграниц наночастицами (1–5 нм)

Cu₅Zr. В результате замедляется процесс образования центров рекристаллизации, требующий перестройки дислокационной структуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Структура», № 01201463331) и при частичной поддержке УрО РАН (проект № 15-17-2-24).

**STUDY OF STRUCTURE, PHYSICAL
AND MECHANICAL PROPERTIES OF
SUBMICROCRYSTALLINE Cu-Cr-Zr ALLOYS,
OBTAINED BY METHOD OF DCAP**

I. V. Khomskaya¹, V. I. Zeldovich¹, E. V. Shorokhov²,
N. Yu. Frolova¹, A. E. Kheifets¹, D. N. Abdullina¹,
A. A. Granskii², K. V. Gaan²

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

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

E-mail: abdullina@imp.uran.ru

Methods of metallographic, electron microscopic analysis and diffraction of back-scattered electrons (EBSD) investigated the evolution of the structure and thermal stability of electrical copper alloys doped with chromium microaddings (0,09–0,20%) and zirconium (0,08–0,20%), subjected to dynamic channel-angular pressing (DCAP). DCAP method developed in VNIITF (RF Patent, 2006) is a high-speed ($\sim 10^5$ s⁻¹) version of the quasi-static method of equal-channel angular pressing (ECAP). Previously it has been found that when the specimen been subjected to DCAP is influenced by high-speed shear deformation and shock-wave compression deformation (uniform and localized), they create an additional source of strain hardening. It has been shown that the formation of non-equilibrium submicrocrystalline (SMC) structure in copper alloys by DCAP occurs as a result of high-speed processes of fragmentation, dynamic polygonization and partial strain aging. The effect of DCAP and annealing on mechanical properties and electrical resistivity of the alloys has been investigated. It has been shown that the Cu-Cr-Zr alloy structure refinement on the order of three (from 200–300 to 0,2–0,4 μ m), and raising σ_B and $\sigma_{0,2}$ by 2,6 and 3,3 times, while maintaining satisfactory ductility can be achieved even by three or four DCAP passes. It has been determined that the SMC copper alloys obtained by DCAP have increased ability to withstand mechanical contact loads without plastic deformation in comparison with coarse-grained structure of alloys. It has been found that the increased level of mechanical properties of the alloys (compared with copper) is conditioned with the additional strain hardening caused by the release of Cr and Cu₅Zr nanoparticles during DCAP and subsequent aging. It has been shown that SMC copper alloys are thermostable when heated up to 500–600°C. The recrystallization start in deformed alloys is delayed due to the fixing of dislocations and sub-boundaries by Cu₅Zr nanoparticles (1–5 nm). As a result, the formation

of recrystallization centers, requiring changes of the dislocation structure slows down.

This work was obtained within the state assignment of FASO of Russia (theme «Structure», No. 01201463331) and partially supported by Ural Division of RAS (project No 15-17-2-24).

4-2

**ДИНАМИКА ПОЛОСТИ
В РАСПЛАВЕ МЕТАЛЛА:
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ
И КОНТИНУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

А. В. Авдеева

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: awdeewaanya@yandex.ru

В настоящей работе проведена проверка применимости уравнения Рэлея–Плессета [1] для описания динамики сферической полости в расплаве металла с помощью метода молекулярной динамики. В качестве материала выбран алюминий. Исследованы случаи схлопывания, роста и переменного поведения (смена уменьшения радиуса его ростом) полости в расплавах, растягивающихся одноосно со скоростью 10^8 , 10^9 и 10^{10} 1/с при постоянной температуре $T = 1000, 1500, 2000, 2500$ К.

Молекулярно-динамическое моделирование проведено с использованием пакета LAMMPS [2] и потенциала межатомного взаимодействия [3]. Полости вырезались в образцах расплавов алюминия кубической формы, содержащих 4 000 000 и 878 8000 атомов, с помощью команды `delete_atoms`. Расплавы были получены путем плавления образцов металла на протяжении 10 пкс при постоянном давлении (использовался npt-ансамбль). Растяжение велось в рамках nvt-ансамбля.

Континуальное моделирование выполнялось методом Эйлера с временным шагом 0,001 пкс.

Показано, что уравнение Рэлея–Плессета отлично описывает процесс схлопывания полости при нулевом и отрицательном давлениях в окружающем расплаве. Получены хорошие соответствия континуального и молекулярно-динамического моделирований для случая роста полости, поэтому уравнение Рэлея–Плессета можно использовать при построении теоретических моделей процесса деформации и разрушения расплавов, вызванного сильноточным электронным или ультракоротким лазерным облучением. Континуальная модель оказалась не применимой для описания процесса переменного поведения полости при высокоскоростном растяжении расплава.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00538).

Литература

1. Plesset M. S. // *Ann. Rev. Fluid Mech.* – 1977. – V. 9. – P. 145–185.
2. Plimpton S. // *J. Comput. Phys.* – 1995. – V. 117. – P. 1–19.
3. Zhou X. W., Wadley H. N. G., Johnson R. A. et. al. // *Acta Mater.* – 2001. – V. 49. – P. 4005–4015.

**DYNAMICS OF A CAVITY IN A METAL MELT:
MOLECULAR DYNAMICS AND CONTINUUM
SIMULATIONS**

A. V. Avdeeva

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: awdeewaanya@yandex.ru

The check of applicability of the Rayleigh–Plesset equation [1] for the description of dynamics of a spherical cavity in a metal melt was performed in this work by using molecular dynamics (MD) simulation. The aluminum melt was choosen. Cases of pure collapse and pure growth of a cavity and a case when collapse of a cavity is replaced by its growth were investigated. Melt temperatures 1000, 1500, 2000 and 2500 K and strain rates 10^8 , 10^9 и 10^{10} 1/s were considered.

The program Lammmps [2] with the interatomic potential [3] for aluminum was used for the MD simulation. Cavities were cut in the cubic samples of aluminum melts that contains 4 000 000 and 878 8000 atoms, using the `delete_atoms` command. The melts were derived by melting of metal samples during 10 ps at constant pressure (used npt ensemble). Stretching was conducted under nvt ensemble.

Continuum simulation was carried out by the Euler method with a time step of 0.001 ps

It is shown that the Rayleigh–Plesset equation perfectly describes the process of the collapse of the cavity at zero and negative pressures in the surrounding melt. Good agreement of continuum and molecular dynamics simulations for the case of cavity growth was obtained. Therefore, the Rayleigh–Plesset equation can be used in theoretical models of a process of deformation and fracture of a melt caused by high-current electron or ultra-short laser irradiation.

The continuum approach is inapplicable when collapse of a cavity is replaced by its growth at ultra-high strain rate of the melt.

This work is supported by the Russian Science Foundation (Project No 14-11-00538).

References

1. Plesset M. S. // *Ann. Rev. Fluid Mech.* – 1977. – V. 9. – P. 145–185.
2. Plimpton S. // *J. Comput. Phys.* – 1995. – V. 117. – P. 1–19.
3. Zhou X. W., Wadley H. N. G., Johnson R. A. et. al. // *Acta Mater.* – 2001. – V. 49. – P. 4005–4015.

4-3

ИТЕРАТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТИ ОДИНОЧНОГО ОБЪЕКТА ИЗ PDV-СИГНАЛА

Н. Б. Аникин, А. В. Павленко

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

E-mail: dep5@vniitf.ru (для Аникина)

В работе представлен концептуально новый итеративный метод обработки PDV-сигнала, использующий свойство периодичности доплеровских гармоник. Метод обладает временным разрешением порядка доплеровского периода, слабо чувствителен к изменениям амплитуды доплеровской гармоники, к случайному шуму, высшим доплеровским гармоникам и «средней линии».

Каждый шаг итеративного процесса состоит из двух этапов, где используются два разных интегральных преобразования. Первое применяется к экспериментальному сигналу с целью выделить первую доплеровскую гармонику на фоне высших доплеровских гармоник, случайного шума и «средней линии». Второе преобразование применяется к квадратам первой доплеровской гармоники, полученной на первом этапе, и ее производной по приближенной фазе доплеровской гармоники. Полученные величины определяют следующее приближение фазы доплеровской гармоники.

После нескольких итераций вычисленная производная истинной фазы по фазе с предыдущей итерации отличалась от единицы меньше, чем на величину погрешности, что и являлось индикатором завершения процесса восстановления фазы. Оценка погрешности, вычисленная из экспериментального сигнала с использованием интегральных преобразований, зависит от отношения сигнал/шум, производной амплитуды сигнала, локальной доплеровской частоты, и даже для предельного временного разрешения может быть меньше одного процента.

Временное разрешение метода определялось с помощью критерия Релея, примененного к восстановленной фазе синтетического синусоидального сигнала с двумя разнесенными по времени разрывами фазы. Разрешение зависит в основном от параметров первого интегрального преобразования и достигает величины доплеровского периода.

Метод тестировался на примере двух экспериментальных PDV-сигналов, представляющих полный спектр возможных особенностей. Первый сигнал характеризовался большим количеством «перетяжек» («провалов» огибающей), а второй – значительной мощностью высших доплеровских гармоник. «Средняя линия» сигналов менялась в широком диапазоне величин. Были получены профили скоростей и оценки их погрешности для каждого экспериментально-

го сигнала. Ошибка первого профиля скорости не превышала $\pm 1,5\%$ для 2/3-ей всего интервала восстановления, но достигала $\pm 15\%$ в самой глубокой «перетяжке». Для второго сигнала эта погрешность не превышала $\pm 0,5\%$ во всем диапазоне восстановления.

ITERATIVE METHOD TO RECONSTRUCT VELOCITY OF A SINGLE OBJECT FROM PDV-SIGNAL

N. B. Anikin, A. V. Pavlenko

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

E-mail: dep5@vniitf.ru (for Anikin)

The paper presents a conceptually new iterative method of PDV-signal processing, which uses the periodicity property of Doppler harmonics. The method enables to reach temporal resolution in the vicinity of Doppler period for real-life PDV-signal. This method is low sensitive to variations of the Doppler harmonic amplitude, random noise, higher Doppler harmonics, and the base line, all of which are usual for experimental PDV-signals.

Each step of the iterative process involves two stages with using of two different integral transforms. The first one is applied to an experimental signal in an effort to single out the first Doppler harmonic against the background of higher Doppler harmonics, random noise, and the base line. The second transform is applied to the squared values of first Doppler harmonic obtained during the first stage, and its derivative with respect to the approximate Doppler harmonic phase. The resultant values determine the next approximation to the true Doppler harmonic phase.

After several iterations, the derivative of a true phase with respect to the phase calculated from the previous iteration differed from the unit by less than the error value. This was indicative of the phase reconstruction completion. The error found from the experimental signal using the integral transforms is determined by the signal-to-noise ratio, derivative of the signal amplitude, the local Doppler frequency, and it can be less than one percent even for the ultimate resolution.

Time resolution of the method was determined by the Rayleigh criterion applied to the reconstructed phase of an especially manufactured signal. The signal was sinusoidal in general, but its phase had two separated from each other discontinuities. Basically, this resolution depends on the first integral transform's parameters and attains the value of the Doppler period.

The method was tested as exemplified by two experimental PDV-signals representing a full spectrum of plausible features. The first signal was characterized by abundant «waists» («crevasses» of the envelope curve), and the second – by a great power of higher-order Doppler harmonics. The base line of the signals varied over a wide range of values. The velocity profiles and their errors were obtained for each experimental signal for the best resolving time (0.85 of Doppler period). The error in

the first profile was no more than $\pm 1.5\%$ for two-thirds of the entire reconstruction interval though it reached $\pm 15\%$ in the deepest «waist». For the second signal, this error was at least $\pm 0.5\%$ within the entire reconstruction range.

4-4

**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ
И УДАРНАЯ АДИАБАТА СРЕДЫ ИЗ
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАССТОЯНИИ
МОЛЕКУЛ**

Э. Р. Прууэл, В. Ф. Анисичкин

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

E-mail: pruel@hydro.nsc.ru, avf@hydro.nsc.ru

Методами молекулярной динамики установлена связь потенциальной составляющей давления и полного давления за фронтом ударной волны. На основе полученных результатов построено в общем виде уравнение состояния конденсированной среды. В качестве примеров, приведены результаты расчетов для железа и железа с легкими добавками, моделирующими состав ядра Земли.

**EQUATION OF STATE AND HUGONIOT
OF MATTER WITH DISTANCE INTERACTING
MOLECULES**

E. R. Prueel, V. F. Anisichkin

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: pruel@hydro.nsc.ru, avf@hydro.nsc.ru

By the method of molecular dynamics it was obtained connection for potential component of pressure and total shock wave pressure. On the basis of the results obtained it was built a general form of equation of state of condensed matter. As examples, the results of calculations for iron and iron with light additives, simulating the of the Earth's core composition, are adduced.

4-5

**РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИКИ
ОБЪЕМНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ПО РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ
С ВРЕМЕННЫМ И ПРОСТРАНСТВЕННЫМ
РАЗРЕШЕНИЕМ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ
ЛАЗЕРНОЙ НАГРУЗКЕ**

А. С. Аракчеев, В. М. Аульченко, А. В. Бурдаков,
А. А. Васильев, Л. Н. Вячеславов, О. В. Евдоков,
В. В. Жуланов, А. А. Касатов, А. В. Косов,
Б. П. Толочко, М. Р. Шарафутдинов, Л. И. Шехтман

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

E-mail: asarakcheev@gmail.com

В поверхностном слое вольфрама после импульсных тепловых нагрузок возникают остаточные напряжения. Эти напряжения приводят к образованию сети трещин на поверхности. Такой механизм разрушения потенциально опасен для первой стенки перспективного термоядерного реактора. Для тепловых нагрузок с характерными для этих импульсных тепловых нагрузок (плотность мощности ~ 1 ГВт/м², длительность ~ 1 мс) была сделана аналитическая модель расчета динамики деформации и напряжений [1]. В сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения для измерения этой динамики разрабатывается диагностика на основе измерения дифракции синхротронного излучения. Использование синхротронного излучения позволяет решить проблему измерения параметров материала, экранированного плазменным слоем. Кроме того, потенциально эта методика позволяет измерять деформацию внутри материала с пространственным и временным разрешением. Основным измеряемым эффектом является изменение угла рассеяния дифракционного пика из-за поворота кристаллической плоскости вследствие деформации. На данный момент продемонстрировано измерение средней по толщине материала деформации с временным разрешением 10 микросекунд [2]. Следующая задача – измерение динамики распределения деформации вдоль луча синхротронного излучения. Параметры эксперимента:

– образец: монокристалл вольфрама, толщина 250 мкм,

– облучение: Nd:YAG лазер, энергозапас 1 Дж, длительность ~ 100 мкс, диаметр пятна ~ 1 мм.

Литература

1. A. S. Arakcheev et al., Journal of Nuclear Materials, Volume 467, Part 1, December 2015, Pages 165–171.
2. A. S. Arakcheev et al., AIP Conference proceedings, Volume 1771, 060003 (2016).

**DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC
OF VOLUMETRIC DEFORMATION OF CRYSTAL
STRUCTURE BASED ON X-RAY DIFFRACTION
WITH TEMPORAL AND SPATIAL RESOLUTIONS
UNDER IMPACT OF PULSED LASER LOAD**

A. S. Arakcheev, V. M. Aulchenko, A. V. Burdakov,
A. A. Vasilyev, L. N. Vyacheslavov, O. V. Evdokov,
V. V. Zhulanov, A. A. Kasatov, A. V. Kosov,
B. P. Tolochko, M. R. Sharafutdinov, L. I. Shekhtman
Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk,
Russia
E-mail: asarakcheev@gmail.com

The residual stresses appear in surface layer of tungsten after pulsed heat loads. These stresses lead to formation of a network of cracks on the surface. This failure mechanism is potentially dangerous to the first wall of a fusion reactor. An analytical model for calculation of the dynamics of deformation and stresses was developed for the thermal loads with parameters typical for these loads (power density of ~ 1 GW/m², the duration of ~ 1 ms) [1]. A development of diagnostic based on the synchrotron radiation diffraction for the measurement of these dynamics is in progress in Siberian center of synchrotron and terahertz radiation. The use of synchrotron radiation allows us to solve the problem of measuring of the parameters of the material screened by plasma layer. Furthermore, this method potentially allows us to measure deformation within the material with spatial and temporal resolution. The main measured effect is the change of scattering angle of diffraction peak due to rotation of crystal plane caused by deformation. For now, the measurements of thickness average deformation with temporal resolution 10 microseconds was demonstrated [2]. The next challenge is dynamic measurement of the deformation distribution along the initial beam of synchrotron radiation. The parameters of the experiment:

- Sample: tungsten single crystal, thickness 250 μ m,
- Exposure: Nd:YAG laser, stored energy of 1 J, duration of ~ 100 ms, spot diameter ~ 1 mm.

References

1. A. S. Arakcheev et al., Journal of Nuclear Materials, Volume 467, Part 1, December 2015, Pages 165–171.
2. A. S. Arakcheev et al., AIP Conference proceedings, Volume 1771, 060003 (2016).

4-6

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ
СПЛАВА ВНЖК ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ ВК8
НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

С. А. Афанасьева, Н. Н. Белов, В. В. Буркин,
А. Н. Ищенко, К. С. Робаев,
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 кинетических ударников в металлические преграды является разработка высокоскоростных средств метания тел и использование новых нетрадиционных материалов с более совершенным комплексом физико-механических свойств. Одним из возможных путей повышения прочности пористых сплавов на основе ВНЖК является их легирование высокопрочными компонентами типа карбидов вольфрама. С этой целью методом высокотемпературного спекания получены образцы сплавов системы ВНЖК, легированные упрочняющими наполнителями – карбидом вольфрама с кобальтом ВК8. Испытания разрабатываемых образцов кинетических ударников на основе вольфрама производится на гладкоствольной баллистической установке калибром 30 мм с длиной ствола 500 см. Высокая скорость порядка 2–3 км/с и шадящий режим нагрузок на метаемое тело достигаются за счет применения технологии метания с присоединенным зарядом. При высокоскоростном ударе разработанные ударники более чем на 30% превосходят массогабаритные аналоги из традиционного сплава ВНЖ по глубине проникания в стальную преграду.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE
OF WNIFEC ALLOYING BY WC8 HARD ALLOY
ON PHYSICAL AND MECHANICAL
PROPERTIES**

S. A. Afanas'eva, N. N. Belov, V. V. Burkin,
A. N. Ishchenko, K. S. Rogaev,
A. N. Tabachenko, N. T. Yugov

Tomsk State University Research and Development Institute
of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk, Russia
E-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru

One of the basic ways to increase the kinetic impactors penetration capability in metal shields is the development of high-speed the bodies projectile means and the use of new and innovative materials with a more advanced set of physical and mechanical properties. One possible way of increasing the porous WNIFeC based alloys strength is their alloying by high strength

components of tungsten carbide type. For this purpose, WNiFeC alloys samples alloying by reinforcing fillers like as tungsten carbide with cobalt WC8 was obtained by the method of high-temperature sintering. Tests of developed kinetic impactors samples based on tungsten produce at smoothbore ballistic installation of 30 mm caliber with a barrel length of 500 cm. The high velocity of the order of 2–3 km/s and gentle load on the projectile body are achieved by applying projectile techniques with the traveling charge. During the high-speed collision the developed impactors have precedence of the mass-dimensional analogues of the traditional WNiFe alloy by steel shield penetration depth more than 30%.

4-7

**ОСОБЕННОСТИ УДАРНОГО
МЕТАМОРФИЗМА БАЗАЛЬТА И ДИАБАЗА,
ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ
СФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН**

Д. Д. Бадюков¹, Е. А. Козлов²

¹ГЕОХИ им. В. И. Вернадского РАН, Москва, Россия
²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: badyukov@geokhi.ru

В дополнение к [1–3], представлены постановки сферических взрывных экспериментов по сохранению с образцами базальта и диабазы и первые результаты микротомографических и петрографических исследований сохраненных образцов, отобранных из базальтовой лавы и даек диабазы позднего мезопротерозоя из окрестностей вулканов группы Ослер.

Литература

1. Е. А. Козлов, Ю. Н. Жугин, Б. В. Литвинов, Г. В. Коваленко, М. А. Назаров, Д. Д. Бадюков. Особенности физико-химических превращений хондрита «Саратов» в сферических ударных волнах. Доклады РАН, 1997, том. 353, № 2, стр. 183–186.
2. Е. А. Козлов, Л. В. Сазонова. Фазовые превращения энстатита в сферических ударных волнах. Петрология, 2012, том 20, № 4, с. 371–382. [Petrolology (Engl. transl.), 2012, Vol. 20, No. 4, pp. 336–346].
3. Е. А. Козлов, Л. В. Сазонова. Преобразования горных пород в сферических ударных волнах: Новые экспериментальные результаты. Петрология, 2012, том 20, № 4, стр. 334–350. [Petrolology (Engl. transl.), 2012, Vol. 20, No. 4, pp. 301–316].

**PECULIARITIES OF SHOCK METAMORPHISM
OF THE BASALT AND DIABASE SAMPLES
SUBJECTED TO SPHERICAL SHOCK WAVES**

D. D. Badjukov¹, E. A. Kozlov²

¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

E-mail: badyukov@geokhi.ru

Further to [1–3], the paper describes setups of spherical explosive recovery experiments with the basalt and diabase samples, as well as the first results of microtomographic and petrographic investigations of the recovered basaltic-lava samples and the recovered samples of the late Mesoproterozoic diabase dikes from the Osler group of volcanoes.

References

1. E. A. Kozlov, Y. N. Zhugin, B. V. Litvinov, G. V. Kovalenko, M. A. Nazarov, D. D. Badjukov. Features of physicochemical transformations of the Saratov chondrite at spherical shock waves. Dokladi Akademii Nauk, 1997, Vol. 353, No 2, pp.183–186 (in Russian).
2. E. A. Kozlov, L. V. Sazonova. Phase Transformations of Enstatite in Spherical Shock Waves. Petrology, 2012, Vol. 20, No. 4, pp. 336–346.
3. E. A. Kozlov, L. V. Sazonova. Rock Transformations in Spherically Converging Shock Waves: Newly Obtained Experimental Results. Petrology (Engl. transl.), 2012, Vol. 20, No. 4, pp. 301–316.

4-8

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЖИДКОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ
УДАРНО-ВОЛНОВОГО СЖАТИЯ
И РАСТЯЖЕНИЯ**

И. А. Банникова^{1,*}, А. Н. Зубарева², С. В. Уваров¹,
А. В. Уткин², О. Б. Наймарк¹

¹ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, Россия

²ФГБУН Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: *malgacheva@icmm.ru

Установленные степенного вида автомодельности пластических волновых фронтов в металлах [1] и наличие близких асимптотик вязкости для твердых тел и жидкостей [2] ($10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$) для скоростей деформации $\dot{\epsilon}^* = 10^5 \text{ с}^{-1}$, что соответствует временам релаксации, отличающихся на 6 порядков от диффузионных времен релаксации, послужило стимулом для проведения экспериментальных исследований релаксационных свойств и разрушения жидкостей в условиях

сжатия и растяжения, результаты которых представлены в настоящей работе.

Для инициирования импульсной волны сжатия использовались два метода: с применением электро-взрыва проводника [3] и взрывного генератора [4]. Для непрерывной регистрации профилей скорости свободной поверхности жидкостей использовалась система VISAR [4].

Установлены автомодельности формирования волновых фронтов в жидкостях (вода, глицерин, силиконовое масло и додекан), соответствующие степенным зависимостям скорости деформации от амплитуды импульса сжатия ($\dot{\epsilon}^* = 10^5 \div 10^7 \text{ c}^{-1}$). Оценка сдвиговой вязкости жидкостей показала, что жидкости проявляют псевдопластический характер течения на фронте волны сжатия. Установлено, что откольная прочность полярных жидкостей, в отличие от неполярных, имеет степенную зависимость разрушающего напряжения от скорости деформации ($\dot{\epsilon} = 10^4 \div 10^5 \text{ c}^{-1}$).

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 16-31-00283 мол_a.

Литература

1. Swegle J. W., Grady D. E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // *J. Appl. Phys.* – 1985. – V. 58. – N. 2. – P. 692–701.
2. Минеев В. Н., Зайдель Р. М. Вязкость воды и ртути при ударном нагружении // *ЖЭТФ.* – 1968. – Т. 54. № 6. – С. 1634–1639.
3. Банникова И. А., Уваров С. В., Баяндин Ю. В., Наймарк О. Б. Экспериментальное исследование неньютоновских свойств воды в условиях электровзрывного нагружения // *Письма в ЖТФ.* – 2014 – Т. 40, № 17. – С. 87–93.
4. Банникова И. А., Зубарева А. Н., Уткин А. В., Уваров С. В., Наймарк О. Б. Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушения жидкостей при интенсивных воздействиях // *Физическая мезомеханика.* – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 69–77.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LIQUIDS UNDER SHOCK-WAVE COMPRESSION AND TENSION

I. A. Bannikova^{1, a}, A. N. Zubareva², S. V. Uvarov¹,
A. V. Utkin², O. B. Naimark¹

¹Institute of continuous Media Mechanics of Russian Academy of Science Ural Branch, Perm, Russia

²Institute of Problem of Chemical Physics of Russian Academy of Science, Chernogolovka, Russia

E-mail: amalgacheva@icmm.ru

The manifestation of power law self-similarity of plastic wave fronts in metals [1] and the existence of close viscosity asymptotics (10^4 P) for solids and liquids [2] at the strain rates $\dot{\epsilon}^* = 10^5 \text{ s}^{-1}$, corresponding to the relaxation times, which differ by 6 orders of magnitude from the diffusion relaxation times, have become the strong motives for beginning our experimental study of the re-

laxation properties and destruction of liquids under compression and tension.

In this work, two methods were proposed for initiation of impulse wave compression: one is based on the electric explosion of the conductor [3] and the other uses an explosive generator [4]. During the experiments, continuous recording of the velocity profiles of the free liquid surface was carried out using the VISAR system [4].

The investigation revealed self-similarities of the wave front formation in liquids (water, glycerol, silicone oil and dodecane), which corresponded to the power law relationships between the strain rate and pulse compression amplitude ($\dot{\epsilon}^* = 10^5 \div 10^7 \text{ c}^{-1}$). The estimation of shear viscosities of liquids allowed us to establish a pseudoplastic nature of the liquid flow at the compression wave front. It was found out that unlike non-polar liquids the spall strength of polar liquids demonstrates a power law dependence of the fracture stress on the strain rate ($\dot{\epsilon} = 10^4 \div 10^5 \text{ c}^{-1}$).

This work was supported by the RFBR project N. 16-31-00283 mol_a.

References

1. Swegle J. W., Grady D. E. // *J. Appl. Phys.* – 1985. – V. 58. – N. 2. – P. 692–701.
2. Mineev V. N., Zaidel' R. M. // *JETP.* – 1968. – V. 54. – N. 6. – С. 1634–1639. In Russian.
3. Bannikova I., Uvarov S., Bayandin Yu., Naimark O. // *Tech. Phys. Lett.* – 2014. – V. 40. – N. 9. – P. 766–768.
4. Bannikova I. A., Zubareva A. N., Utkin A. V., Uvarov S. V., Naimark O. B. // *Phys. Mesomech. [Phizicheskaya mezomekhanika].* – 2016. – V. 16. – N. 3. – P. 69–77. In Russian.

4-9

ЛАЗЕРНЫЙ ОПТОГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СКОРОСТИ И КООРДИНАТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ, МЕТАЕМЫХ ВЗРЫВОМ ВВ

В. К. Баранов, С. А. Бельков, С. Г. Гаранин,
А. Г. Голубинский, Д. А. Ириничев, Г. Г. Кочемасов

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

E-mail: vbar@inbox.ru

Расчетно-теоретически показана и экспериментально продемонстрирована возможность создания лазерного оптогетеродинного интерферометра, способного одновременно и непрерывно во времени определять скорости и координаты перемещений нескольких объектов, попавших в область луча зондирования.

Методом численного моделирования показана способность одновременного определения новым методом скорости и координат перемещения быстро метаемой пластины и летящего перед ней мелкодисперсного облака пыли.

Приведено сравнение результатов эксперимента при одновременной регистрации оптогетеродинамическим интерферометром и методом PDV скорости и координат перемещения поверхности цилиндрической оболочки, метаемой взрывом исследуемого ВВ. Показано хорошее совпадение полученных результатов в пределах погрешности измерений, равной ~1%.

LASER HETERODYNE INTERFEROMETER FOR MEASURING VELOCITY AND LOCATION SOME OBJECTS THROWN BY EXPLOSIVE

V. K. Baranov, S. A. Belkov, S. G. Garanin,
A. G. Golubinsky, D. A. Irinichev, G. G. Kochemasov

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

Theoretical and experimental possibility have been demonstrated to create laser heterodyne interferometer with simultaneous and permanent measuring velocity and location some objects in the field of lasers.

Numerical simulation has showed velocity and location measuring of the fast moving plane with dispersed duster.

Comparison of the experimental results of compressing cylinder with PDV measuring and location by the proposed method have been showed. The comparison has revealed a good coincidence of the integral of the velocity and location of the cylinder with uncertainty 1%.

4-10

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Ю. В. Баяндин, Н. В. Савельева, И. А. Банникова,
С. В. Уваров, О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,
Россия
E-mail: buv@icmm.ru

Экспериментальные исследования по ударно-волновому нагружению конденсированных сред [1–3] на основе доплеровской интерферометрии позволили установить автомодельные закономерности формирования упругопластических фронтов, выраженных степенным законом четвертого порядка между скоростью деформации и амплитудой ударной волны. Результаты были получены для широкого класса материалов [3–4], таких как металлы, сплавы, стекла, керамики. В работе [5] исследовались аномальные свойства вязкости для жидкостей при ударном нагружении. В настоящее время получены обширные данные по изучению автомодельных закономерностей формирования волновых фронтов в конденсированных средах.

В настоящей работе экспериментально и теоретически исследуются металлы, керамики и жидкости под действием ударно-волнового нагружения. На основе разработанной физико-математической модели среды с мезоскопическими дефектами исследованы закономерности формирования волновых фронтов и разрушения в металлах и керамиках. Разработанная статистическая модель дефектов позволила сформулировать феноменологическую модель среды с дефектами (микротрещины и микросдвиги) в терминах двух независимых переменных – тензора плотности дефектов и структурного параметра скейлинга. Был предложен оригинальный подход, основанный на разработанных широкодиапазонных определяющих соотношениях среды для численного моделирования многомасштабных механизмов повреждения и распространения ударных волн в диапазоне скоростей деформации 10^3 – 10^8 с⁻¹. Было показано, что механизмы пластической релаксации и разрушения связаны с многомасштабной кинетикой коллективных мод мезодефектов с автомодельным характером распространения уединенных волн и, как следствие, развитием диссипативных структур.

Получены зависимости скорости деформации от амплитуды ударной волны для металлов (алюминий, железо, ванадий), керамик (карбид кремния), жидкостей (вода, глицерин, трансформаторное масло), выраженных степенным законом с показателем степени β . Для ряда металлов и керамик показатель степени β был получен равным 4, что согласуется с известными экспериментальными данными [1–3]. Численное моделирование ударно-волновых фронтов в ванадии подтвердило отклонение показателя степени, установленного в [3, 6]. Для неньютоновских жидкостей также были получены степенные законы с меньшим значением показателя β , что может быть связано с их «квазипластическим» поведением.

Литература

1. Barker L. M. Behavior of dense media under high dynamic pressures. – New York: Gordon and Breach, 1968. – 482 p.
2. Swegle J. W. and Grady D. E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // J. Appl. Phys. – 1985. – V. 58. – P. 692-701.
3. Grady D. E. Structured shock waves and the fourth-power law // J. Appl. Phys. – 2010. – V. 107. – P. 013506.
4. Kanel G. I., Razorenov S. V., Fortov V. E. Shock-wave phenomena and the properties of condensed matter, in High-Pressure Shock Compression of Condensed Matter, edited by Lee Davison, Ya. Horie. – New York: Springer, 2004. – 325 p.
5. Минеев В. Н., Зайдель Р. М. Вязкость воды и ртути при ударном нагружении // ЖЭТФ. – 1968. – Т. 54, № 6. – С. 1634–1639.
6. Chhabildas L. C. and Hills C. R., in Metallurgical applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena, edited by L. E. Murr, K. P. Staudhammer, M. A. Meyers. – Marcel Dekker, Inc. – 1986. – 763 p.

SELF-SIMILAR NATURE OF SHOCK WAVE FRONTS IN CONDENSED MATTER

Yu. V. Bayandin, N. V. Saveleva, I. A. Bannikova,
S. V. Uvarov, O. B. Naimark

Institute of continuous media mechanics UB RAS,
Perm, Russia

E-mail: buv@icmm.ru

Experimental study on shock-wave loading in condensed matter [1–3] on the basis of Doppler interferometry allowed the establishing of self-similar regularities of elastic-plastic front propagation, expressed by a four-power law between the strain rate and the shock wave amplitude. The results have been obtained for a wide range of materials [3–4], such as metals, alloys, glasses and ceramics. In paper [5] the anomalous properties of viscosity for liquids under shock wave loading were investigated. There is now extensive evidence for the study of self-similar regularities of shock wave fronts in condensed matter.

In the present study the experimental and theoretical investigation was performed for metals, ceramics and liquid under shock-wave loading. On the basis of the developed physical-mathematical model of media with a mesoscopic defects the shock wave front formation and spallation in metals and ceramics were considered. The developed statistical model of defects allowed the formulation of phenomenological model of media with defects (microcracks and microshears) in terms of two independent variables – the defect density tensor and structural scaling parameter. Original approach based on the wide range constitutive equations was proposed for the numerical simulation of multiscale damage-failure transition mechanisms and shock wave propagation in solids with defects in the range of strain rate 10^3 – 10^8 s⁻¹. It was shown that mechanisms of plastic relaxation and damage-failure transitions are linked to multiscale kinetics of mesodefects collective modes with the self-similar nature of solitary waves and blow-up dissipative structures consequently.

The dependence between the strain rate and the shock wave amplitude for metals (aluminum, iron, vanadium), ceramics (silicon carbide), liquids (water, glycerin, transformer oil) expressed by a four-power law with an exponent β . For several metals and ceramics the exponent β was obtained equal to 4, what is consistent with known experimental data [1–3]. Numerical simulation of shock wave fronts propagation in vanadium confirmed the deviation of the exponent β specified in [3, 6]. For non-Newtonian liquids it was also obtained that power laws become with a smaller value of the exponent β , associating with «quasiplastic» behavior of liquids.

References

1. Barker L. M. Behavior of dense media under high dynamic pressures. – New York: Gordon and Breach, 1968. – 482 p.
2. Swegle J. W. and Grady D. E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // *J. Appl. Phys.* – 1985. – V. 58. – P. 692–701.

3. Grady D. E. Structured shock waves and the fourth-power law // *J. Appl. Phys.* – 2010. – V. 107. – P. 013506.
4. Kanel G. I., Razorenov S. V., Fortov V. E. Shock-wave phenomena and the properties of condensed matter, in *High-Pressure Shock Compression of Condensed Matter*, edited by Lee Davison, Ya. Horie. – New York: Springer, 2004. – 325 p.
5. Mineev V. N., Zaidel' R. M. The viscosity of water and mercury under shock loading // *JETP*, 1968. – V. 27, № 6. – P. 874–878.
6. Chhabildas L. C. and Hills C. R., in *Metallurgical applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena*, edited by L. E. Murr, K. P. Staudhammer, M. A. Meyers. – Marcel Dekker, Inc. – 1986. – 763 p.

4-11

МОДЕЛИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ, ДВОЙНИКОВАНИЯ И МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

И. Н. Бородин^{1,2,3}, А. Е. Майер², С. А. Атрошенко¹

¹Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург, Россия

²Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

³Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: elbor7@gmail.com

Структурные модели дислокационной пластичности [1, 2] позволяют описывать релаксацию напряжений в металлах при прохождении по материалу слабых (амплитудой до нескольких ГПа) и сильных (до сотен ГПа) ударных волн. В большинстве случаев они дают более точное приближение к реальности, чем гидродинамические коды и могут быть включены в реологические модели материала через физическую интерпретацию таких параметров, как характерное время релаксации [3]. Важным преимуществом этого класса моделей является возможность естественным образом учесть кинетический фактор изменения структуры материала в процессе динамической деформации и оценить его влияние на механику распространения ударных волн.

В докладе представлено дальнейшее развитие дислокационных моделей пластичности для описания нескольких параллельно действующих механизмов деформации, в частности механического двойникования [4] и мартенситных превращений в сталях. Обсуждается роль каждого из этих механизмов пластичности и особенности применения развиваемых подходов для моделирования структурных преобразований, происходящих под действием сильных ударных волн.

Работа была поддержана грантом РФФИ (проект № 16-31-60051) и грантами Президента для

молодых российских ученых МК-4649.2016.1 и МД-7481.2016.1.

Литература

1. V. S. Krasnikov, A. E. Mayer, A. P. Yalovets. Dislocation based high-rate plasticity model and its application to plate-impact and ultra-short electron irradiation simulations // Int. J. Plast. 27 (2011) 1294.
2. A. E. Mayer, K. V. Khishchenko, P. R. Levashov, P. N. Mayer. Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading. J. Appl. Phys. 113 (2013) 193508.
3. N. S. Selyutina, E. N. Borodin, Y. Petrov, A.E. Mayer. The definition of characteristic times of plastic relaxation by dislocation slip and grain boundary sliding in copper and nickel // Int. J. Plast. 82 (2016) 97.
4. E. N. Borodin, A. E. Mayer. Structural model of mechanical twinning and its application for modeling of the severe plastic deformation of copper rods in Taylor impact tests // Int. J. Plast. 74 (2015) 141.

MODEL FOR DISLOCATION PLASTICITY, MECHANICAL TWINNING AND MARTENSITIC TRANSFORMATIONS FOR SIMULATION OF THE DEFECT STRUCTURE EVOLUTION IN METALS SUBJECTED TO INTENSE DYNAMIC LOADINGS

E. N. Borodin^{1,2,3}, A. E. Mayer², S. A. Atroshenko¹

¹Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, St. Petersburg, Russia

²Chelyabinsky State University, Chelyabinsk, Russia

³Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

E-mail: elbor7@gmail.com

Structural models for dislocation plasticity [1, 2] allow us to describe the stress relaxation in metals during the propagation through material of weak (with amplitude up to several GPa) and strong (up to hundreds of GPa) shock waves. In most cases, they provide a more accurate approximation than hydrodynamical codes and can be included in the rheological models of materials through physical interpretation of its parameters, such as the characteristic relaxation time [3]. The ability to take into account the kinetic factor, namely, the structural changes in material during the dynamic deformation process, and to assess its impact on the shock wave propagation mechanics is an important advantage of this class of models.

The paper provides further development of the dislocation plasticity models for several deformation mechanisms such as mechanical twinning [4] and martensitic transformations in steels. The role of each of these mechanisms of plasticity is discussed. Moreover, we discuss the features of the presented approaches application for the simulation of structural changes occurring under the influence of strong shock waves.

The study was supported by the grants from the Russian Foundation for Basic Research (project 16-31-60051) and the President of the Russian Federation (projects No. МК-4649.2016.1 and MD-7481.2016.1).

References

1. V. S. Krasnikov, A. E. Mayer, A. P. Yalovets. Dislocation based high-rate plasticity model and its application to plate-impact and ultra-short electron irradiation simulations // Int. J. Plast. 27 (2011) 1294.
2. A. E. Mayer, K. V. Khishchenko, P. R. Levashov, P. N. Mayer. Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading. J. Appl. Phys. 113 (2013) 193508.
3. N. S. Selyutina, E. N. Borodin, Y. Petrov, A.E. Mayer. The definition of characteristic times of plastic relaxation by dislocation slip and grain boundary sliding in copper and nickel // Int. J. Plast. 82 (2016) 97.
4. E. N. Borodin, A. E. Mayer. Structural model of mechanical twinning and its application for modeling of the severe plastic deformation of copper rods in Taylor impact tests // Int. J. Plast. 74 (2015) 141.

4-12

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В Al-Mg ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СКОЛЬЗЯЩИМИ ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ

И. Г. Бродова¹, Е. Б. Смирнов², И. Г. Ширинкина¹,
В. В. Астафьев¹, Т. И. Яблонских¹,
А. В. Коваль², А. А. Дегтярев²

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

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

E-mail: brodova@imp.uran.ru

Изучены процессы эволюции деформационных структур в сплаве АМГ6 при нескольких режимах нагружения, обеспечивающих разную степень сжатия цилиндрических оболочек с толщиной стенки 2 мм. Определены режимы нагружения, при которых наблюдаются начальная стадия схлопывания оболочки, ее полное сжатие, а также промежуточный режим, обеспечивающий образование кольцевого откола. Методами металлографии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии выявлена взаимосвязь структурных превращений с исходным состоянием и геометрией нагружения материала. В частности, показано, что под действием ударной волны и последующей высокоскоростной деформации при инерционном сжатии оболочек образуется множество дефектов в виде пор и микротрещин, при этом форма зерен меняется незначительно относительно исходного отожженного состояния. При слабом режиме нагружения наблюдалась только начальная стадия сжатия оболочки, тем не менее, происходит деформационное упрочнение матрицы сплава, формируется ячеистая субструктура, растет плотность дислокаций. Относительная деформация оболочки составляет 17–25%, а твердость повышается на 200 МПа.

При более интенсивном режиме нагружения в оболочке образовался кольцевой откол, а в центре оболочки формируются фрагменты неправильной формы и разного размера. При интенсивном режиме нагружения сохраняется бимодальная рекристаллизованная структура, наряду с этим, встречаются области локализованной деформации с вихревой структурой. В некоторых фрагментах наблюдается литая структура, что свидетельствует о повышении температуры выше 650°C. Анализ результатов измерения твердости материала, подвергнутого интенсивному режиму нагружения, подтвердил предположение о том, что формирование структурного состояния оболочек из сплава АМГ6 происходит путем конкуренции двух процессов – дислокационного упрочнения при высокоскоростной деформации и разупрочнения за счет разогрева оболочки при ее схлопывании.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» №0120146333.

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN Al-Mg CYLINDRICAL SHELLS UNDER LOADING BY SLIDING DETONATION WAVES

I. G. Brodova¹, E. B. Smirnov², I. G. Shirinkina¹,
V. V. Astafiev¹, T. I. Yablonskikh¹,
A. V. Koval², A. A. Degtyarev²

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

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

E-mail: brodova@imp.uran.ru

The processes of the evolution of deformation structure in AMG 6 alloy at several loading modes provided varying degrees of convergence of cylindrical shells with a wall thickness of 2 mm were studied. The loading conditions under which observed the initial stage of the collapse of the shell, its complete convergence, as well as an intermediate mode that allows the formation of the circular spall were defined. The relationship of structural transformations with the initial state and the geometry of the loading material were determined using the method of metallography, scanning and transmission electron microscopy. In particular it is shown that under the action of the shock wave and the subsequent high strain rate at the inertia convergence of the shells, many defects as pores and micro cracks are formed. Nevertheless shape of grains changes slightly relative to the starting annealed condition. At weak mode of loading the shell has only the initial stage of convergence. Despite that the structure of the shells are similar before and under loading, the work hardening of alloy matrix, the formation of the cellular substructure and the increasing in the density of dislocations occurs. Relative deformation of this shell is 17–25% and the hardness increases by 200 MPa. At more intensive mode of loading, the shell has circular spall and the central part consists of fragments having irregular shapes and different sizes. With increasing intensity of loading

the recrystallized bimodal structure conserves, along with this localized deformation bands with vortex structure occur.

In some fragments the cast structure observes indicating that the temperature rises above 650°C. Analysis of the results of hardness measurement of shell subjected to an intensive mode of loading confirmed the assumption that the formation of the structural state of the shells of AMG6 alloy occurs by competition between two processes – the dislocation hardening at high strain rate and the softening due to heating of the shell during collapse.

The work was performed in the framework of State Task №0120146333 (Struktura).

4-13

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПОРИСТОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

А. Е. Бузюркин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

E-mail: buzjura@itam.nsc.ru

Компактирование керамических порошков с использованием динамических процессов широко изучалось с точки зрения изготовления керамик с уникальными свойствами и микроструктурами. В этих исследованиях были изучены эффекты влияния давления и температуры на свойства спекаемых керамик. В то же время, существует ограниченное количество работ, в которых исследуются процессы динамического уплотнения керамики в количественном выражении, а также исследуются физические процессы, связанные с затеканием пор. Кроме того, отсутствует понимание влияния скорости нагружения на процесс компактирования керамических порошков.

При построении модели динамического компактирования пористого материала необходимо учитывать три основных элемента: уравнение состояния (УРС) для описания зависимости давление – плотность, включающее в себя нелинейные эффекты уплотнения; поверхность текучести, описывающей зависимость прочности неповрежденного и разрушенного материала, зависящей от давления, и модель разрушения, описывающая переход материала из неповрежденного в разрушенное состояние. Изменение величины пористости описывается соотношениями Кэрролла-Холта [1]. Для замыкания системы используется малопараметрическое уравнение состояния [2], которое позволяет провести расчеты ударно-волновых процессов с минимальным числом физических параметров в качестве начальных данных. Напряженное состояние материала представлено в форме Джонсона-Холмквиста [3]. Степень разрушения материала

предполагается накапливать путем увеличения пластической деформации керамики на величину изменения пластической деформации, используя выражение, аналогичное модели разрушения Джонсона-Кука [4].

Литература

1. Carroll M. M., Holt A. C. Static and Dynamic Pore–Collapse Relations for Ductile Porous Materials // *J. Appl. Phys.* 1972. Vol. 43, № 4. P. 1626–1636.
2. Kraus E. I., Shabalin I. I. A few-parameter equation of state of the condensed matter // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. Vol. 774. P. 12009.
3. Johnson G.R., Holmquist T.J. An improved computational constitutive model for brittle materials // *AIP Conf. Proc.* 1994. Vol. 309, № 1. P. 981–984.
4. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // *Eng. Fract. Mech.* 1985. Vol. 21, № 1. P. 31–48.

THE COMPUTATIONAL MODEL OF POROUS CERAMIC MATERIAL

A. E. Buzyurkin

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

E-mail: buzjura@itam.nsc.ru

Compaction of ceramic powders using dynamic processes has been widely studied in terms of the manufacture of ceramics with unique properties and microstructures. These studies have investigated the influence of pressure and temperature effects on the properties of sintered ceramics. At the same time, there are a limited number of works, which are exploring the processes of dynamic consolidation of ceramics in quantitative terms, as well as investigates the physical processes associated with long flowing. In addition, there is no understanding of the influence of the loading rate on the process of compacting ceramic powders.

When constructing a model of the dynamic compaction of the porous material should take into account three key elements: the equation of state (EOS) to describe the dependence of the pressure – density, including a non-linear effects of sealing; yield surface, which describes the dependence of the strength of intact and damaged material, depending on the pressure and the fracture model, which describes the transition of the material from the intact in the ruined state. The change in porosity is described relations Carroll-Holt [1]. To close the system uses small number of parameters equation of state [2], which allows you to make calculations of shock-wave processes with a minimal number of physical parameters as initial data. The stress state of the material presented in the form of Johnson-Holmquist [3]. The extent of the destruction of the material is expected to accumulate by increasing the plastic deformation of ceramics by the movement of the plastic deformation, using an expression similar to the model of destruction of Johnson-Cook [4].

References

1. Carroll M. M., Holt A. C. Static and Dynamic Pore–Collapse Relations for Ductile Porous Materials // *J. Appl. Phys.* 1972. Vol. 43, № 4. P. 1626–1636.
2. Kraus E. I., Shabalin I. I. A few-parameter equation of state of the condensed matter // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. Vol. 774. P. 12009.
3. Johnson G. R., Holmquist T. J. An improved computational constitutive model for brittle materials // *AIP Conf. Proc.* 1994. Vol. 309, № 1. P. 981–984.
4. Johnson G. R., Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // *Eng. Fract. Mech.* 1985. Vol. 21, № 1. P. 31–48.

4-14

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИМ СТЕНДОМ КОМПЛЕКСА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

Р. В. Валекжанин, О. В. Белов,
Д. В. Кустов, Т. В. Шаров

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

E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

Одним из инструментов исследования уравнений состояния вещества динамическим методом является источник рентгеновского излучения. С целью повышения выходных параметров источника рентгеновского излучения в РФЯЦ – ВНИИЭФ был разработан мобильный рентгенографический стенд на основе БИМ-1500 [1].

В данной работе рассмотрена автоматизированная система управления мобильным рентгенографическим стендом МЦУ БИМ 1500, состоящая из шести контуров управления высоковольтным генератором, подсистемы синхронизации и подсистемы блокировок.

В связи с особенностями объекта управления (высокий уровень электромагнитных помех, удаленность пульта управления от объекта управления) устройства связи с объектом приближены к объекту управления и выполнены в виде совокупности, объединенных в сеть, гальванически изолированных блоков управления.

Управляющая программа обеспечивает проведение эксперимента в автоматизированном режиме в соответствии с предварительно заданными настройками.

Авторы выражают благодарность В. М. Зайцеву, Ю. П. Куропаткину и О. А. Шамро.

Литература

1. Пат. 2548585 С1 RU МПК G03В 42/02. Мобильный радиографический комплекс и источник излучения бетатронного типа для радиографического комплекса / Д. И. Зен-

ков, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, В. Д. Селемир, О. А. Шамро. Заявлено 09.04.2014 Опул. 20.04.2015. Бюл. № 11.

CONTROL SYSTEM OF MOBILE RADIOGRAPHIC COMPLEX TO STUDY EQUATIONS OF STATE OF SUBSTANCES

O. V. Belov, R. V. Valekzhanin, D. V. Kustov,
O. A. Shamro, T. V. Sharov

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

E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

A source of x-ray radiation is one of the tools to study equations of state of substances in dynamics. The mobile radiographic bench based on BIM-1500 [1] was developed in RFNC – VNIIEF to increase output parameters of the x-ray radiation source.

This paper considers automated control system of the mobile radiographic bench MCA BIM 1500. It consists of six high-voltage generator control circuits, synchronization subsystem, and block subsystem.

The object of control has some peculiarities: high level of electromagnetic noise, remoteness of the control panel from the object of control. In connection with this, the coupling devices are arranged closer to the object of control and performed in the form of a set of galvanically insulated control units, which are combined into a net.

The control software provides performance of the experiment in automatic regime in accordance with preset settings.

The authors are thankful to V. M. Zaitsev and Yu. P. Kuropatkin.

References

1. Zenkov D. I., Kuropatkin Yu. P., Nizhegorodtsev V. I., Selemir V. D. and Shamro O. A. Patent 2548585 C1 RU MPK G03B 42/02. Mobile radiographic complex and betatron type radiation source for radiographic complex, 11 (2015).

4-15

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Т. Л. Вихорнова, А. Н. Осавчук

Федеральный Центр Двойных Технологий «Союз» (ФЦДТ «Союз»), Дзержинский, Московская область, Россия

E-mail: fcdt@monnet.ru

В процессе эксплуатации конструкций, содержащих наполненные полимерные материалы (НПМ), могут возникать аварийные ситуации, во время ко-

торых конструкция подвергается динамическому нагружению, характеризующемуся высокой амплитудой при короткой длительности воздействия. Для определения напряженно-деформированного состояния таких конструкций от подобного воздействия необходимо учитывать вязкоупругий характер поведения НПМ в диапазоне времен (10^{-4} –1) с. В численных программных комплексах (ABAQUS, LS-DYNA, NX Advancer) заложены различные модели вязкоупругого поведения, в том числе в виде коэффициентов ряда Прони.

В докладе представлены результаты идентификации параметров ряда Прони из экспериментов по ударному нагружению цилиндрических образцов нескольких НПМ падающим грузом. Условия проведения всех экспериментов были идентичными: груз массой 25 кг сбрасывался с высоты 0,5 м на образцы при температуре 20°C. В процессе соударения с пьезодатчика, установленного на верхнем торце ударника (груза), регистрировались кривые перегрузок, последующим последовательным интегрированием которых определялись временные зависимости изменения скоростей и перемещений ударника во время соударения. Идентификация параметров ядра сдвиговой релаксации в виде коэффициентов ряда Прони, характеризующих вязкоупругое поведение НПМ, проводилась с использованием генетического алгоритма путем минимизации отклонения теоретического прогноза скорости ударника от экспериментальной кривой скорости.

В рамках данной работы были определены параметры модели механического поведения НПМ в виде, позволяющем применять их в численных программных комплексах при прочностных расчетах различных конструкций, содержащих НПМ. С использованием полученных наборов вязкоупругих параметров рассчитаны модули упругости и комплексные модули рассматриваемых материалов в миллисекундном диапазоне времен, характерном для ударных нагрузок, возникающих при аварийных ситуациях. Проведен сравнительный анализ механического поведения различных НПМ под действием ударного нагружения.

STUDY OF FILLED POLYMERIC MATERIALS MECHANICAL BEHAVIOR AT IMPACT LOADING

T. L. Vikhornova, A. N. Osavchuyuk

The Federal Center For Dual-Use Technologies «Soyuz» (FCDT «Soyuz»), Dzerzhinsky, Moscow Region, Russia

E-mail: fcdt@monnet.ru

During the operation of constructions containing filled polymeric materials (FPM) there may be emergency situations during which they undergoes dynamic loading, characterized by high amplitude at a short duration of exposure. To identify stress-strain states of those constructions from such effects it is necessary to consider viscoelastic behaviour pattern of FPMs in time range (10^{-4} –1) s.

In numerical software systems (ABAQUS, LS-DYNA, NX Advancer) different models of viscoelastic behavior are incorporated, including in the form of Proni series.

The report presents the results of the identification of Proni series parameters from the impact loading experiments on cylindrical samples of several FPMs using drop weight. The conditions of all experiments were identical: a weight of 25 kg was dropped from a 0.5 m height on the samples at a temperature 20°C. In the collision process overload curves were recorded by a piezoelectric detector, mounted on top of the impactor (weight), by the following consistent integration of which the time dependences changes of velocity and displacements of the impactor during the collision were defined. Shear relaxation kernel parameters identification in the form of Proni series coefficients that characterize the FPM viscoelastic behaviour was carried out using genetic algorithm by minimizing deviations of the theoretical prediction of impactor velocity from the experimental velocity curve.

As part of this work model parameters of the FPM mechanical behaviour were defined in the form that allows to use them in numerical software systems for strength calculations of the various constructions that contain FPMs. Modulus of elasticity and their complex meanings of the materials in question were calculated using obtained sets of viscoelastic parameters in the millisecond time range of impact loadings that arise during emergency situations. Besides a comparative analysis of mechanical behavior of various FPMs under the effect of impact loading was conducted.

4-16

**ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННЫХ И ФОНОННЫХ
СПЕКТРОВ, СТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ
ПЕРЕХОДЫ И ПЛАВЛЕНИЕ НАТРИЯ
ПРИ $P = 0-100$ GPa**

Н. Б. Волков*, Е. А. Чингина

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: *nbv@iep.uran.ru

В экспериментах (Gregoryanz E. et al: 2005; 2008) обнаружено сложное поведение натрия при высоких давлениях, сопровождающееся образованием сложных кристаллических структур и аномальным поведением кривой плавления. Наблюдаемые особенности кривой плавления обусловлены, по нашему мнению, динамикой электронного и фононного спектров, а также – неустойчивостью колебательных мод и их ангармонизмом. Целью доклада является обоснование последнего утверждения.

Для расчета электронного и фононного спектров, а также полной энергии взаимодействия электронов с ядрами нами используется пакет программ LMTART-7. Кривая плавления рассчитывалась с помощью критерия Линдемана со значением постоянной Линдемана, равным 0,14. Для расчета среднего квад-

рата смещения атомов использовались как квантовая, так и классическая формулы. Оказалось, что для получения физически осмысленных результатов необходимо сделать «обрезание» интервала интегрирования по частоте снизу. Установлено, что зависимость частоты обрезания от давления качественно подобна кривой плавления. Рассчитаны электронные и фононные спектры для 14 значений давления в диапазоне от 0 до 92,4 ГПа, включая все экспериментальные точки, а также кривая плавления с12 натрия, хорошо согласующаяся с данными эксперимента. Обсуждено поведение электронных и фононных спектров вблизи максимума кривой плавления с12 натрия и структурного фазового перехода с12 → с14. Установлено, что в этих областях колебательные моды фононного спектра испытывают вибрационную неустойчивость в результате электрон-фононного, а также фонон-фононного взаимодействия. Показано, что энергия вакуумных колебаний решетки может достигать с ростом давления 20% скрытой теплоты плавления при $P = 0$. Это указывает на необходимость учета вклада вакуумных колебаний в формирование реальной структуры решетки. Обсуждены, также, структурные фазовые переходы «твердое тело – твердое тело» и «жидкость – жидкость» вблизи максимума кривой плавления.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания № 0389-2014-0006, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект No. 16-08-00466) и ФАНО в рамках программы фундаментальных исследований Уральского отделения РАН «Вещество при высоких плотностях энергии» (проект № 15-12-8).

**DYNAMICS OF ELECTRON AND PHONON
SPECTRA, THE STRUCTURAL PHASE
TRANSITIONS AND MELTING OF SODIUM
AT $P = 0-100$ GPa**

N. B. Volkov*, E. A. Chingina

Institute of Electrophysics UD RAS, Ekaterinburg, Russia

E-mail: *nbv@iep.uran.ru

In the experiments (Gregoryanz E. et al: 2005; 2008) a complicated behavior of a sodium under high pressure which is followed by a formation of the complex crystalline structures and an abnormal behavior of a melting curve is revealed. The observed features of the melting curve are due to the dynamics of the electron and phonon spectra, as well as an instability of the oscillating modes and their anharmonicity, in our opinion. The purpose of the report is to prove the last statement.

We used the software package of LMTART-7 for finding the phonon and electron spectra, as well as total interaction energy between electrons and sodium nuclei. We use the well-known criterion of Lindemann for finding the melting curve, with a value of the Lindemann constant equal to 0.14. Both quantum and classical formulas were used for the calculations of the mean-square displacements of the atoms. It turned out that to obtain the physi-

cally sensible data it is necessary "to cutoff" an integration interval of a frequency from below. It is determined that dependence of the cutoff frequency under pressure is qualitatively similar to the melting curve. The electron and phonon spectra for 14 values of pressure in the range from 0 to 92.4 GPa, including all experimental points, and also the sodium melting curve $c12$ which is well coincide with the experimental data are calculated. The behavior of electron and phonon spectra around a maximum of the melting curve of sodium $c12$ and around structural phase transition $c12 \rightarrow c14$ is discussed. It is determined that in these areas the oscillating modes of the phonon spectrum are tested the vibrational instability as a result of an electron-phonon, and also a phonon-phonon interaction. It is shown that with pressure rises the vacuum fluctuation energy can reach up to 20% of the latent melting heat at $P = 0$. That points to a necessity of considering a zero fluctuations contribution to the formation of the real lattice structure. Also, the structural phase transitions «solid body-solid body» and «liquid-liquid» near a melting curve maximum are discussed.

The work is carried out within the state order No. 0389-2014-0006 and under the partial financial support of the RFBR (project No.16-08-00466) and the FASO within the Ural Branch of RAS fundamental research program «Matter at high energy densities» (project No. 15-1-2-8).

4-17

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ МЕТАЛЛА В СИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Н. Б. Волков

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

Целью работы является построение модели металла, в общем случае с топологическими дефектами типа дислокаций и дисклинаций, пригодной для описания быстро протекающих электрофизических процессов в сильных импульсных электромагнитных полях. В модели полагается, что металл представляет собой смесь двух «жидкостей»: ионной, состоящей из ионных остовов одинаковой массы, и электронной, содержащей электроны непрерывного спектра. В модели также учитываются переходы электронов из связанного состояния в непрерывное и наоборот с суммарной скоростью $\Gamma_e = \delta n_e / \delta t$. При построении модели мы используем подход, разработанный в [1–3], согласно которому динамика топологических дефектов, связанных с ионной компонентой вещества, описывается в рамках теории классического калибровочного поля.

В результате получены полевые уравнения для ионной и электронной компонент, а также для топологических дефектов. С целью замыкания динами-

ческих уравнений записаны и решены в τ – приближении кинетические уравнения для квазичастичных возбуждений (электронов проводимости и фононов) в металле с топологическими дефектами. Показано, что даже в случае слабых электромагнитных полей и изотропии среды наличие топологических дефектов приводит к анизотропии кинетических коэффициентов переноса. Показано, также, что полученные уравнения в предельных случаях согласуются с ранее предложенными моделями.

Работа выполнена в рамках государственного задания №0389-2014-0006, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект No. 16-08-00466) и ФАНО в рамках программы фундаментальных исследований Уральского отделения РАН «Вещество при высоких плотностях энергии» (проект №15-12-8).

Литература

1. A. F. Andreev, D. I. Pushkarov // Sov. Phys. JETP, 1985. V. 62. P. 1087–1090.
2. N. B. Volkov // J. Phys. A: Math. Gen., 1997. V. 30. P. 6391–6424.
3. N. B. Volkov, E. A. Chingina and A. P. Yalovets // J. Phys.: Conf. Series, 2016. V. 774 (1). Art. no. 012147.

EQUATIONS OF METAL DYNAMICS IN STRONG PULSED ELECTROMAGNETIC FIELDS

N. B. Volkov

Institute of Electrophysics UD RAS, Ekaterinburg, Russia
E-mail: nbv@iep.uran.ru

The work aim is to construct a model of a metal, in the general case with topological defects such as dislocations and disclinations, suitable to describe the rapidly occurring electrophysical processes in the strong pulsed electromagnetic fields. The model is assumed that the metal is a mixture of the two «liquids»: ionic, consisting of the ion cores of equal mass, and electronic, having electrons with a continuous spectrum. The model also takes into account the transitions of electrons from discrete to continuous levels and vice versa with the total rate $\Gamma_e = \delta n_e / \delta t$. In constructing the model, we use the approach developed in [1–3], according to which the dynamics of topological defects in the ion component of the substance, described in classical gauge field theory.

As a result, the field equations are obtained for the ionic and electronic components as well as topological defects. With a view to the closure of the dynamic equations the kinetic equations for the quasi-particle excitations (phonons and conduction electrons) in metals with topological defects are written and solved in the τ – approximation. It is shown that presence of topological defects leads to anisotropy of transport kinetic coefficients even in case of weak magnetic fields and the isotropy medium. It is shown also that obtained equations are consistent with the previously proposed models in limiting cases.

The work is carried out within the state order No. 0389-2014-0006 and under the partial financial of the

RFBR (project No. 16-08-00466) and the FASO within the Ural Branch of RAS fundamental research program «Matter at high energy densities» (project No. 15-1-2-8).

References

1. A. F. Andreev, D. I. Pushkarov // *Sov. Phys. JETP*, 1985. V. 62. P. 1087–1090.
2. N. B. Volkov // *J. Phys. A: Math. Gen.*, 1997. V. 30. P. 6391–6424.
3. N. B. Volkov, E. A. Chingina and A. P. Yalovets // *J. Phys.: Conf. Series*, 2016. V. 774 (1). Art. no. 012147.

4-18

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЗАРОЖДЕНИЯ НАНОПОР В АЛЮМИНИИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Д. С. Воронин, А. Е. Майер, В. С. Красников

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: v-demonizerus@mail.ru, mayer@csu.ru,
va_ja@mail.ru

С помощью метода молекулярной динамики (МД) и метода расчета коэффициентов скоростей нуклеации и поверхностного натяжения описанным в статье [1], проводилось исследование образования пор в твердом алюминии, который находился растянутом состоянии (при отрицательном давлении), с идеальной решеткой, и с наличием дефектов. Рассчитывались времена жизни образца при температуре 300, 500 и 700 К, а так же нескольких уровнях давления для каждой температуры. Статистический разброс осуществлялся моделированием нескольких МД траекторий для каждой температуры и целевого давления. МД моделирование проводилось при помощи программы LAMMPS [2] и потенциала AL99 [3]. Образец состоял из 256 000 атомов алюминия, отрицательное давление поддерживалось баростатом с постоянным целевым давлением, температура поддерживалась постоянной с помощью термостата, система прослеживалась в течение 1500 пс с начала растяжения. Несколько МД траекторий моделировались для каждой из пар температура – давление, различные траектории задавались варьированием начальными распределениями скоростей атомов. Образец с дефектом формировался следующим образом: вырезалась полость, производилось сжатие образца приложенным давлением до полного исчезновения полости, оставались только дислокации. В течение 10 пс поддерживалось давление, после давление снималось до нуля, и начинался процесс растяжения. Проведено сравнение нескольких методов расчета параметров уравнения для скорости нуклеации.

Литература

1. Норман Г. Э., Янилкин А. В. Гомогенное зарождение дислокаций – *Физика твердого тела*. 2011. Т. 53. Вып. 8, 1536–1541 с.
2. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics – 1995, *Journal of computational physics* 117 (1), 1–19.
3. Mishin Y., Farkas D., Mehl M. J., and Papaconstantopoulos D. A., «Interatomic potentials for monoatomic metals from experimental data and ab initio calculations,» – 1999, *Phys. Rev. B* 59, 3393. DOI: 10.1103/PhysRevB.59.3393. (<http://www.ctcms.nist.gov/potentials>).

STUDY ON FORMATION SPEED OF NANOPORE IN ALUMINUM BY MOLECULAR DYNAMICS METHOD

D. S. Voronin, A. E. Mayer and V. S. Krasnikov

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: v-demonizerus@mail.ru, mayer@csu.ru,
va_ja@mail.ru

Using the method of molecular dynamics (MD) and the method of calculation of the nucleation rate coefficients and surface tension as described in the article [1], a study of pore formation in solid aluminum which was in extended state (under negative pressure), with an ideal lattice, and in the presence of lattice defects was conducted. Life time of each sample was calculated at the temperature of 300, 500 and 700 K, as well as several pressure levels for each temperature. Statistical spread was performed by modeling several MD trajectories for each of the target temperature and pressure. MD modeling was done by using LAMMPS program [2] and AL99 potential [3]. The sample consisted of 256 000 aluminum atoms, while negative pressure was maintained by a barostat with constant target pressure, the temperature was kept constant by a thermostat, the system was under observation during 1500 ps since the moment it started tension. Several MD trajectories were modeled for each pair temperature-pressure, different trajectories were set by varying the initial distributions of atoms speeds. Formation of a defect sample was as follows: cavity was cut, and pressure was applied to the compressed sample until the moment the cavity disappeared completely, leaving dislocations only. Pressure was applied for 10 ps after that the pressure was reduced to zero and the process of tension began. Comparison of several methods of parameters calculation of the equation for the nucleation rate was made.

References

1. Norman G. E. and Yanilkin A. Yu. Homogeneous Nucleation of Dislocations 2011 *Phys. Solid State* 53 1614–1619. (in Russian)
2. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics – 1995, *Journal of computational physics* 117 (1), 1–19.
3. Mishin Y., Farkas D., Mehl M. J., and Papaconstantopoulos D. A., «Interatomic potentials for monoatomic metals

from experimental data and ab initio calculations,» – 1999, Phys. Rev. B 59, 3393. DOI: 10.1103/PhysRevB.59.3393. (<http://www.ctcms.nist.gov/potentials>).

4-19

РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИЙ ВИНТОВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ

Л.-С. Д. Галеева

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: glsd@inbox.ru

Теория дислокаций является важной составляющей физики твердого тела. Дислокации играют значительную роль не только в поведении материала, но также влияют на многие характеристики.

В работе представлены результаты по расчетам энергии винтовых и краевых дислокаций, а также, нахождение плотности энергии дислокационной системы, состоящей из краевых или винтовых дислокаций. Расчеты проводились для металла алюминия [1]. В процессе моделирования были учтены разные размеры расчетной области, разное количество дислокаций. Представлены результаты расчетно-теоретического моделирования.

Литература

1. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. – ISBN 5-283-04013-5.
2. Хирт, Дж. Теория дислокаций / Дж. Хирт, И. Лоте. Перев. с англ. под ред. Э. М. Надгорного и Ю. А. Осипьяна. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.

CALCULATION OF THE ENERGY DENSITY OF SCREW DISLOCATIONS

L.-S. D. Galeeva

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: glsd@inbox.ru

The dislocation theory is an important part of solid body physics. Dislocations are significant not only for matter behavior but they influence on many properties as well.

The study presents the calculation results of screw and edge dislocation energy and finding density of dislocation system which consists of screw and edge dislocation. The calculations were done for aluminum. Within the process of modeling we have taken into account different sizes of computational region, different quantity of dislocation. The results of the calculation theoretical modeling are presented.

4-20

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ЛУЧ» ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В МИШЕНЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УДАРНИКОВ

И. А. Белов, С. А. Бельков, А. Ю. Воронин,
И. Н. Воронич, С. Ю. Головкин, В. Н. Деркач,
Л. А. Душина, В. М. Изгородин,
Е. И. Митрофанов, К. В. Стародубцев

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

На лазерной установке «Луч» [1] проведены работы по возможности использования схемы с ударником для расширения диапазона развиваемых давлений без повышения энергии введенной в мишень для экспериментов по ударно-волновому сжатию веществ.

В экспериментах использовалась мишень из Al с 10 мкм базой и ступенями высотой ≈ 10 мкм и ≈ 20 мкм для измерения скорости ударной волны (УВ). Для исключения предпрогрева мишени на нее с фронтальной стороне наносился слой Pb толщиной 0,5 мкм. Ударником являлась дистанционно расположенная лавсановая пленка толщиной ≈ 4 мкм. Импульс давления, передаваемый ударником мишени, варьировался расстоянием между ударником и мишенью, которое изменялось от ≈ 80 мкм до ≈ 170 мкм. Облучение ударника осуществлялось на второй гармонике неодимового лазера. Интенсивность облучения изменялась от $0,66 \cdot 10^{14}$ Вт/см² до $1,68 \cdot 10^{14}$ Вт/см², длительность лазерного импульса составила $1,7 \div 1,8$ нс.

Проведен эксперимент по измерению скорости ударника, зарегистрирована его средняя скорость (100 ± 20) км/с. В ряде случаев в пределах погрешности измерения, при минимальном удалении ударника относительно мишени, УВ оказалась стационарной, в остальных случаях достигалось большее пиковое давление, но УВ была затухающей. Полученный результат объяснен комбинированным действием сначала импульса, передаваемого «ударником», и последующим – оставшейся частью лазерного импульса. Для алюминия на удалении 10–30 мкм от фронтальной стороны мишени получена скорость стационарной УВ до 35 км/с и давление до 25 Мбар, что в 2,5 раза больше, чем в схеме без использования ударника в аналогичных условиях облучения. Таким образом, показана перспективность использования схемы с мишенью-ударником для генерации сильных ударных волн в интересах исследований ударной сжимаемости материалов.

Литература

1. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И. и др. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс. Квантовая электроника. т. 35, с. 299–301 (2005).

**THE EXPERIMENTAL RESEARCH
AT THE «LUCH» LASER FACILITY IN STRONG
SHOCK WAVES GENERATION IN TARGETS
WITH LINER APPLYING**

I. A. Belov, S. A. Belkov, A. Yu. Voronin, I. N. Voronich,
S. Yu. Golovkin, V. N. Derkach, L. A. Dushina,
V. M. Izgorodin, Eu. I. Mitrofanov, K. V. Starodybtsev
ILFI Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

The experimental research in possibility of liner applying for increasing of the developed pressure without increasing of energy entered into a target for the experiments in shock wave compression have been carried out at the «Luch» laser facility [1].

The Al target with the basic size of 10 μm and steps with height $\approx 10 \mu\text{m}$ and $\approx 20 \mu\text{m}$ were used in experiments for the shock velocity measurement. The Pb film with 0,5 μm thickness was applied on the front-side of the target for preventing of the preheating. The mylar liner was located distantly from the target and had the thickness $\approx 4 \mu\text{m}$. The pressure pulse transferred by liner to a target was changed by distance changing between liner and target: from 80 μm to 170 μm . Irradiating of a target have been performed by the second harmonic of the neodymium laser. The on target intensity changed from $0.66 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$ to $1.68 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$, duration of laser pulse made up 1.7–1.8 ns.

The average velocity of linear – $100 \pm 20 \text{ km/s}$ have been registered in special experiment. The stationary shock within a measurement error have been reached in some cases at the minimal spacing between liner and target. In the other cases the larger pressure have been achieved but in the decaying regime. The results received were explained by the combined impact of the first pulse transferred by liner and further – by the remaining part of laser pulse. For Al target the stationary shock velocity made up 35 km/s and pressure – 25 Mbar at the distance of 10–30 micrometers from the front-side of a target. The achieved parameters are more than 2.5 times larger than the parameters got in the experiments without liner applying in similar conditions of target irradiation. Thus, the perspective of liner applying for strong shocks generation in interests of research in shock compression of matter is shown.

References

1. S. G. Garanin, A. I. Zaretskii, R. I. Il'kaev, G. A. Kirillov, G. G. Kochemasov, R. F. Kurunov, V. M. Murugov, S. A. Sukharev. Channel of a high-power laser fusion Luch facility emitting 3.3-kJ, and 4-ns pulses. Quantum Electronics, 35 (4), 299–301, 2005. (in Russian)

4-21

**РАЗРУШЕНИЕ И ПРОЧНОСТЬ УРАНА
И НЕКОТОРЫХ ЕГО СПЛАВОВ
ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ**

В. К. Голубев

Независимый эксперт, Нижний Новгород, Россия
Университет Людвиг-Максимилиана, Мюнхен, Германия
E-mail: vlgoch@cup.uni-muenchen.de

Работа является продолжением серии исследований откольного разрушения и прочности таких металлов, как уран и плутоний и их сплавов при ударно-волновом нагружении в широком диапазоне температур испытания [1, 2]. Это по своей сути довольно полное собрание результатов, полученных автором с коллегами, и дополненное в кратком виде результатами других исследователей в этой отрасли знаний. В большинстве проведенных опытов использовались образцы в форме дисков толщиной 4 мм. Они нагружались ударом алюминиевых пластин толщиной 4 мм через медный экран толщиной 12 мм, служащий крышкой или донной частью специального контейнера. Начальные температуры образцов изменялись в пределах -196 – 800°C . Характер откольного разрушения материалов и степень повреждения всех испытанных образцов наблюдались на продольных металлографических шлифах сохраненных образцов. Для конкретной температуры испытаний скорость удара последовательно изменялась и поэтому условия нагружения соответствовали постепенному переходу от уровня зарождения в материале микроповреждений до полного макроскопического откольного разрушения образцов. Наиболее интересные из полученных результатов связаны с влиянием температуры и фазового состояния образцов на характер их откольного разрушения. Численные расчеты условий ударно-волнового нагружения и откольного разрушения образцов выполнялись в одномерном упруго-пластическом приближении с использованием программ УП и ANSYS Autodyne. Были также получены результаты по влиянию на условия разрушения времени нагружения. Масштаб сборки уменьшался в этом случае в четыре раза. Некоторые двух- и трехмерные эффекты также были приняты во внимание. В частности, приведены результаты по откольному разрушению образцов в форме клина из урана и тех же сплавов. Кратко представлены все опубликованные данные других исследователей по откольному разрушению урана и сплавов в подобных условиях нагружения. Выполнен общий анализ всех полученных и заимствованных данных. Некоторые результаты по откольному разрушению урана в условиях интенсивного импульсного облучения и взрывного нагружения также представлены для совместного анализа. Сравнительный анализ проводился также для результатов по характеру разрушения урана и сплавов в различных условиях нагружения, включая даже результаты изучения

механизмов разрушения при статическом растяжении в широком диапазоне температур. Было отмечено, что полученные результаты по откольному разрушению урана и сплавов хорошо согласуются с большинством всех других проанализированных данных.

Литература

1. Golubev V. K. Strength and fracture of uranium, plutonium and several their alloys under shock wave loading. EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 26. P. 02015(6).
2. Golubev V. K. Spall fracture and strength of uranium, plutonium and their alloys under shock wave loading. Bulletin of the American Physical Society. 2015. Vol. 60, No. 8.

FRACTURE AND STRENGTH OF URANIUM AND SEVERAL ITS ALLOYS UNDER SHOCK WAVE LOADING

V. K. Golubev

Freelance, Nizhniy Novgorod, Russia
Ludwig-Maximilian University, Munich, Germany
E-mail: vlgoch@cup.uni-muenchen.de

The work is a continuation of a series of studies on spall fracture and strength of such metals as uranium and plutonium and their alloys under shock-wave loading in a wide temperature range [1, 2]. It is a rather complete review including a large number of results obtained by the author with his coworkers and in summary form the results of other researchers in this field of knowledge. The majority of the tests were conducted with the samples in the form of disks 4 mm in thickness. They were loaded by the impact of aluminum plates 4 mm thick through a copper screen serving as the cover or bottom part of a special container. The initial temperatures of samples were changed in the range of $-196-800^{\circ}\text{C}$. The character of spall failure of materials and the degree of damage for all tested samples were observed on the longitudinal metallographic sections of recovered samples. For a concrete test temperature, the impact velocity was sequentially changed and therefore the loading conditions corresponding to the consecutive transition from microdamage nucleation up to complete macroscopic spall fracture of samples were determined. The most interesting results are connected with the influence of temperature and phase state of samples on the character of spall failure. Numerical calculations of the conditions of shock wave loading and spall fracture of samples were performed in the one-dimensional elastoplastic approach using the UP and ANSYS Autodyne computer programs. The tests were also conducted for obtaining results on the influence of loading duration. The scale of an assembly was decreased in four times for that. Some two- and three-dimensional effects of loading were also taken into account. In particular the results of tests on spallation of the samples in the form of wedges made of uranium and the same alloys are presented in the paper too. All the published data of the other researchers on the fracture response of uranium and its alloys under such loading conditions are briefly

presented too. The common analysis of all obtained and borrowed data on spallation of these materials was conducted. Some results on the fracture response of uranium and its alloys to impulsive irradiation and intensive explosive loading were compiled and presented too for a common analysis. The comparative analysis was also conducted for results on the fracture character of uranium and its alloys under different loading conditions, including even failure mechanisms under static tension in a wide temperature range. It can be observed that obtained results on spall fracture of uranium and its alloys are in a rather good agreement with the majority of all other analyzed data.

References

1. Golubev V. K. Strength and fracture of uranium, plutonium and several their alloys under shock wave loading. EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 26. 02015(6).
2. Golubev V. K. Spall fracture and strength of uranium, plutonium and their alloys under shock wave loading. Bulletin of the American Physical Society. 2015. Vol. 60, No. 8.

4-22

РАЗРУШЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РАЗОГРЕВЕ ИНТЕНСИВНЫМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В. К. Голубев

Независимый эксперт, Нижний Новгород, Россия
Университет Людвиг-Максимилиана, Мюнхен, Германия
E-mail: vlgoch@cup.uni-muenchen.de

Работа является продолжением серии исследований разрушения различных материалов, прежде всего, металлов и сплавов в условиях импульсного разогрева потоками излучения [1, 2]. Это фактически довольно полное собрание результатов, полученных автором с коллегами по откольному разрушению металлов и сплавов при интенсивном рентгеновском облучении, но несколько расширенное результатами, полученными при других близких условиях кратковременного импульсного нагружения. В проведенных опытах образцы в форме тонких дисков облучались интенсивными импульсами рентгеновского излучения полного спектра. Испытывались образцы из железа, меди, алюминиевого сплава АМг6, титанового сплава ВТ14, молибдена, вольфрама, кадмия, свинца, цинка и урана. Образцы устанавливались в специальные контейнеры, снабженные системой измерения переданного им механического импульса отдачи. В большинстве опытов потоки энергии излучения на образцы составляли 1,38; 0,90 и 0,29 кДж/см², а длительность рентгеновского импульса была около 2 нс. После проведения облучательных опытов образцы подвергались изучению с использованием нескольких методов анализа. В частности, металлографический анализ

использовался для измерения глубины абляции материала образца с лицевой поверхности и для определения степени и характера его откольного разрушения в оставшейся части. Расчет разогрева образцов проводился с использованием спектра излучения радиационного источника. Численные расчеты процессов термического и ударно-волнового нагружения проводились с использованием уравнения состояния, учитывающего процесс испарения вещества. Рассчитанные значения температур и максимальных растягивающих напряжений в образцах на координатах, соответствующих глубине абляции и формированию зон откола или отдельных трещин, условно принимались в качестве конкретных условий откольного разрушения при соответствующих условиях облучения. В работе также кратко представлены опубликованные данные других исследователей по откольному разрушению различных металлов при облучении интенсивными импульсами рентгеновского излучения жесткого спектра. Выполнен общий анализ полученных и заимствованных данных. Также кратко представлены результаты, полученные при других условиях короткоимпульсного нагружения, таких как высокоскоростной удар тонкой пластины (фольги), разогрев сильноточным электронным пучком и облучение мощным импульсным лазером. Эти результаты также были использованы для общего простого анализа всех имеющихся результатов по откольному разрушению металлов в условиях высоких давлений и температур и чрезвычайно коротких времен нагружения. Довольно очевидные, но не очень точные тенденции просматриваются из такого общего анализа.

Литература

1. Golubev V. K. Fracture of metals samples under conditions of fast heating by intensive X-ray radiation. EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 26. P. 01045(6).
2. Golubev V. K. Fracture response of several metals to fast heating of samples by intensive X-ray radiation. Bulletin of the American Physical Society. 2015. Vol. 60, No. 8.

FRACTURE OF SEVERAL METALS AND ALLOYS UNDER IMPULSIVE HEATING BY INTENSIVE X-RAY RADIATION

V. K. Golubev^{1,2}

¹Freelance, Nizhniy Novgorod, Russia

²Ludwig-Maximilian University, Munich, Germany

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

The work is a continuation of a series of studies on fracture of various materials, first of all metals and alloys, under conditions of heating by radiation fluxes [1, 2]. This is actually a quite complete collection of the results obtained by the author and his colleagues on spall fracture of metals and alloys under intensive X-ray irradiation, but some extended with the results obtained under other similar conditions of short pulse loading. In those tests the samples in the form of thin disks were

irradiated by intensive pulses of X-ray radiation of a complete spectrum. The samples of such metals as iron, copper, AMg6 aluminum, VT14 titanium, molybdenum, tungsten, cadmium, lead, zinc and uranium were tested. They were mounted in the special containers equipped with the system of measurement of a mechanical recoil momentum transferred to them. In most tests the energy fluxes on the samples were 1.38, 0.90 and 0.29 kJ/cm² and the irradiating X-ray pulse was about 2 ns in duration. After the irradiation tests, the samples were studied with the use of several analysis methods. In particular, the method of metallographic analysis was used for measuring the depth of ablation of the sample material from the facial surface and for determining the degree and character of spall fracture in the remaining part. The spectrum data of the radiation source were used for the calculations of samples heating. Numerical calculations of thermal and shock wave loading phenomena were made with the use of the equation of state taking into account the process of evaporation. The calculated values of temperatures and maximum tensile stresses in the samples at the coordinates corresponding to the depth of ablation and formation of spallation zones or spall cracks were conventionally accepted as the specific conditions of realized spall fracture under appropriate irradiation conditions. The published data of other researchers on spall fracture of various metals under impulsive heating of samples by the X-ray pulse with a hard spectrum are also shortly presented in the work. A common analysis of all obtained and borrowed data on X-ray irradiation was conducted. The results obtained under other short pulse loading conditions such as high velocity impact of a thin plate, high-current electron beam heating and powerful pulsed laser irradiation were presented in the work too. They were also used for conducting a general simple analysis of all available results on spall fracture of metals under the conditions of high pressures and temperatures and extremely short loading durations. Rather obvious, but not very precise trends are in view from this general analysis.

References

1. Golubev V. K. Fracture of metals samples under conditions of fast heating by intensive X-ray radiation. EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 26. P. 01045(6).
2. Golubev V. K. Fracture response of several metals to fast heating of samples by intensive X-ray radiation. Bulletin of the American Physical Society. 2015. Vol. 60, No. 8.

4-23

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНА В ОБЛАСТИ АЛЬФА-ОМЕГА ПЕРЕХОДА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

А. А. Гольшев, Д. В. Соболев, А. М. Молодец

ФГБУН Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: golyshhev@icp.ac.ru

Полиморфизм многих металлов, в том числе и титана, сопровождается скачками термодинамических (объем, теплоемкость и др.), а также электрических свойств, в частности электросопротивления.

В [1] нами был обнаружен обратимый скачок электросопротивления при мегабарных давлениях ударного сжатия в области ω - γ полиморфного превращения в крупнокристаллическом титане. В свою очередь авторы работы [2] обнаружили скачки электросопротивления нанокристаллического титана при полиморфном α - ω превращении в условиях высоких статических давлений в зависимости от величины зерна поликристалла. В [2] сделан вывод о различии электросопротивления образцов нанотитана и его крупнокристаллического аналога при полиморфном α - ω превращении. В представляемой работе принята попытка обнаружения аналогичного эффекта в условиях ударного сжатия.

Ранее в [3] было показано, что ступенчатое ударно-волновое нагружение поликристаллического титана до давлений 40 ГПа стимулирует альфа-омега превращения наноструктурированного титана. В настоящей работе измерено электросопротивление образцов наноструктурированного титана со средним размером зерна 200 нм марки VT1-0 и крупнокристаллического титана в области его альфа-омега перехода. Эксперименты выполнены с использованием методики измерения электросопротивления ударно-сжатых образцов (см. [1]). История термодинамического состояния исследуемых образцов в нагружающем импульсе рассчитывалась с использованием построенного уравнения состояния наноструктурированного титана, а также с уже имеющимися УРС сопутствующих материалов экспериментальной сборки в рамках одномерного гидрокода [4].

Полученные результаты позволяют заключить, что в условиях ударного сжатия электропроводность образующейся омега фазы наноструктурированного титана на 20% выше электропроводности омега фазы крупнокристаллического титана.

Литература

1. Молодец А. М., Голышев А. А. // ФТТ, 2014, том 56, вып. 12, стр. 2435-2439.
2. Velisavljevic N., Jacobsen M. K., Vohra Y. K. // Materials Research Express 1 (2014) 035044.
3. Колобов Ю. Р., Манохин С. С. и др. // Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 18, стр. 63–71.
4. Ким В. В., Голышев А. А., Шахрай Д. В., Молодец А. М. // Труды XI международной конференции «Забабахинские научные чтения», 2012 г., Снежинск, Россия.

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF NANOSTRUCTURED TITANIUM IN THE ALPHA-OMEGA TRANSITION UNDER SHOCK COMPRESSION

A. A. Golyshev, D. V. Sobolev, A. M. Molodets

The Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

E-mail: golyshev@icp.ac.ru

Polymorphism of many metals, including titanium, accompanied by irregular thermodynamic (volume, heat capacity, etc.) and electrical properties, particularly resistivity.

In our work [1] reversible jump resistivity was found at megabar pressures of shock compression in the ω - γ polymorphic transformation in the coarse titanium. In its turn, the authors of [2] found jumps resistivity of nanocrystalline titanium at polymorphic α - ω transformation under high static pressure depending on the size of the polycrystal grains. In [2] concluded that the difference in the electrical resistance of samples of nano titanium and its macrocrystalline analog at the polymorphic α - ω transformation. In this work an attempt to detect a similar effect under shock compression.

Earlier, in [3] it was shown that the step shock-wave loading of polycrystalline titanium at pressures up to 40 GPa stimulates the alpha-omega transformation of nanostructured titanium. In this work, the electrical resistance of nanostructured titanium samples with an average size grains of 200 nm (titanium model – VT1-0) and macrocrystalline titanium in the region of its alpha-omega transition was measured. Experiments are carried out using a measurement electrical resistance shocked sample method (see [1]). History of the thermodynamic state of the samples were loaded in a pulse is calculated using the equation of state constructed for nanostructured titanium, as well as with existing EOS related materials experimental cell within a one-dimensional hydrocode [4].

These results allow us to conclude that in the conditions of shock compression the conductivity of the resulting nanostructured omega phase of titanium is 20% higher than the electrical conductivity of the omega phase macrocrystalline titanium.

References

1. Molodets A. M., Golyshev A. A. // Physics of the Solid State, 2014, V. 56, №. 12, pp. 2435–2439 (in Russian).
2. Velisavljevic N., Jacobsen M. K., Vohra Y. K. // Materials Research Express 1 (2014) 035044.
3. Kolobov Yu. R., Manokhin S. S. et al. // Technical Physics Letters, 2016, V. 42, №. 18, pp. 63–71. (in Russian).
4. Kim V. V., Golyshev A. A., Shakhrai D. V., Molodets A. M. // Proceedings of the XI International Conference «Zababakhin Scientific Talks», 2012, Snezhinsk, Russia. (in Russian).

4-24

АНОМАЛЬНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ АМОРФНОГО СТЕКЛОУГЛЕРОДА В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

А. М. Молодец, А. А. Голышев, А. С. Савиных
ФГБУН Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия
E-mail: molodets@icp.ac.ru

Стеклоуглерод является наноструктурированным метаматериалом. В изотермических условиях статического сжатия стеклоуглерод обладает аномальной сжимаемостью. Цель данной работы – выяснить характер сжимаемости стекоуглерода в условиях высокоскоростных ударно-волновых воздействий.

Известно, что образование ударных волн разрежения является необходимым и достаточным условием аномальной сжимаемости материала в ударно-волновых условиях. В связи с этим была изучена эволюция прямоугольного ударного импульса сжатия по мере его распространения в образце стеклоуглерода. Опорной экспериментальной информацией служили профили массовой скорости слоя образца, примыкающего к мягкой среде. Для регистрации профилей массовой скорости использовался лазерный интерферометрический измеритель скорости VISAR.

На основании экспериментальных данных установлено образование ударных волн разрежения в стеклоуглероде, а также превращение фронта ударной волны в размытую волну сжатия, что в целом означает аномальную сжимаемость стеклоуглерода в микросекундном ударно-волновом цикле сжатие-разгрузка.

В развитие экспериментального результата разработано уравнение состояния стеклоуглерода в области его аномальной сжимаемости. Модельное уравнение состояния позволяет описать экспериментальные данные не только для углеродного, но и для кварцевого стекла [2] в диапазоне сжатия и растяжения порядка одного ГПа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-08-00237

Литература

1. Молодец А. М., Голышев А. А., Савиных А. С., Ким В. В. Ударно-волновые исследования аномальной сжимаемости стеклоуглерода. // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2016, том 149, вып. 2, стр. 333–342.
2. Молодец А. М. Уравнения состояния кварцевого стекла и церия в области их аномальной сжимаемости. // Физика твердого тела, 2016, том. 58, вып. 9, стр. 1744–1748.

ABNORMAL COMPRESSIBILITY OF SHOCKED AMORPHOUS GLASSY CARBON

A. M. Molodets, A. A. Golyshev,
A. S. Savinykh, V. V. Kim

The Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian
Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia
E-mail: molodets@icp.ac.ru

Glassy carbon is a nanostructured metamaterial. Glassy carbon possesses abnormal compressibility under isothermal static compression. The purpose of the given work is to find out the character of compressibility of glassy carbon in the high-velocities shock-wave conditions.

It is known, the formation of relief shock waves is a necessary and sufficient condition of abnormal compressibility of a material in shock-wave conditions. In this connection the evolution of a shock impulse has been studied in process of its distribution to the glassy carbon sample. The mass velocity profiles of the glassy carbon sample layer served as the basic experimental information. To record the mass velocity profile we used a laser velocity interferometer system VISAR.

Formation of relief shock waves, and also transformation of shock front into a smoothly varying compression wave is established experimentally. These results mean abnormal compressibility of glassy carbon in a microsecond compression-unloading cycle. The equation of state of glassy carbon is developed for its abnormal compressibility area.

The modelling equation of state allows to describe experimental data not only for carbon, but also for quartz glass in a range of compression and a tension of an order of one GPa.

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-08-00237).

References

1. A. M. Molodets, A. A. Golyshev, A. S. Savinykh, and V. V. Kim. Shock-Wave Studies of Anomalous Compressibility of Glassy Carbon // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2016, Vol. 122, No. 2, pp. 289–297. (in Russian)
2. A. M. Molodets Equation of State of Quartz Glass and Cerium in Their Abnormal Compressibility Range // Physics of the Solid State, 2016, Vol. 58, No. 9, pp. 1804–1809 (in Russian)

4-25

**МНОГОКАДРОВАЯ ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА
РЕГИСТРАЦИИ ТЕНЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДЛЯ МНОГОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ
НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ
БЕТАТРОНОВ**

К. И. Алмазова, А. Н. Белоногов, В. В. Боровков,
Е. В. Горелов, И. В. Морозов,
В. Д. Селемир, О. А. Шамро

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

В работе представлены результаты разработки экспериментального образца модуля цифровой многокадровой системы регистрации для радиографии динамических объектов с большими оптическими толщинами. Регистратор построен на базе быстродействующего электронно-оптического затвора и современной ПЗС-матрицы. В качестве сцинтиллятора, преобразующего ионизационное излучение в видимый спектр, разработан матричный LYSO конвертер. Проведены первые эксперименты по просвечиванию статических тестовых объектов с помощью мобильного радиографического комплекса на базе безжелезных импульсных бетатронов.

**MULTI-FRAME DIGITAL RECORDING SYSTEM
OF SHADOW IMAGES FOR MULTI-ANGLE
TOMOGRAPHY BASED ON IRONLESS PULSED
BETATRONS**

K. I. Almazova, A. N. Belonogov, V. V. Borovkov,
E. V. Gorelov, I. V. Morozov,
V. D. Selemir, O. A. Shamro

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

This paper presents the development results of experimental sample of a module of a digital multi-frame recording system. The module is intended for radiography of dynamic objects having large optical thickness. The recorded is based on fast electronic-optical gate and modern CCD-matrix. As a scintillator, the authors developed the matrix LYSO converter to transform the ionization radiation to the visible spectrum. The first experiments on radiography of the static test objects using the mobile radiographic complex based on ironless pulsed betatrons were carried out.

4-26

ЗОНЫ РИСКА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Б. А. Гринберг¹, В. И. Лысак², С. В. Кузьмин²

¹Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО
РАН, Екатеринбург, Россия
²Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград, Россия
E-mail: bella@imp.uran.ru, weld@vstu.ru

Результаты многочисленных наблюдений микрогетерогенной структуры расплавленной зоны показали, что она представляет собой возможную зону риска. Для соединения Cu-Ta, определяющего стабильность корпуса химического реактора, исходные материалы практически не имеют взаимной растворимости. В результате зоны локального расплавления вдоль волнообразной границы содержат частицы тантала, которые, благодаря дисперсионному твердению, обеспечивают упрочненные вставки вблизи поверхности раздела. Кроме того расплавленные зоны приводят к точечному склеиванию контактирующих материалов. При тех условиях эксплуатации, при которых используется химический реактор, зоны локального расплавления, на самом деле, не являются зонами риска [1].

Зонами риска, с нашей точки зрения, являются области, в которых поверхность раздела имеет форму, промежуточную между плоской и волнообразной. Мы назвали такую форму квазиволновой. Условно говоря, она имеет структуру типа «лоскутного одеяла» и состоит из разориентированных областей, имеющих свои длины и амплитуды волн. Учитывая большую площадь свариваемых листов, можно полагать, что наличие квазиволновых областей и соответственно неоднородной поверхности раздела может быть опасным для стабильности стенок реактора.

Более сложная ситуация возникает благодаря расплавленной зоне в случае нефтехимического реактора (коксовой камеры). Транспорт углерода по зоне расплава из стали 12ХМ в направлении стали 08Х13 приводит к сегрегации углерода в хромистой стали [2]. Сегрегация провоцирует эвтектоидный распад, приводящий к образованию колоний стержневидных карбидов. Механизмы преодоления дислокациями включений чрезвычайно затруднены из-за их стержневидного характера и объединения в колонии.

В результате существуют две зоны риска: зона расплава и зона, содержащая стержневидные карбиды. Зоны риска уменьшают время эксплуатации нефтехимического реактора.

Была исследована также роль интерметаллических реакций при сварке взрывом. Для соединений медь–титан наблюдались превращения неупорядоченных и неограниченных кластеров в интерметаллические частицы, а также их укрупнение за счет поглощения мелких частиц [3]. Затем интерметаллические частицы объединяются в некоторые агломераты. При

достижении критического размера агломераты ведут себя как сплошное тело и проявляют присущую интерметаллидам хрупкость. Обращается внимание на то, что многообразие режимов и условий эксплуатации делает для некоторых из них опасность образования интерметаллидов вполне реальной.

Литература

1. Greenberg A. B., Ivanov M. A., Inozemtsev A. V., Patselov A. M., Pushkin M. S. and Vlasova A. M. Microheterogeneous Structure of Local Melted Zones in the Process of Explosive Welding // Metallurgical and Materials Transactions A, 2015. V. 46. No. 8. P. 3569–3580.
2. Greenberg B. A., Elkina O. A., Patselov A. M., Plotnikov A. V., Ivanov M. A., Besshaposhnikov Yu. P. Risk zones for coke drum shell produced by explosive welding // Journal of Materials Processing Technology. 2015. No.15. P. 79–86.
3. Greenberg B. A., Ivanov M. A., Pushkin M. S., Inozemtsev A. V., Patselov A. M., Tankeyev A. P., Kuzmin S. V., Lysak V. I. Formation of intermetallic compounds during explosive welding // Metallurgical and Materials Transactions A, 2016. V. 47A. No. 11. P. 5461–5473.

RISK ZONES UNDER EXPLOSIVE WELDING

B. A. Greenberg¹, V. I. Lysak², S. V. Kuzmin²

¹M. N. Mikheyev Institute of Metal Physics, the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

²Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

E-mail: bella@imp.uran.ru, weld@vstu.ru

Results of multiple observations of the microheterogeneous structure of melted zones have shown that it is a potential risk zone. For the Cu-Ta joint that determines the stability of the chemical reactor shell, the base materials have practically no mutual solubility. As a result, local melted zones along the wavy boundary contain tantalum particles, which, thanks to dispersive solidification, provide some reinforced inserts near the separation surface. Besides, melted zones result in spot bonding of contacting materials. Given the operating conditions of the chemical reactor, the local melted zones are actually not risk zones [1].

In our opinion, the risk zones are the areas, in which the separation surface has the shape that is intermediate between flat and wavy shapes. We call it a ‘quasi-wavy’ shape. Figuratively speaking, it has a quilt-like structure and consists of some de-oriented areas with their own wave lengths and amplitudes. Given the large area of plates to be welded, one can assume that the presence of the quasi-wavy areas and, accordingly, of a non-uniform separation surface could be hazardous for reactor shell walls.

Melted zones cause a more complicated situation in case of a petrochemical reactor (a coke box). Transportation of carbon along the melted zone from Steel 12XM towards Steel 08X13 results in carbon segregation in chromium steel [2]. The segregation provokes a eutectoid decomposition that causes formation of colonies of rod-shaped carbides. Prevention mechanisms via inclusion dislocations are extremely difficult to apply due to their

rod-shaped nature and their amalgamation into colonies. As a result, there are two risk zones: the melted zone and the zone containing rod-shaped carbides. The risk zones reduce the service life of the petrochemical reactor.

We have also studied the role of intermetallic reactions in the process of explosive welding. As regards the copper-titanium compounds, non-ordered and uncut clusters were observed to turn into intermetallic particles as well as to grow larger by means of absorbing smaller particles [3]. After that, intermetallic particles are combined into agglomerates of a certain type. Once they reach the critical size, these agglomerates behave like a solid body and feature the brittleness that is typical of intermetallics. It should be noted that due to variety of operation modes and conditions, the risk of intermetallic formation becomes quite real for some of them.

References

1. Greenberg A. B., Ivanov M. A., Inozemtsev A. V., Patselov A. M., Pushkin M. S. and Vlasova A. M. Microheterogeneous Structure of Local Melted Zones in the Process of Explosive Welding // Metallurgical and Materials Transactions A, 2015. V. 46. No. 8. P. 3569–3580.
2. Greenberg B. A., Elkina O. A., Patselov A. M., Plotnikov A. V., Ivanov M. A., Besshaposhnikov Yu. P. Risk zones for coke drum shell produced by explosive welding // Journal of Materials Processing Technology. 2015. No.15. P. 79–86.
3. Greenberg B. A., Ivanov M. A., Pushkin M. S., Inozemtsev A. V., Patselov A. M., Tankeyev A. P., Kuzmin S. V., Lysak V. I. Formation of intermetallic joints during explosive welding // Metallurgical and Materials Transactions A, 2016. V. 47A. No. 11. P. 5461–5473.

4-27

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ И ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКОЛОВ В СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧКАХ

М. М. Бойко¹, Е. Ф. Грязнов¹,
Е. В. Никитина¹, А. В. Уткин²

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

²Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

E-mail: gryaznov-2000@mail.ru

Откольные явления в стальных осесимметричных оболочках возникают при взрывном нагружении. Известны различные схемы взрывного или ударного нагружения внутренней поверхности, вызывающие разрушение откольного типа в срединных зонах стенки оболочки. В настоящей работе рассмотрены схемы: со скользящим детонационным фронтом при сплошном заполнении внутренней полости оболочки зарядом взрывчатого вещества (ВВ) и в зарядах ВВ с центральной полостью, с падающим детонационным фронтом при осевом инициировании заряда

ВВ, высокоскоростное нагружение ударной медной трубки, разгоняемой продуктами детонации. В зависимости от параметров ударно-волнового нагружения в оболочках реализуются неразвитые отколы в виде поврежденности, шероховатые и гладкие отколы.

Вид откольного разрушения в значительной степени определяется скоростью спада давления за фронтом первой ударной волны – dp/dt : с ростом dp/dt откольная поверхность становится более гладкой!

Особенности строения изломов при образовании отколов исследуются методами металлографии и фрактографии. Так как взрывное нагружение приводит к дроблению оболочек на отдельные фрагменты, то исследования здесь проводятся на поперечных шлифах фрагментов оболочек.

При небольших значениях dp/dt , реализуемых в схемах со скользящим детонационным фронтом, разрушение откольной природы на шлифах наблюдается в виде системы пор и микротрещин с радиальной ориентацией, откольная поверхность при этом не образуется. По мере увеличения dp/dt в схемах с полыми зарядами ВВ и, особенно, при использовании кольцевых ударников, наблюдается увеличение плотности микротрещин, в зоне поврежденности постепенное изменение ориентации микротрещин с радиальной на тангенциальную и их слияние в единую поверхность разрушения – кольцевой откол. Ширина зоны поврежденности с ростом dp/dt уменьшается, при гладких отколах поврежденность практически отсутствует. Специфической особенностью откольного разрушения в оболочках из среднеуглеродистых сталей является образование зон «белого травления» на поверхности откола.

Фрактографическое исследование откольных изломов позволило установить характер механизма разрушения и его изменение при переходе от шероховатых к гладким откольным изломам: от хрупкого межзеренного (в малоуглеродистых сталях) и внутрезеренного растрескивания с образованием ручьистых узоров (в среднеуглеродистых сталях) к специфическим изломам вязко-ямочного типа, который наблюдается только при гладких отколах.

METALLOGRAPHY AND FRACTOGRAPHY STUDIES OF SPALLS IN STEEL SHELLS.

M. M. Boyko¹, E. F. Gryaznov¹,
E. V. Nikitina¹, A. V. Utkin²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

E-mail: gryaznov-2000@mail.ru

Spalls occur in axisymmetric steel shells under explosive loading. There exist various known configurations for explosive or impact loading of the internal surface leading to spalling in the medial zones of the shell wall. Our study deals with the following configurations: a sliding detonation front when the internal shell cavity is completely filled with an explosive charge, or for the case of

explosive charges featuring a central cavity; an incident detonation front when the explosive charge is initiated axially; high-speed loading of a copper shock tube accelerated by detonation products. Depending on the shock wave loading parameters, three types of spall develop in shells: incomplete spall in the form of damage; rough spall; and smooth spall.

The type of spalling is largely determined by the rate of the dp/dt pressure drop behind the first shock wave front: with the increase in dp/dt , the spall surface becomes smoother!

Fracture structure specifics during spalling are studied employing the methods of metallography and fractography. Since explosive loading leads to the shells splitting into separate fragments, the studies are carried out for the transverse samples of the shell fragments.

When the dp/dt values are not large, as implemented in the configurations with a sliding detonation front, sample spalling is observed as a system of pores and microcracks oriented radially; spall surface does not form in this case. As the dp/dt values increase, for the configurations with hollow explosive charges and especially those using annular impactors, the microcrack density is observed to increase, their orientation in the damage zone transforming gradually from radial to tangential, along with their coalescence into a unified fracture surface: the ring spall. With the increase in dp/dt , the width of the damage zone decreases, being almost fully absent in the cases of smooth spalling. A characteristic feature of spalling in medium carbon steel shells is «white etching» zones developing on the spall surface.

Fractography study of the spall fractures allowed us to determine the nature of the failure mechanism and its transformations when transitioning from rough to smooth spall fracturing: from brittle intercrystalline (in low carbon steels) and intracrystalline cracking with river lines developing (in medium carbon steels), to those peculiar fractures of the ductile pitted type only observed in the case of smooth spalling.

4-28

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЯЧЕЙСТОЙ СТРУКТУРЫ В МОНОКРИСТАЛЛЕ МЕДИ ПРИ СФЕРИЧЕСКОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

А. В. Добромислов¹, Н. И. Талуц¹, Е. А. Козлов²

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

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

E-mail: Domromyslov@imp.uran.ru

Изучению образования ячейистой дислокационной структуры в металлах и сплавах с ГЦК решеткой посвящено достаточно большое количество исследований. Было установлено, что формирование ячейистой

структуры в существенной степени зависит от энергии дефекта упаковки, степени деформации, скорости деформации, температуры деформации, размера зерна. Работ по влиянию давления на образование ячеистой структуры существенно меньше, а по влиянию ориентации кристалла практически нет. В данной работе монокристалл меди в форме шара был подвергнут нагружению сферически сходящейся детонационной волной. Согласно расчетным данным давление на поверхности сферического монокристалла составляло 20 ГПа. Спецификой данного способа ударного воздействия является изменение величины давления и температуры в зависимости от глубины залегания слоя в шаровом образце.

Установлено, что образование ячеистой дислокационной структуры зависит как от кристаллографического направления исходного монокристалла, так и от положения слоя в образце по радиусу. Обнаружено, что образование четкой ячеистой структуры происходит при распространении ударной волны вдоль направления $\langle 100 \rangle$, а при распространении ударной волны вдоль направления $\langle 110 \rangle$ она не образуется. Проведенное исследование показало, что с ростом давления происходит уменьшение размера дислокационных ячеек и толщины границ ячеек. После достижения давления ~ 23 ГПа совершенство ячеистой структуры начинает снижаться, а размер ячеек и толщина стенок ячеек – сильно возрастать. При давлениях больше 26 ГПа происходит полное исчезновение ячеистой дислокационной структуры. Размытие ячеек и их исчезновение связывается с повышением температуры образца при высоких динамических нагрузках, которые возрастают с увеличением глубины залегания слоя в шаре.

FEATURES OF FORMATION OF CELL DISLOCATION STRUCTURE IN COPPER MONOCRYSTAL AT SPHERICAL EXPLOSIVE LOADING

A. V. Dobromyslov¹, N. I. Taluts¹, E. A. Kozlov²

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

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

E-mail: Domromyslov@imp.uran.ru

Rather large number of researches was devoted to formation of cell dislocation structure in metals and alloys with FCC lattice. It has been established that formation of cell dislocation structure depends on the stacking fault energy, the deformation degree, the deformation rate, the temperature of deformation, and the grain size. There are significantly less works on influence of pressure and orientation on formation of cell dislocation structure. In this work copper monocrystal in the form of a sphere has been subjected to loading by spherical converging detonation waves. The initial pressure on the surface of the copper sphere was 20 GPa. The specificity of this loading method

is the change of pressure and temperature depending on the depth of the layer in the spherical sample.

It is established that formation of cell dislocation structure depends both on the crystallographic orientation of monocrystal, and on the layer position in the sample. It is revealed that cell dislocation structure is formed, as shock wave is propagated along the $\langle 100 \rangle$ direction, and cell dislocation structure is not formed, as shock wave is propagated along the $\langle 110 \rangle$ direction. The study showed that the size of dislocation cells and the thickness of the cell boundaries decrease with increasing of pressure. The perfection of cellular structure begins to decrease after achievement of pressure ~ 23 GPa. Cellular dislocation structure disappears completely at pressure of over 26 GPa. The smearing of cells and their disappearance connect with temperature increase of the sample at high dynamic loadings that increase with the layer depth in the spherical sample.

4-29

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В. К. Баранов, А. М. Глыбин, П. В. Дудай,
В. И. Дудин, А. В. Ивановский, А. А. Зименков,
А. И. Краев, С. С. Надежин,
Р. М. Тагиров, О. А. Тюпанова

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

E-mail: duday@elph.vniief.ru

Наличие большого класса источников импульсной мощности на основе взрывомагнитных генераторов (ВМГ), разработанных в течение последних десятилетий в РФЯЦ – ВНИИЭФ, предоставляет широкие возможности для исследования динамических свойств материалов под действием ударно-волнового и квазиизэнтропического нагружения в большом диапазоне изменения амплитудно-временных характеристик импульсов сжатия и растяжения. Применение цилиндрических лайнеров-ударников, разгоняемых с помощью магнитного поля, позволяет изучать в условиях осесимметричного нагружения сдвиговую и откольную прочность материалов, а также процессы компактирования и пыления.

В докладе выполнен обзор исследований динамических (реологических) свойств различных материалов, проведенных с применением источников импульсной мощности на основе спиральных ВМГ. Рассмотрены результаты серии экспериментов целью, которых являлось исследование процессов зарождения, развития откольного разрушения и последующего компактирования алюминия сходящимся лайнером. Описана постановка и результаты первого эксперимента по исследованию сдвиговой прочности бериллия в цилиндрической геометрии в условиях удар-

но-волнового нагружения. Представлены результаты пилотной серии экспериментов по исследованию процесса пыления свинца при ударном нагружении цилиндрических образцов. В экспериментах изучалось влияние шероховатости внутренней поверхности на скорость и массу пылевого облака при варьировании амплитуды ударной волны.

STUDY OF DYNAMIC PROPERTIES OF MATERIALS WITH THE USE OF EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS

V. K. Baranov, P. V. Duday, V. I. Dudin, A. M. Glybin,
A. V. Ivanovskiy, A. I. Kraev, S. S. Nadezhin,
R. M. Tagirov, O. A. Tyupanova, A. A. Zimenkov

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

E-mail: duday@elph.vniief.ru

The availability of a big class of pulsed power sources on the basis of explosive magnetic generators (EMG) developed over a period of the last decades at RFNC – VNIIEF provides considerable opportunity to study the dynamic properties of materials under the effect of shock-wave and quasi-isentropic loading over a wide range of variations of the amplitude-time characteristics of compression and tension pulses. The use of the magnetically driven cylindrical liners-impactors makes it possible to explore the shear and spall strength of materials, as well as the processes of recollection and ejecta, under axisymmetric loading.

The paper will give an overview of studies of the dynamic (rheological) properties of various materials carried out with the use of the pulsed power sources on the basis of helical EMG. The results will be presented of the experimental series designed to study the processes of initiation and evolution of a spall damage, and subsequent recollection of aluminum by a converging liner. The paper will describe the setup and the results of the first experiment exploring the shear strength of beryllium in cylindrical geometry under conditions of shock-wave loading. The results of a pilot series of experiments studying the process of lead ejecta under shock loading of cylindrical specimens will be demonstrated. The experiments explored the effect of the inner surface finish on the velocity and mass of ejecta cloud in case of shock wave amplitude variation.

4-30

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТВЕРДЫХ α , β , ω ФАЗ ТИТАНА И ЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ

В. М. Елькин, В. Н. Михайлов, Т. Ю. Михайлова

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

Email: v.m.elkin@vniitf.ru

Предложено многофазное полуэмпирическое уравнение состояния, включающее в себя три полиморфные модификации (α , ω , β) титана и жидкость с учетом испарения. Трудности построения уравнения состояния связаны с недостаточной изученностью фазовой диаграммы титана в области высоких давлений. В настоящее время область стабильности α фазы на фазовой диаграмме хорошо установлена, имеется также информация, позволяющая судить об области существования ω фазы. При небольших давлениях ω фаза ограничивается линиями ω - α и ω - β превращений, а при высоких давлениях имеются экспериментальные данные о ее превращении в γ и δ фазы. К сожалению, информация о месте β фазы на фазовой диаграмме ограничивается только областью малых давлений. Весьма ограничена также информация и об ее свойствах. В данной работе предполагается, что β , γ и δ фазы могут быть описаны как одна обобщенная β фаза, ограничивающая область существования ω фазы. Такой подход позволит проводить гидродинамические расчеты во всей области твердого состояния титана с учетом ω - β фазового перехода. В работе также обсуждается плавление титана при ударном сжатии и положение кривой плавления на фазовой диаграмме. Параметры уравнения состояния подобраны с учетом всех имеющихся в настоящее время экспериментальных данных, полученных как в квазистатических, так и динамических условиях до 13,6 ТПа. В области сверхвысоких сжатий и температур для подбора параметров использовались результаты теоретических расчетов. Выбранная функциональная форма тепловых составляющих свободной энергии предусматривает ионизацию вещества и в пределе высоких температур соответствует полностью ионизованному идеальному газу ионов и электронов. Потенциальная (холодная) составляющая энергии при сверхвысоком сжатии удовлетворяет модели атома Томаса–Ферми. Наличие газовой асимптотики в уравнении состояния жидкости позволяет рассчитать кривую испарения титана и положение критической точки.

A SEMIEMPIRICAL EQUATION OF STATE FOR SOLID (ALPHA, BETA, OMEGA) AND LIQUID TITANIUM WITH EVAPORATION

V. M. Elkin, V. N. Mikhaylov, T. Yu. Mikhaylova

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

Email: v.m.elkin@vniitf.ru

A semiempirical equation of state is proposed for titanium in its three polymorphic modifications (alpha, omega and beta) + liquid with evaporation. The equation is difficult to derive because the phase diagram of titanium is poorly known in the region of high pressures. Now the region where the alpha phase is stable is well established and there is information from which we can estimate the region where the omega phase exists. At low pressures it is limited by the lines of omega-alpha and

omega-beta transitions and at high pressures the omega phase is seen in experiment to transform into gamma and delta phases. Unfortunately, the region where the beta phase exists is only known for low pressures. Information on its properties is also very poor. We propose that the beta, gamma and delta phases can be treated as a generalized beta phase which limits the region where the omega phase exists. Such an approach will allow hydrodynamic calculations to be performed in the entire region of solid titanium with account for the omega-beta transition. The paper also discusses the melting of shocked titanium and the position of the melting curve on the phase diagram. Parameters for the equation of state are chosen so as to fit all available data from quasi-static and dynamic experiments up to 13.6 TPa, and theoretical evaluations at ultrahigh pressures and temperatures. The functional form we took for the thermal components of free energy provides for ionization and in the limit of high pressures corresponds to fully ionized ion-electron gas. At ultrahigh pressures the potential (cold) energy component satisfies the Thomas-Fermi model. The asymptotic gas behavior helps determine the evaporation curve and the position of the critical point.

4-31

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕДИ
В ОБЛАСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ
ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ-ПАР**

А. Н. Емельянов, Д. В. Шахрай

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,
Россия

E-mail: emelyanov@icp.ac.ru

Методом изоэнтروпической разгрузки ударно сжатых пористых образцов меди получены изоэнтропы разгрузки расширенной меди в области критической точки фазового перехода жидкость-пар и перехода металл-неметалл.

Плоские образцы пористой меди с пористостью $m = \rho_0/\rho \sim 2-4$ (ρ_0 – нормальная плотность, ρ – плотность образца) были исследованы методом изоэнтропической разгрузки при различных конечных давлениях (от 1 до 10 кбар). Образцы ($m = 3-4$) представляли собой диски диаметром 15 мм и толщиной ~ 300 мкм. Они изготавливались склеиванием металлического порошка спиртовым раствором поливинилбутирала с последующим отжигом (содержание клея в образце составляло 0,05% по массе). Образцы пористой меди плотностью $m = 2-2,5$ изготавливали прессованием. Образцы представляли собой диски диаметром 18 мм и толщиной $\sim 400-500$ мкм.

В качестве диагностической аппаратуры использовали быстродействующие пирометры для измерения температуры и скорости фронта ударной волны. Исследуемые образцы после ударного сжатия расши-

рялись в гелиевую среду с различным начальным давлением (1–150 атм.). Скорость ударной волны в гелии определялась оптическим базисным методом. Расчет массовой скорости и конечного давления расширения меди производился по уравнению состояния гелия [1].

Для измерения электропроводности и плотности в экспериментальную сборку были введены электроды из стальной проволоки диаметром 1 мм, закрепленные на дне измерительной кюветы вокруг окна, через которое осуществлялась регистрация оптического излучения с поверхности образца. Электроды располагались на расстоянии $\sim 3-5$ мм от поверхности образца, и шунтировались сопротивлением $\sim 0,5-1,5$ Ом. Для измерения электросопротивления измерительной ячейки использовалась мостовая схема [2]. При контакте образца с электродами регистрировалось изменение сопротивления. Измерение временного интервала при контакте образца с измерительными электродами позволяет оценить толщину расширенного образца и его плотность, если известна исходная толщина образца и его пористость.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН в рамках комплексной программы научных исследований № 13 «Теплофизика высоких плотностей энергии»

Литература

1. Грязнов В. К. Термодинамика низкотемпературной плазмы в квазихимическом представлении. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. под ред. Фортова В. Е. Вводный том 1, М.: Наука, 2000, с. 299.
2. Гольшев А. А., Молодец А. М. Физика горения и взрыва, 2013, том 49, N 2, с. 106–113.

**THERMODYNAMIC PROPERTIES
AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY
OF COPPER NEAR THE CRITICAL POINT
OF PHASE TRANSITION LIQUID-VAPOR**

A. N. Emelyanov, D. V. Shahray

Institute of Problems of Chemical Physics, Chernogolovka,
Russia

E-mail: emelyanov@icp.ac.ru

Isentropes of expanded copper in the critical point region of the liquid-vapor phase transition and metal-nonmetal transition by the method of isentropic expansion of shock-compressed porous copper samples were obtained.

Plate-samples of porous copper (with porosity $m = \rho_0/\rho \sim 2-4$ (ρ_0 – normal density, ρ – density of the sample) were studied by isentropic expansion at the different final pressure (from 1 to 10 kbar). The samples ($m = 3-4$) were disks with diameter of 15 mm and a thickness of ~ 300 μm . They were made by gluing a metal powder with an alcohol solution butyral resin and by annealing (glue content in the sample was $\sim 0.05\%$ by weight). Samples of porous copper with density $m = 2-2.5$ were made by compression. The samples were discs with diameter of 18 mm and thickness of 400–500 μm .

The high-speed pyrometers were used for measuring the temperature and the shock wave velocity. The samples after shock compression expanded in helium medium with different initial pressure (1–150 bars). The shock wave velocity in helium was determined by the optical base length technique. Calculation of the mass velocity and final pressure of expansion of copper was carried out by the equation of state of helium [1].

The electrodes were introduced in the experimental assembly for measurements of the density and electrical conductivity. The electrodes (steel wire of ~1 mm in diameter) were mounted on the assembly bottom around windows, through which optical radiation registration was performed from the sample surface. The electrodes are located at a distance of ~3–5 mm from the surface of the sample, and shunted by resistor ~0.5–1.5 Ohm. The bridge circuit was used for measurement of the electrical resistance of samples [2]. The changing resistance of the sample was registered at contact of the sample with the pin-electrodes.

Measuring the time interval at the contact of the sample with pins makes it possible to estimate expanded sample thickness and density, when the initial thickness porosity of the sample is known.

The work was supported by the Presidium of the Russian Academy of Sciences in the framework of research program № 13 «Thermophysics of high energy densities».

References

1. Gryaznov V. K. 2008 Encyclopedia of Low-Temperature Plasma (Moscow: Fizmatlit) p. 299. (in Russian)
2. Golyshev A. A., Molodets A. M. Combust.Expl.Shock Waves, 2013, 49, p. 219. (in Russian)

4-32

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ УДАРНО-СЖАТЫХ МЕТАЛЛОВ

М. В. Жерноклетов, А. Е. Ковалев,
А. М. Подурец, В. Г. Симаков

Институт физики взрыва Российского федерального
ядерного центра – ВНИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

К числу интересных явлений в физике ударных волн безусловно относятся образования в сжатых веществах новых кристаллических модификаций. Изучению фазовых превращений в ударных волнах во ВНИИЭФ уделялось и уделяется значительное внимание. При этом используются как различные методы исследований, так и широкий спектр веществ: многие элементы периодической системы, галогениды щелочных металлов, карбиды и нитриды, окислы, горные породы, органические вещества.

С начала 2000-х гг. в ИФВ ВНИИЭФ активно ведутся работы по определению диапазонов плавления и регистрации фазовых переходов на ударных адиабатах металлов и органических веществ с помощью измерений скоростей звука методом догоняющей разгрузки с использованием индикаторных жидкостей и профилей давления манганиновыми и ПВДФ-датчиками давления. Ниже приводятся результаты исследований, проведенных с церием, оловом, чистым титаном, его сплавом ВТ-20 и цинком. Нагружение исследуемых образцов осуществлялось ударниками, разгоняемыми продуктами детонации взрывчатых веществ или сжатым гелием.

Церий – яркий представитель веществ с аномальными свойствами, которые обусловлены электронным строением его атомов. В диапазоне давлений от 4 до 12 ГПа в церии зарегистрирована двухволновая структура, состоящая из головной волны сжатия и следующей за ней ударной волны. Анализ структуры ударной волны и волны разрежения в диапазоне (0,6–6,0) ГПа свидетельствует о том, что в фазе разгрузки в церии формируется ударная волна разрежения. Взаимодействие в образце церия волн разрежения, возникающих с тыльной стороны ударника и свободной поверхности мишени, приводит к образованию откольного слоя. Гладкость отколов свидетельствует о том, что в церии действительно формируется ударная волна разрежения.

Постопытные исследования образцов церия методом рентгеноструктурного анализа не выявили изменений в его фазовом составе. По результатам наших исследований церий начинает плавиться на ударной адиабате при давлении ~13 ГПа.

В титане при давлениях 20–40 и 60–90 ГПа на зависимости скорости звука от давления зафиксированы изломы, которые объясняются фазовыми превращениями. Рентгеноструктурный анализ выявил наличие ω -фазы в образцах, сохраненных после нагружения давлениями в стальных ампулах в интервале от 9 до 23 ГПа. Начало плавления сплава ВТ-20 соответствует давлению на ударной адиабате равному 130 ГПа.

Обнаруженные в олове и цинке скачки скоростей звука при давлениях (60–90) и (105–130) ГПа соответственно связываются с началом и завершением плавления на их ударных адиабатах.

Таким образом, совместно с вновь полученными и имевшимися ранее данными по кинематическим параметрам ударных волн проведенные эксперименты позволили локализовать положения границ начала плавления на ударных адиабатах исследованных металлов с большей определенностью. Обнаруженные у церия, олова и титана ПВДФ и манганиновыми датчиками в профилях давления двухволновые структуры свидетельствуют либо о расщеплении ударных волн на упругие и пластические волны, либо о протекании фазовых превращений.

**RESULTS OF INVESTIGATIONS
OF PHASE TRANSITIONS
OF SHOCK COMPRESSED METALS**

M. V. Zhernokletov, A. E. Kovalev,
A. M. Podurets, V. G. Simakov

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Formations of new crystalline modifications in compressed substances are undeniably among interesting phenomena in physics of shock waves. Considerable study has been given to phase transitions in shock waves by experts from RFNC – VNIIEF. Beside various investigation methods, a wide range of substances is used, such as many elements of the periodic system, halogenides of alkaline metals, carbides and nitrides, oxides, rocks, organic substances.

Since the early 2000, experts from IPE RFNC – VNIIEF have been actively involved in efforts aimed to determine ranges of melting and recording phase transitions at shock Hugoniot of metals and organic substances by measuring sound velocities with use of the rarefaction overtake technique, which employs indicator liquids and pressure profiles by manganine and PVDF pressure gauges. Below the authors present results of investigations, which were performed with cerium, tin, pure titanium, its alloy VT-20, and zinc. Loading of the investigated samples was provided by impactors accelerated with use of explosives detonation products or compressed helium.

Cerium is a prominent representative of substances having anomalous properties, which are caused by electronic structures of its atoms. In the pressure range from 4 to 12 GPa, a two-wave structure was recorded in cerium. This structure consists of the head compression wave followed by a shock wave. Analysis of structures of the shock wave and rarefaction wave in the range (0.6–6.0) GPa points to the fact that a rarefaction shock wave is formed in the release phase in cerium. Rarefaction waves occur from the rear side of the impactor and the free surface of the target. Interaction of rarefaction waves in cerium sample causes formation of spall layer. Smoothness of the spalls testifies to actual formation of a rarefaction shock wave in cerium.

Post-test investigations of the cerium samples by the X-ray structural analysis have not revealed changes in cerium phase structure. Basing on our investigations, cerium starts melting at shock Hugoniot at the pressure of ~13 GPa.

In titanium, kinks were recorded at the dependence of sound velocity on pressure at the pressures of 20–40 and 60–90 GPa. These kinks can be explained by phase transitions. X-ray structural analysis revealed presence of the ω -phase in the samples, which had been recovered after loading by pressures in steel ampoules in the range from 9 to 23 GPa. Beginning of VT-20 alloy melting relates to pressure of 130 GPa at shock adiabat.

Jumps of sound velocities, which were revealed in tin and zinc at the pressures of (60–90) GPa and (105–130) GPa, can be respectively associated with the beginning and completion of melting at their shock adiabats.

Therefore, the obtained new data and earlier available data on kinematic parameters of shock waves together with the performed tests allowed localizing boundaries of the melting beginning at shock adiabats of the investigated metals with higher probability. The two-wave structures, which were revealed in pressure profiles for cerium, tin and titanium by PVDF and manganine gauges, testify either to splitting of shock waves for elastic and plastic waves, or to occurrence of phase transitions.

4-33

**РЕНТГЕНДИФРАКЦИОННЫЙ
АНАЛИЗ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ,
СИНТЕЗИРОВАННОГО ПРИ
УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ
В ПЛОСКИХ АМПУЛАХ СОХРАНЕНИЯ**

А. Н. Жуков¹, В. В. Якушев¹, С. Ю. Ананьев²,
В. В. Добрыгин^{1,3}, А. Ю. Долгобородов^{2,4}

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,
Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

³Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Московский инженерно-физический институт, Москва,
Россия

E-mail: azhukov@icp.ac.ru

В работе приводятся данные о результатах рентгенографического исследования эквимолярных механически активированных смесей никеля и алюминия различной дисперсности до и после ударно-волнового нагружения в плоских ампулах сохранения. Проведено сравнение алюминидов никеля, полученного в ампулах сохранения, с алюминидом никеля, полученным из тех же смесей методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. На основе анализа рентгенограмм сохраненных образцов показано, что при данных условиях эксперимента реакция между никелем и алюминием проходит полностью, но образовавшийся алюминид никеля содержит примесь α -Al₂O₃. Измеренные значения параметра решетки NiAl показывают, что состав полученного алюминидов никеля несколько отличается от эквимолярного. Размер кристаллитов образовавшегося NiAl независимо от дисперсности исходной смеси превышает 100–200 нм, а уровень микроискажений весьма велик. Рентгенографические характеристики алюминидов никеля, полученного в ампулах сохранения, близки к таковым для алюминидов никеля полученного методом СВС.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

диума РАН № I.13П «Теплофизика высоких плотностей энергии» и проекта РФФИ № 16-29-01030.

X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF NICKEL ALUMINIDE SYNTHESIZED UNDER SHOCK WAVE LOADING IN PLANAR RECOVERY ASSEMBLIES

A. N. Zhukov¹, V. V. Yakushev¹, S. Yu. Anan'ev²,
V. V. Dobrygin^{1,3}, A. Yu. Dolgoborodov^{2,4}

¹Institute of Problems of Chemical Physics of RAS,
Chernogolovka, Russia

²Joint Institute for High Temperatures of the RAS, Moscow,
Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

E-mail: azhukov@icp.ac.ru

The results of powder XRD investigation of equimolar nickel/aluminum mechanoactivated mixtures with different dispersion before and after shock wave loading in planar recovery assemblies are reported. Nickel aluminide prepared in recovery ampoules was compared with nickel aluminide prepared by self propagation high temperature (SPHT) synthesis. From analysis of X-ray diffraction patterns it has been shown that under experimental conditions nickel and aluminum reacts completely but nickel aluminide formed contains α -Al₂O₃ as impurity. NiAl lattice parameter measurements shows slight deviation of nickel aluminide composition from equiatomic. Crystallite size of NiAl exceeds 100–200 nm but microstrain is quite considerable. Powder XRD patterns of nickel aluminides prepared in recovery ampoules and by SPHT synthesis are in close agreement.

This work was supported by the Presidium of the RAS fundamental research program I.13P «Matter under High Energy Density» and by RFBR project 16-29-01030.

4-34

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СХЛОПЫВАНИЯ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

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

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

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

E-mail: zeldovich@imp.uran.ru

Медные цилиндрические оболочки с внутренним диаметром 40 мм и толщиной стенки 4 мм были подвергнуты действию взрыва цилиндрического заряда

ВВ, окружающего оболочку. Толщина заряда в первом опыте была 2 мм, во втором 4 мм. В первой оболочке действие ударной волны вызвало откол, и оболочка разделилась на два слоя. Наружный слой имел форму кольца толщиной около 2,5 мм и был слабо деформирован. Это позволило рассмотреть формирование откольных явлений «в чистом виде». Металлографическое исследование показало, что откол начинался с образования микропор, которые объединялись в цепочки, затем образуя трещины. Внутренний слой подвергся высокоскоростной радиальной деформации инерционного схождения, в результате которой откольные микропоры и микротрещины залечивались полностью или частично. Вторая оболочка сошла в цилиндр диаметром 28–30 мм. Поверхность цилиндра имела периодически расположенные выступы и вмятины, образование которых объясняется потерей устойчивости при деформации схождения. В поперечном сечении цилиндра было видно, что образовались три кольцевые зоны, отличающиеся по структуре. Микроструктура в наружной и внутренней зонах сформировалась под действием осесимметричной радиальной деформации. Деформация носила периодический характер: сильно деформированные участки чередовались со слабее деформированными. В средней зоне деформация была хаотической, турбулентной. Нарушение осевой симметрии деформации объясняется деформационным залечиванием откольных повреждений, возникших на стадии действия ударной волны.

Работа выполнена по плану РАН тема «Структура» (N г.р. 01201463331) и при частичной поддержке проекта УрО РАН (15-17-2-24).

METALLOGRAPHIC STUDY OF THE COLLAPSE OF COPPER CYLINDRICAL SHELLS

V. I. Zel'dovich¹, N. Yu. Frolova¹, A. E. Kheifets¹,
I. V. Khomskaya¹, A. A. Degtyarev², A. V. Koval²,
E. B. Smirnov², E. V. Shorokhov²

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

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

E-mail: zeldovich@imp.uran.ru

Copper cylindrical shells with an inner diameter of 40 mm and a wall thickness of 4 mm were subjected to the action of the explosion of a cylindrical explosive charge that surrounds the shell. The thickness of the charge in the first experiment were 2 mm, in the second 4 mm. In the first shell, the action of the shock waves caused spalling and the shell is divided into two layers. The outer layer has a form of a ring with a thickness of about 2.5 mm and was weakly deformed. This allowed us to consider the formation of a spall phenomena «in pure form». Metallographic study showed that the spalling began with the formation of micropores, which are combined into chains, and then forming cracks. The inner layer was subjected to high speed radial deformation of the inertial convergence,

which resulted in the spall micropores and microcracks heals completely or partially. The second shell has converged into a cylinder with a diameter of 28–30 mm. The surface of the cylinder was periodically arranged protrusions and indentations, the formation of which is due to the buckling deformation. The cross section of the cylinder was seen that the formed three annular zones that differ in structure. The microstructure in the outer and inner zones formed under the action of axisymmetric radial deformation. Deformation was wearing a periodic nature: the heavily deformed areas alternated with weaker strain. In the middle zone deformation was chaotic, turbulent. Violation of the axial symmetry of the deformation is explained by the strain of healing the spall arising under action of a shock wave.

This work was supported by RAS theme «Structure» (g.r. 01201463331) and partially supported by Ural Division of RAS (15-17-2-24).

4-35

О ПРЯМОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА СВОБОДНОЙ ЭНЕРГИИ В МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ

Г. В. Ионов¹, А. В. Караваев¹,
В. В. Дрёмов¹, Е. А. Черепанова²

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

²Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Среди описывающих состояние вещества макроскопических параметров наиболее сложными для вычисления с молекулярно-динамической точки зрения являются термодинамические потенциалы, в частности, свободная энергия Гельмгольца, которая для системы N частиц зависит от всего набора микроконфигураций, которые последняя может принимать. Свободная энергия $F = E - TS$ может быть точно найдена для произвольных объема и температуры из функции плотности конфигураций $g(u)$. Разработанный метод позволяет построить $g(u)$ в молекулярно-динамическом расчете. Для этого вероятности нахождения системы в различных интервалах приведенной энергии $u = U/(kT)$ определяются с помощью оригинального итерационного алгоритма. Расчет проводится при постоянной плотности и температуре, то есть в NVT ансамбле.

Предложенный метод расчета свободной энергии может быть использован для построения фазовой диаграммы для заданного потенциала. Построив ряд функций $F(T)$ для разных удельных объемов можно найти линии раздела фаз и двухфазных областей на диаграмме $V-T$. Разработанная методика была протестирована на ряде модельных межатомных потенциалов, для которых существует аналитическое решение для сво-

бодной энергии. Далее была построена фазовая диаграмма железа с использованием EAM потенциала и проведено сравнение с результатами, полученными методом термодинамического интегрирования.

DIRECT FREE ENERGY EVALUATION IN MOLECULAR-DYNAMICS SIMULATION

G. V. Ionov¹, A. V. Karavaev¹,
V. V. Dremov¹, E. A. Cherepanova²

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

²Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Thermodynamic potentials (in particular Helmholtz free energy) are the most complex parameters in molecular-dynamics simulations among the macroscopic parameters describing a substance state for N -body system free energy depends on full set of its microconfigurations. Free energy $F = E - TS$ can be exactly calculated for the given volume and temperature from a configuration density $g(u)$. We have developed an algorithm which builds the configuration density function $g(u)$ in molecular-dynamic simulation. This algorithm estimates a probability of detecting the system in a set of the reduced energy $u = U/(kT)$ intervals. Calculation is carried out under given specific volume and thermostat temperature, i.e. in NVT ensemble.

Proposed method of free energy calculation can be used for a phase diagram evaluation under given interatomic molecular-dynamics potential. We can find a phase transition in $V-T$ diagram if calculate a set of $g(u)$ functions for different specific volumes. The developed algorithm was tested on some simple interatomic potentials for which the analytical solution for the free energy function exists. Then an iron phase diagram in EAM potential was evaluated and compared with the one obtained by a thermodynamic integration method.

4-36

ВЛИЯНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ НА УДАРНЫЕ АДИАБАТЫ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

М. А. Кадатский, К. В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва,
Россия

E-mail: makkad@yandex.ru

Оболочечные эффекты, т. е. деформация энергетического спектра электронов из-за связанных состояний, проявляются в осцилляции теплофизических функций сжатого и разогретого вещества. В области параметров, где оболочечные эффекты сильнее всего влияют на характер поведения теплофизических функций, на сегодняшний день нет достаточного ко-

личества экспериментальных данных, полученных с необходимой точностью. И для качественного и количественного описания этих эффектов используются различные теоретические модели.

В настоящей работе расчеты уравнения состояния производятся с помощью модели Хартри–Фока–Слэтера (ХФС). Это ячеечная квантово-статистическая модель, использующая приближение среднего атома. Для учета оболочечных эффектов в этой модели вычисляются волновые функции связанных состояний электронов. Остальные электроны учитываются в квазиклассическом приближении. Обменное взаимодействие учитывается в квазиклассическом приближении. Для получения электронных энергетических зон дополнительно используются периодические граничные условия Блоха.

Для полученного уравнения состояния выбранного металла построены ударные адиабаты в диапазоне давлений от 1 до 10^7 ГПа. Для выявления влияния оболочечных эффектов на поведение ударных адиабат, в рамках модели ХФС производились отдельные расчеты с последовательным учетом все больших электронных состояний в квазиклассическом приближении. Проведено сравнение расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

INFLUENCE OF SHELL EFFECTS ON SHOCK HUGONIOTS OF METALS AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

M. A. Kadatskiy, K. V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: makkad@yandex.ru

Shell effects, i.e. the deformation of the electronic energy spectrum in connection with bound states, are evidenced by oscillation of thermal functions of warm dense matter. In the region, where shell effects most strongly affect the behavior of the thermal functions, nowadays there is not enough experimental data obtained with the sufficient accuracy. So, different theoretical models are applied to characterize these effects.

In the present work, the calculations of the equation of state are made by the Hartree–Fock–Slater (HFS) model. This cell quantum-statistical model uses the approximation of the average atom. The wave functions of bound electrons are calculated to take into account the shell effects. The unbound electrons and exchange interaction are taking into account in the framework of semiclassical approximation. Bloch boundary conditions are additionally used to obtain the electronic bands.

Obtained equation of state for selected metal is used to calculate shock adiabats. Calculations are performed in the pressure range from 1 to 10^7 GPa. To identify the influence of shell effects on the behavior of the shock Hugoniots in the framework of the HFS model separate calculations were carried out with different number of electronic states belong to continuum spectrum. Calculations are compared with available experimental data.

4-37

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССАХ

К. В. Бандуркин, В. Г. Каменев, А. А. Тихов,
В. Н. Туркин, А. С. Шубин

Всероссийский НИИ автоматизации им. Н. Л. Духова, Москва,
Россия

При исследовании свойств дисперсной фазы в быстропротекающих процессах актуальной задачей является регистрация параметров частиц – их распределения по размерам и скоростям, а также пространственного распределения их концентрации. Для этих целей активно используются оптические (тенева фотография, многокадровая съемка и т. д.) и лазерно-интерферометрические (гетеродин-интерферометрия) методы. Однако при регистрации плотных слоев дисперсной фазы, глубина зондирования для оптических методов становится незначительной, а лазерно-интерферометрические методы могут давать неоднозначные и сложно интерпретируемые результаты вследствие многократного процесса переотражения излучения в облаке частиц. Совместное использование данных методов позволяет взаимно дополнить получаемую информацию и повысить качество экспериментальных исследований дисперсной фазы.

В докладе приводятся результаты экспериментов по регистрации параметров частиц дисперсной фазы при использовании стереоскопической съемки с наносекундным временным разрешением и микронным пространственным разрешением и гетеродин-интерферометрии (PDV). Способы обработки данных проверяются на контрольных объектах с известными характеристиками. Показано повышение точности регистрации параметров частиц при одновременном использовании данных методов.

Описываются варианты постановки экспериментов по регистрации параметров дисперсной фазы в быстропротекающих процессах, позволяющие осуществить одновременное использование данных методов, и на основе совместной обработки данных реализовать комплексный метод регистрации параметров дисперсной фазы на основе оптической регистрации и лазерной интерферометрии.

COMPLEX METHOD OF REGISTRATION OF DISPERSED PHASE PARAMETERS IN HIGH-SPEED PROCESSES

K. V. Bandurkin, V. G. Kamenev, A. A. Tikhov,
V. N. Turkin, A. S. Shubin

N. L. Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics,
Moscow, Russia

When the properties of the dispersed phase of ultrafast processes in the study urgent task is to record the parameters of the particles – their size and velocity distribution, and spatial distribution of concentrations. For these purposes, the optical active (shadow picture, multi shooting etc.) and laser-interferometric (heterodyne interferometry) methods. However, when registering the dense layers of the dispersed phase, sensing the depth of optical methods becomes insignificant, and the laser-interferometric techniques can yield ambiguous and difficult interpretable results due to multiple reflections of the radiation process in the particle cloud. Merging these methods allows one to complement the information obtained and to improve the quality of experimental studies of the dispersed phase.

The report presents the results of experiments on the registration of the dispersed phase parameters using stereoscopic shooting with nanosecond time resolution and micron spatial resolution and heterodyne interferometry (PDV). Methods of data are checked for reference objects with known characteristics. It was shown to increase the accuracy of particle detection parameters while using these methods.

Options for staging experiments on registration of parameters of the dispersed phase in the high-speed processes, allowing for a simultaneous use of these methods, and on the basis of a joint data processing to implement a comprehensive method of recording parameters of dispersed phase based on optical detection and laser interferometry, are described.

4-38

МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАВНОВЕСНЫХ КРИВЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКЕ

A. V. Karavaev, B. V. Drëmov, G. V. Ionov

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

E-mail: a.v.karavaev@vniitf.ru

Описание поведения материалов при фазовых переходах первого рода в рамках Классической Молекулярной Динамики (КМД) является достаточно сложной задачей. Количественное описание/предсказание фазовых диаграмм материалов в значительной степени определяется качеством используемых межато-

ных потенциалов. Однако, даже при использовании прецизионных моделей межатомного взаимодействия, определение равновесных параметров фазовых переходов первого рода, в т. ч. кривых плавления, является весьма нетривиальной задачей. Это обусловлено тем, что фазовым переходам первого рода свойственен значительный гистерезис, причем данный гистерезис тем больше, чем меньше число частиц в моделируемой системе. Точность, вычислительная простота и безотказность метода расчета кривых плавления в рамках МД выходят на первый план, когда речь идет о моделировании плавления материалов из первых принципов с помощью квантовой МД или при оптимизации параметров полуэмпирических потенциалов межатомного взаимодействия, когда температура плавления является одним из целевых параметров. Для оценки кривых плавления в рамках МД существует достаточно большое количество разнообразных методов, опирающихся на различные теоретические основы и оценивающие температуру плавления с различной степенью точности.

В работе выполнен краткий обзор современных методов расчета кривых плавления в рамках метода молекулярной динамики, и подробно исследуется недавно предложенный т. н. модифицированный Z-метод. Модифицированный Z-метод сочетает простоту реализации характерную для оригинального Z-метода с преимуществами метода сосуществования, но, как показано, требует некоторого дополнительного расчетного шага. Оказывается, что не достаточно проводить моделирование в NVE-постановке, т. к. получающиеся в результате такого моделирования состояния с равновесием жидкости и кристалла находятся в общем случае в условиях негидростатического сжатия. Для того чтобы получить равновесие при гидростатическом сжатии достаточно выполнить моделирование с выравниванием компонент давления при сохранении объема счетной ячейки. После этого полученные значения термодинамических параметров систем с равновесием соответствуют равновесной кривой плавления. Результаты расчетов кривых равновесия кристалл-жидкость модифицированным Z-методом с выравниванием компонент давления хорошо согласуются с равновесными кривыми плавления, рассчитанными методом термодинамического интегрирования для тех же потенциалов, и не зависят от размера моделируемой системы. Системой с наименьшими размерами, для которой удалось достичь стабильной работы модифицированного Z-метода с использованием ЕАМ-потенциала, оказалась система размером $3 \times 3 \times 12$ элементарных ГЦК ячеек (432 атома). Такое малое количество атомов говорит о том, что, в принципе, метод может быть применен и для поиска кривых плавления в рамках квантовой молекулярной динамики. Хотя необходимо отметить, что для получения хороших средних термодинамических параметров на таких малых системах необходимы достаточно длительные расчеты – в несколько сотен тысяч МД шагов, что для квантовой молекулярной динамики практически на грани современных возможностей.

CALCULATION OF EQUILIBRIUM PHASE TRANSITION CURVES BY MOLECULAR DYNAMICS

A. V. Karavaev, V. V. Dremov, G. V. Ionov

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

E-mail: a.v.karavayev@vniitf.ru

It is quite a challenge to describe material melting within Classical Molecular Dynamics (CMD) quantitatively. The quantitative description/prediction of phase diagrams depends largely on the quality of interatomic potentials being used. However, the determination of equilibrium parameters for the first-order phase transitions proper to the model of interatomic interaction remains far from trivial because of a high hysteresis typical for the transitions, the smaller the number of particles in the system, the higher the hysteresis. Accuracy, simplicity and reliability become the most important features of a method one uses to calculate melting curves by MD when melting temperature is a target parameter for semiempirical interatomic potential parameters optimization procedure or in a modeling material melting from the first principles. There is a wide variety of methods used to calculate melting curves within MD. They are based on different theoretical background and estimate the melting temperature with different accuracy.

The work gives brief review of methods to calculate melting curves by molecular dynamics and thoroughly investigates the modification proposed recently by Wang with co-authors to the so-called Z-method. The modified Z-method combines an ease of implementation inherent to the original Z-method with advantages the coexistence method offers, but as it was shown needs an improvement. In particular, the resulting liquid-solid states it gives are always not in hydrostatic equilibrium. To attain to hydrostatic equilibrium, it is necessary to equalize stress components in the calculation cell without changing its volume. Then the values of thermodynamic parameters obtained correspond to the equilibrium melting curve. In a series of simulations for aluminum, beryllium and iron we have demonstrated that the results of calculations by the modified Z-method with stress equalization agree well with results obtained by thermodynamic integration method and do not depend on the system size. A system of $3 \times 3 \times 12$ fcc unit cells (432 atoms) was the smallest for which we were able to obtain reliable results. Such a small system size means that in principle, the method could be used for the calculation of melting curves by the quantum molecular dynamics, but getting good averages for thermodynamic parameters requires rather long calculations - tens thousand of MD steps which is almost on the brink of today's ab initio calculations capabilities.

4-39

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ У10А

Е. И. Карнаухов, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина,
Д. Н. Казаков, А. С. Майорова, С. С. Мокрушин

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

В данной работе представлены результаты исследований влияния скорости деформирования на динамические свойства образцов стали У10А в состоянии поставки и после закалки. Работу проводили с целью определения неизвестных динамических характеристик и получения экспериментальных профилей скорости свободной поверхности исследуемых образцов, необходимых для использования при подборе параметров модели материалов Джонсона–Кука с уравнением состояния Ми–Грюнаизена. Эксперименты проводили в отделении экспериментальной физики РФЯЦ – ВНИИТФ на легкогазовой пушке (ЛГП-1200). Для регистрации волн напряжений использовали интерферометры VISAR или PDV. Экспериментальные данные охватывают диапазон скорости деформирования от $0,03 \cdot 10^6$ до $1,3 \cdot 10^6$ с⁻¹. Показано, что сталь У10А в состоянии поставки имеет тенденцию к упрочнению по мере увеличения скорости деформирования, а закаленная сталь У10А приобретает в $\sim 1,35$ – $1,4$ раза более высокие значения откольной прочности и в $1,8$ – $2,1$ раза более высокие упругие параметры по сравнению со сталью У10А в состоянии поставки.

STRAIN RATE INFLUENCE ON DYNAMIC PROPERTIES OF STEEL U10A

Е. И. Карнаухов, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина,
Д. Н. Казаков, А. С. Майорова, С. С. Мокрушин

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

This work presents the results of investigation into the influence of strain rate on dynamic properties of the samples out of steel U10A in as-delivered condition and after tempering. The goal of the work was to determine unknown dynamic characteristics and to obtain experimental profiles of free surface velocity for materials under study that is necessary for selecting parameters of Jonson–Cook with Mie–Gruneisen equation. Experiments were conducted at RFNC – VNIITF Experimental Physics Division on light-gas gun (LGP-1200). For registration of stress waves, interferometers VISAR or PDV were used. Experimental data cover the range of strain rate from $0.03 \cdot 10^6$ up to $1.3 \cdot 10^6$ s⁻¹. It was shown that steel U10A

in as-delivered condition has tendency to hardening in the course of strain rate increase, and tempered steel U10A acquires ~1.35–1.4 times higher spallation strength and 1.8–2.1 times higher elastic parameters in comparison with steel U10A in as-delivered condition.

4-40

**АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ
ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЧАСТИ
УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ
МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ**

Ю. М. Ковалев

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия

E-mail: yum_kov@mail.ru

В данной работе приводятся анализ существующих приближений для описания зависимости теплоемкости при постоянном объеме от температуры молекулярного кристалла. Знание зависимости теплоемкости при постоянном объеме от температуры молекулярного кристалла имеет важное значение для построения уравнений состояния молекулярных кристаллов, которые являются замыкающими соотношениями математических моделей, описывающих распространение ударных волн, инициирование детонации в молекулярных кристаллах и т. д. Показано, что рассмотренные в данной работе приближения Дебая и Эйнштейна, широко и успешно применяемые для описания термодинамических свойств одноатомных кристаллов, не позволяют адекватно описывать зависимость теплоемкости при постоянном объеме от температуры молекулярных кристаллов нитросоединений. Предложение А. И. Китайгородского разделять частоты колебаний кристалла на внутримолекулярные и колебания молекулы как целого (три колебания центра тяжести молекулы и три колебания углов Эйлера), хорошо зарекомендовавшее себя при расчетах термодинамических функций ряда органических молекулярных кристаллов с плоскими молекулами, не позволяет адекватно описывать зависимость теплоемкости при постоянном объеме от температуры молекулярных кристаллов нитросоединений. Полученные в работе результаты указывают на необходимость разработки специальных приближений, позволяющих правильно описывать как низкочастотную, так и высокочастотную части колебательных спектров молекулярных кристаллов нитросоединений, зависимость теплоемкости при постоянном объеме от температуры кристалла и функции Грюнайзена, которая является связующим звеном между тепловой и холодной составляющими уравнения состояния молекулярного кристалла.

**ANALYSIS OF SOME APPROXIMATIONS
FOR THE DESCRIPTION OF THERMAL SIDE
OF THE EQUATION STATES OF MOLECULAR
CRYSTALS**

Yu. M. Kovalev

South Ural State University (national research university),
Chelyabinsk, Russia

E-mail: yum_kov@mail.ru

This paper presents an analysis of existing approximations to describe the dependence of the specific heat at constant volume of the molecular crystal temperature. Knowledge of the specific heat at constant volume of the molecular crystal temperature is essential for the construction of the equations of state of molecular crystals, which are closing relations of mathematical models describing the propagation of shock waves, detonation initiation in molecular crystals, etc. It is shown that considered in this paper, the Debye and Einstein's approach is widely and successfully used for the description of the thermodynamic properties of monatomic crystals, do not adequately describe the dependence of the specific heat at constant volume of the temperature of the molecular crystals of nitro compounds. Proposal by A. Kitaigorodskii divide the frequency of the crystal oscillation on intramolecular and vibration of the molecule as a whole (three oscillations of the center of gravity of the molecule and three oscillations of the Euler angles), a well-proven in the calculation of the thermodynamic functions of a number of organic molecular crystals with planar molecules, does not adequately describe the dependence of the specific heat at constant volume of temperature molecular crystals of nitro compounds. The results obtained indicate the need for the development of special approximations, allowing properly described as a low-frequency and high-frequency part of the vibrational spectra of molecular crystals of nitro compounds, the dependence of the specific heat at constant volume of the crystal temperature and Grüneisen function, which is the link between heat and cold components of the equation of state molecular crystal.

4-41

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
В ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ
Е. И. ЗАБАБАХИНА ОБ ОГРАНИЧЕННОСТИ
КУМУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ ВО ФРОНТЕ
СХОДЯЩИХСЯ ВОЛН В СРЕДАХ С ФАЗОВЫМИ
ПРЕВРАЩЕНИЯМИ**

Е. А. Козлов, А. В. Петровцев

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

Первая экспериментальная проверка гипотезы Е. И. Забобахина об ограниченности кумуляции энергии во фронте сферически сходящейся ударной волны в среде с фазовыми превращениями была проведена в сравнительных экспериментах по сохранению шаров из стали 3, закаленной стали 30ХГСА и аустенитной стали 12Х18Н10Т при их взрывном обжатии в системах с $R_{ВВ} = 40$ и 110 мм. Претерпевшие нагружение и сохраненные образцы подвергались меридиональной разрезке и последующим всесторонним металлографическим и электронно-микроскопическим исследованиям. О полноте кумуляции энергии в этих экспериментах судили по величине образующейся полости в шарах из разных сталей (обладающих и не обладающих α - ϵ -фазовым превращением и имеющих существенно различные прочностные характеристики) после их идентичного взрывного нагружения.

На следующем этапе сравнительные эксперименты по сохранению были дополнены проведением calorиметрирования сохраняемых образцов непосредственно после их нагружения.

После построения многофазных уравнений состояния Fe и разработки кинетических моделей высокоскоростной деформации Fe в исходной α -фазе и в области протекания α - ϵ ФП, кинетических моделей протекания прямых и обратных фазовых превращений и моделей откольных и сдвиговых повреждений, было проведено расчетно-теоретическое моделирование волновых процессов в шарах из Fe, аустенитной нержавеющей и ферритно-перлитных сталей.

Для дальнейшего совершенствования расчетно-теоретического моделирования волновых процессов в шарах из Fe и сталей, калибровки, проверки и уточнения кинетических прочностных моделей и кинетических закономерностей протекания в волнах напряжений полиморфных и фазовых превращений были проведены:

- лазерно-интерферометрические измерения изменения при сжатии структуры и параметров сходящихся упругого, фазового предвестников и основной пластической волны в сферических слоях из сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т различной исходной толщины при неизменном наружном радиусе и идентичных режимах сферического взрывного нагружения в системе с $R_{ВВ} = 40$ мм,

- лазерно-интерферометрические измерения профилей скорости движения границы раздела образца из стали 30ХГСА и оконного материала из Al_2O_3 или LiF при варьировании условий ударно-волнового нагружения в широком диапазоне,

- проведен экспериментально-расчетный анализ 2D- и 3D-эффектов при нагружении стальных шаров и оболочек с использованием взрывных систем различного габарита с $R_{ВВ} = 40; 75$ и 110 мм,

- систематические металлографические исследования обжатых и сохраненных стальных шаров и оболочек методами оптической и сканирующей микроскопии, измерениями распределений твердости $H_v(R, \theta, \varphi)$ и микротвердости $H_{\mu}(R, \theta, \varphi)$, определение объемов полостей и масс расплавов, образующихся

в шарах и оболочках при различных режимах их взрывного нагружения.

Важные новые методические возможности для изучения механизмов и кинетики фазовых превращений и высокоскоростной деформации, а также особенностей зарождения, развития и залечивания повреждений предоставляют:

- метод импульсного рентгеноструктурного анализа,
- лазерные ударные волны,
- методы молекулярной динамики,
- совмещение многоканальной лазерно-интерферометрической диагностики по ЛГМ, ЛИМ-ФП и метода малоракурсной томографии (МРТ),
- совмещение многоканальной ЛГМ-диагностики и одноракурсной многокадровой протонографии.

ADDITIONAL EXPERIMENTAL AND SIMULATED RESULTS IN SUPPORT OF E. I. ZABABAKHIN'S HYPOTHESIS ON THE ENERGY CUMULATION FINITENESS AT THE FRONT OF CONVERGING WAVES IN MEDIA WITH PHASE TRANSITIONS

E. A. Kozlov, A. V. Petrovstev

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

E. I. Zababakhin's hypothesis on the energy cumulation finiteness at the front of a converging shock wave in a medium with phase transitions was first experimentally verified in the comparative recovery experiments wherein spheres made from Steel 3, quenched 30KhGSA steel, and austenitic 12Kh18N10T steel were exploded in systems with $R_{HE} = 40$ and 110 mm. After shock-wave loading, the recovered samples were subjected to meridional cutting and the follow-on comprehensive metallographical and electron-microscopic examination. In these experiments, completeness of energy cumulation was judged by the size of the cavity formed in the different-steel spheres (with and without the α - ϵ -phase transition and having significantly different strength characteristics) after their explosive loading.

At the next stage, the comparative recovery experiments also included calorimetry of the recovered samples immediately after their loading.

Wave processes in spheres from Fe, the austenitic stainless steel, and the ferrite-pearlitic steel were numerically simulated after (i) multi-phase equations of state of Fe were derived, (ii) kinetic models for the high-strain rate deformation of Fe in the initial α -phase and in the region of the α - ϵ phase transition were developed, and (iii) kinetic modes for the direct and reverse phase transitions and also models of spall and shear fractures were developed.

To further improve numerical simulation of wave processes observed in Fe-, and steel-spheres, and to calibrate and verify kinetic strength models, as well as to refine kinetic regularities of the polymorphous and phase transitions in compression and rarefaction waves, we performed:

– Laser-interferometric measurements of changes in the parameters of the converging elastic and phase precursors, as well as in the parameters of principal plastic wave in the spherical 30KhGSA-, and 12Kh18N10T-steel layers having different initial thickness and constant outer radius under identical modes of spherical explosive loading in the system with $R_{HE} = 40$ mm;

– Laser-interferometric measurements of the interface velocity profiles for the 30KhGSA steel sample and the Al_2O_3 or LiF window material with the shock-wave loading conditions varying within a wide range;

– Experimental and calculation analysis of 2D-, and 3D-effects observed for steel spheres and shells loaded using different-size explosive systems with $R_{HE} = 40$; 75, and 110 mm;

– Systematic metallographic investigations of imploded and recovered steel spheres. In this study, we used optical and scanning microscopy, measurements of the hardness $H_V(R, \theta, \varphi)$ and microhardness $H_\mu(R, \theta, \varphi)$ distribution, and determination of the cavities volume and the melt mass formed in the spheres under different modes of their explosive loading.

Important new methodical capabilities to investigate mechanisms and kinetics of phase transitions and high strain-rate deformation, as well as special features in the impingement, development, and recompaction of damages are:

- X-ray diffraction analysis,
- laser shock-waves,
- molecular dynamics methods,
- combined use of the multi-channel laser-interferometry by the PDV-method, the Fabry-Perot laser interferometry, and the X-ray computer tomography, and
- combined use of the multi-channel PDV-diagnostics and the one-direction multi-frame protonography.

4-42

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЫЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СВИНЦА ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Е. А. Козлов¹, С. А. Дьячков², А. Н. Кондратьев²,
Д. П. Кучко¹, С. Е. Куратов², Д. Б. Рогозкин^{2,3},
А. А. Серёжкин², Р. В. Комаров¹, М. А. Ральников¹,
О. В. Ткачев¹, А. Е. Широбоков¹

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

²ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики имени Н. Л. Духова», Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

Представлены результаты взрывных и ударно-волновых экспериментов образцами из свинца с различной чистотой обработки их свободных поверхностей, включая образцы с полированной поверхностью.

Приведены новые данные по регистрации лазерно-гетеродинным методом профилей скоростей свободной поверхности и опережающих свободную поверхность фрагментов разрушения (пылевых частиц или капель расплава) при высокоскоростном деформировании и разрушении образцов в области исходной гцк-фазы, области протекания гцк-гпу-превращения, областях плавления свинца на его изэнтропах и ударной адиабате. Получены оценки откольной прочности свинца в твердом состоянии, оказавшейся равной 8–10 кбар при реализованных режимах взрывного нагружения ($\sigma_{xx} = 1–20$ ГПа). Определены различные физические характеристики быстролетящего облака пыли, включая: скорости движения, размеры микрочастиц, поверхностную плотность пыления.

Для теоретического моделирования процесса пыления применен бессеточный лагранжевый метод SPH, использующий соотношения распада разрывов. Параметры профиля неровностей свободной поверхности в исследуемых образцах задавались в соответствии с постановкой экспериментов. Полученные в расчетах значения скоростей движения, массы выброшенного вещества и распределения его объемной плотности по скорости находятся в согласии с наблюдаемыми в экспериментах. Проведены также расчеты SPH-методом изменения во времени скорости движения в газовой среде частиц разного размера.

Для интерпретации данных лазерно-гетеродинных измерений и сопоставления экспериментальных данных с результатами численного моделирования процесса пыления и каплеобразования предложена модель, связывающая спектральные данные гетеродинных измерений с параметрами распределения частиц в пылевом облаке. Для описания усредненных спектральных данных предложено использовать решение транспортного уравнения для функции взаимной когерентности рассеянного поля. Параметры распределения частиц в пылевом облаке, его оптическая толщина и скорость свободной поверхности подбирались из условия наилучшего совпадения расчетно-теоретических результатов с экспериментальными данными. Продемонстрирована возможность извлечения физических характеристик пыления и каплеобразования, а также скорости свободной поверхности из спектральных данных лазерно-гетеродинных доплеровских измерений.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF LEAD EJECTION AND LEAD SPALL STRENGTH ESTIMATION USING PDV-DATA

E. A. Kozlov¹, S. A. Djachkov², A. N. Kondratjev²,
D. P. Kuchko¹, S. E. Kuratov², D. B. Rogozkin²,
A. A. Serezhkin², R. V. Komarov¹, M. A. Ralnikov¹,
O. V. Tkachev¹, A. E. Shirobokov¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
²N. L. Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics,
Moscow, Russia

³National Nuclear Research University – National Research
Nuclear University, Moscow, Russia

Consideration is given to the results of explosive and shock-wave experiments with lead samples having different free-surface finish including samples with a polished surface. The paper presents new data how the laser-heterodyne technique (PDV-technique) was used to register the free-surface velocity profiles and velocity profiles for fracture fragments (ejecta particles or melt drops) outrunning the free surface under the high strain-rate deformation and the samples fracture in the region of the parent fcc-phase, in the region of the fcc-to-hcp phase transition, and in the regions of lead melting on its isentrope and Hugoniot. The estimated spall strength of the solid-state lead turned out to be 8–10 kbar under realized modes of explosive loading ($\sigma_{xx}=1\text{--}20$ GPa). Different physical characteristics of the quick-flying ejecta cloud are determined, i.e. the movement velocity, the microparticles size, and the ejecta surface density.

The meshless Lagrange approach, i.e. the SPH-method based on relations of discontinuities breakup, was used to theoretically model the ejecta process. Parameters of the free-surface roughness on the test samples were specified depending on the experimental setup. The calculated velocity, the ejected mass of the substance, and also velocity distribution of its volumetric density agree with those observed in the experiments. The SPH-method was used to calculate the time-dependent velocity of different-size particles in the gaseous medium.

The model that relates the spectral data given by the PDV-technique to the parameters of the particles distribution in the ejecta cloud is proposed to interpret the PDV-measurement data and to compare the experimental data with the numerical simulation results for the ejecta process and drop formation. The transport equation for the mutual-coherence function of the scattered field is proposed to describe the averaged spectral data. Parameters of the particles distribution in the ejecta cloud, its optical thickness, and the free-surface velocity were taken such that the best possible fit could be obtained between the numerically simulated and experimental results. It is demonstrated that physical characteristics of ejecta and drop formation, as well as the free-surface velocity can be derived from the spectral data given by the Doppler PDV-measurements.

4-43

О ВЛИЯНИИ ЗАЗОРА МЕЖДУ ОБРАЗЦОМ ВВ И МЕТАЕМОЙ ПЛАСТИНОЙ НА СТЕПЕНЬ ЕЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

А. Л. Жеребцов, А. В. Красильников

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

Для снижения откольного разрушения металлических пластин, метаемых зарядами различных ВВ, может использоваться воздушный зазор (ВВ-пластина). При определенном соотношении толщин ВВ, за-

зора и пластины может быть достигнут практически безоткольный ее разгон [1].

Однако эффект зазора может быть качественно противоположным при нагружении пластины двумя последовательными ударными волнами с промежуточной разгрузкой. В опытах по торцевому метанию такой режим нагружения может быть организован путем разделения заряда ВВ тяжелой инертной вставкой небольшой толщины.

В работе проведено расчетно-теоретическое исследование состояния пластин из стали 12Х18Н10Т при двухволновых режимах нагружения в сборках с зазорами (ВВ-пластина) различной толщины. Расчеты проведены по программному комплексу ВОЛНА [2] с использованием кинетической модели разрушения и восстановления сплошности [3].

Литература

1. Е. А. Козлов, С. А. Бричиков, Д. П. Кучко, А. В. Ольховский, М. А. Ральников, О. В. Ткачев. Результаты экспериментов по разгону стальных пластин с диагностикой процессов одновременно двумя лазерно-интерферометрическими методиками. ФГВ, № 6, 2014, с. 114–121.
2. В. Ф. Куропатенко, Г. В. Коваленко и др. Комплекс программ ВОЛНА и неоднородный разностный метод для расчета неустановившихся движений сжимаемых сплошных сред. ВАНТ сер. «Математическое моделирование физических процессов», вып. 2, с. 9–25, 1989.
3. Vychenkov V. A., Jhugin Yu. N., Kovalenko G. V., Kozlov E. A., Lobachev S. V., Petrovtsev A. V. Spallation of armco-iron and 30CGSA steel under explosive loading in the region of α - ϵ transition: experiment and calculation, in: Proceedings of V HDP Symposium, Saint-Malo, France, 2003, Tome I, pp. 431–434.

THE EFFECT OF A GAP BETWEEN HE AND THE PROJECTILE PLATE ON PLATE SPALLATION

A. L. Zherebtsov, A. V. Krasilnikov

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

An air gap between HE and the HE accelerated plate can help reduce spall fracture of the latter. At a certain relation between the HE, gap, and plate thicknesses, the plate can be accelerated almost with no spall [1].

However the effect of the gap can qualitatively be opposite if the plate is loaded by two successive shocks with unloading in between. In frontal projection experiments, such loading can be implemented by HE partitioning by an inert insertion of a small thickness.

The paper presents results of research into the states of 12Х18Н10Т steel plates subjected to double shock loading in systems with HE-plate gaps of different thickness. Calculations were done by the VOLNA code [2] with a kinetic continuity loss and recovery model [3].

References

1. E. A. Kozlov, S. A. Brichikov, D. P. Kuchko, A. V. Olkhovsky, M. A. Ralnikov, and O. V. Tkachov. Results of steel plate acceleration experiments with measurements by two laser interferometry techniques. *J. Combustion and Detonation Physics*, No.6, 2014, P. 114–121. (in Russian)
2. V. F. Kuropatenko, G. V. Kovalenko et al, VOLNA code and inhomogeneous difference method for non-steady flows of compressible continua. *J. VANT, Mathematical Modeling of Physical Processes Series*, Is. 2, P. 9–25, 1989. (in Russian)
3. Bychenkov V. A., Jhugin Yu. N., Kovalenko G. V., Kozlov E. A., Lobachev S. V., Petrovtsev A. V. Spallation of Armco-iron and 30CGSA steel under explosive loading in the region of α - ϵ transition: experiment and calculation, in: *Proceedings of V HDP Symposium, Saint-Malo, France, 2003, Tome I*, pp. 431–434. (in Russian)

4-44

**О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ
ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ
ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ
НА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

А. В. Красильников, В. Н. Ногин

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

Получено аналитическое решение задачи о форме откольного сигнала в рамках модели мгновенного разрушения для простейшего уравнения состояния конденсированного вещества $P = (\gamma - 1)\rho E + C_{0k}^2(\rho - \rho_{0k})$, где $\gamma = 3$. Показано, что традиционно используемая для оценок откольной прочности формула

$$\sigma_{\text{отк}} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}),$$

где U_{max} – максимальная скорость свободной поверхности, U_{min} – скорость поверхности перед выходом откольного импульса, верна только для случая, когда на поверхность выходит ударная волна с треугольным профилем. Для ударных волн с трапецидальным профилем ошибка в определении откольной прочности может достигать 30%. На примере расчета с нержавеющей сталью показано, что результаты численного моделирования с реальным уравнением состояния вещества как в гидродинамическом, так и упруго-пластическом приближении подтверждают выводы, полученные при анализе аналитического решения для модельного уравнения состояния.

**THE ACCURACY OF SPALL STRENGTH
EVALUATION FROM CONTACT SURFACE
MEASUREMENTS**

А. V. Krasilnikov, V. N. Nugin

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

An analytical solution is derived for the spall signal waveform within the instantaneous failure model for a simple equation of condense matter state in the form $P = (\gamma - 1)\rho E + C_{0k}^2(\rho - \rho_{0k})$ with $\gamma = 3$. It is shown that the traditionally used formula

$$\sigma_{\text{spall}} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}),$$

with U_{max} for the maximal free surface velocity and U_{min} for the velocity before spall signal output, is valid if only a shock wave which reaches the surface is triangular in profile. For shock waves with trapezoidal profiles, the error in the determination of spall strength may reach 30%. Using stainless steel as an example, we show that calculations with a real-world equation of state both in hydrodynamic and in elastic-plastic approximations verify what was inferred from the analysis of the analytical solution for the model equation of state.

4-45

**ДВУХУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ
И РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ**

В. С. Красников, А. Е. Майер, Д. С. Воронин

Челябинский Государственный Университет, Челябинск,
Россия

E-mail: vas.krasnikov@gmail.com, mayer@csu.ru

Мы используем МД данные для изучения скольжения дислокаций в чистом алюминии и алюминии, содержащем включения упрочняющих фаз в форме зон Гинье–Престона и Θ' фаз. Для чистого алюминия получена зависимость коэффициента фононного трения от температуры, для дисперсно-упрочненного алюминия – закон термоактивированного преодоления дислокациями препятствий. В части МД исследований, посвященных разрушению, определяются скорости зарождения нанопор и механизм их роста.

Второй этап нашего подхода состоит в формулировке континуальной модели пластичности и разрушения и дальнейших расчетах распространения ударной волны в алюминии. Континуальная модель пластичности включает: 1) уравнение для скорости пластической деформации, учитывающее скольжение дислокаций в возможных плоскостях скольжения; 2) уравнение движения дислокаций; 3) уравнение для плотности дислокаций. В случае чистого металла мы используем уравнение движения дислокаций с квазирелятивистским импульсом; в случае алюминия с включениями, находится средняя скорость движения, учитывающее скольжение дислокаций между препятствиями и задержки на них.

Модель разрушения включает два независимых процесса: 1) зарождение пор и 2) рост пор. Мы используем термофлуктуационный подход к описанию скорости зарождения нанопор с учетом влияния су-

ществующих дефектов. Рост пор в поле отрицательно-го давления рассматривается как результат пластических деформации вокруг поры. Параметры уравнений подбираются из сравнения с МД данными.

TWO-LEVEL MODELING OF DYNAMICAL PLASTICITY AND FRACTURE OF ALUMINUM

V. S. Krasnikov, A. E. Mayer, D. S. Voronin

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: vas.krasnikov@gmail.com, mayer@csu.ru

We use MD data for studying of dislocation sleep in pure aluminum and aluminum containing strengthening phases of copper in form of Guinier–Preston zones and Θ' phases. For pure aluminum the dependence of phonon friction on temperature and for dispersion strengthened aluminum the law of thermo activated overcoming of obstacles are calculated. The part of MD simulations devoted to fracture is used for determination of nucleation rate for nanovoids and mechanisms of its growth.

The second stage of our approach consists in formulating of continuum models of plasticity and fracture and further calculations of shock wave propagation in aluminum. The continuum model of plasticity combines 1) the Orowan equation for plastic strain rate, which accounts possible slip planes in FCC lattice; 2) equation for dislocation motion; 3) equation for dislocation density balance. In the case of pure metal we calculate the dislocation velocity by equation containing quasi relativistic term, force from external stress field and phonon friction term. When the aluminum with strengthening phases is considered, the average velocity of dislocation movement is calculated accounting free glide and interaction with obstacles.

Model of fracture includes two independent processes: 1) void nucleation and 2) growth of voids. We use thermo fluctuation approach to describe rate of void nucleation and account the influence of preexisting defect structure onto void nucleation. The growth of voids in negative pressure field is considered as the result of plastic flow around the void. Governing parameters for respective equations are fitted in comparison with MD data.

4-46

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ И ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ

И. К. Красюк¹, П. П. Пашинин¹, А. Ю. Семенов¹,
К. В. Хищенко², В. Е. Фортов²

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: krasyyk@kapella.gpi.ru

В настоящем докладе приведен обзор наиболее важных результатов экспериментальных исследований термоядерной плазмы в конических мишенях, генерации ударных волн и откольных явлений в различных материалах, которые проводились на лазерных установках Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН. Доклад посвящен 100-летию со дня рождения лауреата Нобелевской премии А. М. Прохорова.

STUDY OF EXTREME STATES OF MATTER AT HIGH ENERGY DENSITIES AND HIGH STRAIN RATES WITH POWERFUL LASERS

I. K. Krasyyk¹, P. P. Pashinin¹, A. Yu. Semenov¹,
K. V. Khishchenko², V. E. Fortov²

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

²Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: krasyyk@kapella.gpi.ru

In this report, a review of most important results of experimental studies of thermonuclear plasma in conical targets, generation of shock waves and spallation phenomena in different materials, which were carried out at laser facilities of the A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS, is presented. Report is devoted to the 100th anniversary of the birth of Nobel Prize Winner A. M. Prokhorov.

4-47

ЛАЗЕРНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕЩЕСТВА В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

А. П. Кузнецов, К. Л. Губский,
А. В. Михайлюк, Д. С. Кошкин

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

Исследование нестационарных физических процессов и экстремальных состояний вещества, подверженного интенсивному импульсному воздействию, является одной из наиболее актуальных фундаментальных задач физики высоких плотностей энергии. Важной научной проблемой в этой области, имеющей большое практическое значение, является исследование физических и механических свойств материалов, подвергнутых воздействию интенсивных динамических нагрузок. Анализ давления и скорости при ударно-волновом нагружении дает основу для определения кинетики процессов упругопластического деформирования, разрушения, химических и фазовых превращений, изучения динамической прочности и разрушения материалов.

Одним из немногих параметров вещества, доступных для измерения в подобных экспериментах,

является скорость движения поверхности (для непрозрачных сред) или скорости ударного фронта в веществе (для прозрачных сред). Информация о временной динамике и пространственных вариациях данного параметра позволяет исследовать фундаментальные явления и процессы, проходящие в веществе при экстремальных давлениях и температурах.

Представлены результаты разработки лазерного измерителя скорости, предназначенного для интеграции на лазерных установках килоджоульного уровня энергии. Система основана на лазерном неравноплечном интерферометре с визуализацией поля (line-imaging VISAR). Система позволяет проводить бесконтактные измерения пространственного распределения скорости в диапазоне 5–100 км/с с пространственным разрешением ~5 мкм и временным разрешением ~10 пс. Разработанная диагностическая система может быть использована для широкого спектра фундаментальных и прикладных научных проблем, связанных с взаимодействием ударных волн с конденсированным веществом

LASER DIAGNOSTIC SYSTEM FOR STUDIES MATTER IN EXTREME STATES

A. P. Kuznetsov, K. L. Gubskii,
A. V. Mikhaylyuk, D. S. Koshkin

National research nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

Study of unsteady physical processes and extreme states of matter under intense pulsed action is one of the most fundamental problems in high energy physics. The important scientific problem in this area, which is of great practical importance, is to study the physical and mechanical properties of materials exposed to intensive shocks. Analysis of pressure and velocity at the shock-wave experiments provides the basis for determining the kinetics of elastic-plastic deformation processes, destruction, chemical and phase transformations, study dynamic strength and fracture of materials.

One of few material parameters available for measuring in the course of these experiments is the surface velocity (for opaque target) or shock wave velocity in the matter (for transparent target). Information about the temporal dynamics and spatial variations of this parameter allows exploring the fundamental phenomena and processes occurring in the material under extreme pressures and temperatures.

We present the laser velocimeter, designed for integration into the kJ-class laser facilities. The system is based on a line-imaging VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector). It allows for remote non-contact measurements of the shock wave velocity in the range of 5–100 km/s with spatial resolution of about 5 microns and time resolution of about 10 ps. The developed diagnostic system can be used for a wide range of basic and applied scientific problems related to the interaction of shock waves with condensed matter.

4-48

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ КОРПУСКУЛЯРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА МОДЕЛЬНЫЕ СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА

Е. И. Курбатова, А. И. Ксенофонтов, В. М. Дёмин

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

Развитие исследований, направленных на решение вопросов безаварийной эксплуатации объектов ядерной энергетики, остаются наиболее приоритетными в связи с повышением энергонагруженности функциональных материалов реакторов. Одним из путей повышения их свойств является поверхностное легирование.

С целью обоснования свойств поверхностно-легированных материалов при эксплуатации в настоящей работе исследуются свойства модельных поверхностных сплавов на основе железа, после вторичного облучения их нейтронами спектра деления, альфа-частицами и термического воздействия.

Исследуемые материалы получены с использованием вакуумно-дуговой технологии и выбраны в качестве простых моделей стальных материалов ядерной энергетики.

В качестве металлов ионных пучков использовали тугоплавкие металлы, входящие в состав высокотемпературных сталей, в том числе титан, хром, молибден, а в качестве мишени железо электролитической чистоты.

Исследование свойств сформированных сплавов проводилось комплексом методов физико-химического анализа.

Показано, что состав поверхности железа после облучения представлен пересыщенными твердыми раствором металла ионного потока в альфа-железе и различными интерметаллическими соединениями.

С помощью современного программного обеспечения было исследовано влияние на сформированные поверхностные сплавы железа процессов вторичного облучения нейтронами и альфа-частицами.

Распределение пространственного тепловыделения было рассчитано в плоской геометрии для величины флюенса 1,0 нейтрон/см², падающего по нормали к поверхности мишени. Показано, что поверхностные сплавы железа имеют различные значения пространственного тепловыделения в зависимости от состава.

Для расчета характеристик взаимодействия альфа-частиц с материалами поверхностных сплавов была использована модель Линдхарда, разработан алгоритм и программа, реализующая метод Монте-Карло.

Проведены тестовые расчеты значений энергии, теряемой альфа-частицей различной энергии E_α (МэВ), на образование смещенных атомов в сплавах при облучении их источником альфа-частиц в виде водного

раствора урана (10% U-235 и 90% U-238). Приведены значения теряемой энергии в зависимости от состава сплавов.

Методом ЯГР-спектроскопии исследовано влияния термического фактора на изменение состава модельных сплавов железа в процессе отжига при температурах 500–1000°C. Показано, что пересыщенные твердые растворы молибдена и вольфрама в железе наиболее устойчивы к температурным воздействиям.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF THE IMPACT OF HIGH-INTENSITY CORPUSCULAR RADIATION ON MODEL IRON ALLOYS

E. I. Kurbatova, V. M. Dyomin, A. I. Ksenofontov

National research nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

Development of research is directed on the safe operation of nuclear power facilities remain the highest priority in relation to the increase of power loading of the reactor functional materials. The surface alloying is one of the ways to improve their properties.

The properties of the model surface alloys based on iron after exposure their secondary neutron spectrum fission, alpha particles and thermal effects to explain properties during use of surface-alloyed materials are researched in the present work.

The researched materials are obtained using vacuum-arc technology. They are selected as the simple models for steel materials in nuclear power.

The refractory metals including into the composition of high-temperature steels of which titanium, chrome, molybdenum, and as a target electrolytic purity iron were used as metal ion beams.

The study of the formed alloy properties was carried out with the methods of physical-chemical analysis.

It is shown that the composition of the iron surface after the irradiation is represented by a supersaturated solid solution of metal of an ion stream in α -iron and different intermetallic compounds.

It was investigated by use of modern software the influence on the formed surface alloys of iron of the secondary radiation of neutrons and alpha particles.

The spatial distribution of the thermal extraction was calculated in a flat geometry for fluence of 1.0 neutrons/cm² incident normal to the surface of the target. It is shown that surface alloys of iron have different values of the spatial thermal extraction depending on the composition.

Lindhard's model to calculate the characteristics of the interaction of alpha particles with the materials of the alloy surface the was used. Algorithm and program were developed realizing the Monte Carlo method.

The test calculations of energy values, losing an alpha particle of different energy E_α (MeV), on form of the displaced atoms in alloys under irradiation by alpha-particles from aqueous solution of uranium (10% U-235 90% U-238) were carried out. The values lose energy depending on the alloy composition were obtained.

The effect of thermal factor on the change of structure of model iron alloys during process of fritting at temperatures of 500–1000°C was researched by the method of NGR-spectroscopy. It was shown that supersaturated solid solutions of molybdenum and tungsten in iron are the most resistant to thermal effects.

4-49

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И СМЕСЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

К. К. Маевский, С. А. Кинеловский

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

E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru

Ударно-волновой синтез и компактирование с использованием порошковых смесей являются перспективным направлением создания новых материалов. В этом направлении проводятся интенсивные исследования сжимаемости смесей для создания материалов с необходимыми свойствами

Представлены результаты численных экспериментов по моделированию ударно-волнового нагружения смесей с помощью термодинамически равновесной модели ТЕС (thermodynamic equilibrium components) [1]. Рассматриваются смеси, включающие в свой состав твердые органические вещества в качестве компонентов, такие как эпоксидная смола, тефлон, парафин, полиуретан. Важным моментом является возможность фазового перехода при ударно-волновом воздействии. Это существенно для достоверного моделирования термодинамических параметров как чистых веществ, так и смесей на их основе. Изменение объема в области фазового перехода компонентов, входящих в состав смесей, позволяет расширить диапазон изменения термодинамических параметров смесей при ударно-волновом нагружении. Этот результат позволяет целенаправленно создавать необходимые условия для синтеза новых материалов. При моделировании исследуемый материал в области фазового перехода рассматривается как смесь фазы низкого и фазы высокого давления, такой подход позволяет достоверно описывать термодинамические параметры в области полиморфного фазового перехода [2]. Интерес к исследованиям сжимаемости таких смесей связан как с возможностью создания материалов с необходимыми свойствами (термостойкие и высокопрочные керамики), так и со свойствами самих материалов.

Получено хорошее соответствие данных расчетов по модели ТЕС с данными различных авторов определенными на основании экспериментов [3]. Данная модель используется для определения составов и соотношений компонентов смеси с целью получения

заданных параметров сплошных и пористых материалов после воздействия ударными волнами.

Литература

1. Кинеловский С. А., Маевский К. К. // ТВТ. 2014. Т. 52. Вып. 6. С. 843–851.
2. Кинеловский С. А., Маевский К. К. // ТВТ. 2016. Т. 54. Вып. 5. С. 716–723.
3. Кинеловский С. А., Маевский К. К. // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 8. С. 125–130.

MODELING THE THERMODYNAMIC PARAMETERS OF THE SOLID ORGANIC SUBSTANCES AND MIXTURES UNDER SHOCK WAVE LOADING

K. K. Maevskii, S. A. Kinelovskii

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru.

Shock wave synthesis and compaction using powder mixtures are a promising direction of new materials creation. In this direction intensive research are carried out to create mixtures compressibility materials with required properties.

The results of numerical experiments on modeling of shock wave loading of mixtures are obtained by using thermodynamic equilibrium models TEC (thermodynamic equilibrium components) [1] are presented. The thermodynamic parameters are modeled for the mixtures that include solid organic substances as components, such as epoxy, teflon, paraffin, polyurethane. The important point is the possibility of phase transition of the components under shock wave loading. This is essential for reliable modeling of thermodynamic parameters of pure substances and mixtures based on them. The significant change in volume in the region of phase transition components included in the mixtures allows us to expand the range of variation of thermodynamic parameters of the mixtures under shock wave loading. This result allows us to create purposefully the necessary conditions for the synthesis of new materials. When modeling the material in the region of phase transition is considered as mixture of low-pressure phase and high-pressure phase. This approach allows us to describe reliably the thermodynamic parameters for polymorphic phase transition [2]. Interest in the study of compressibility of such mixtures is associated with the possibility of creating materials with the required properties (high strength and heat resistant ceramics) and with the properties of the materials themselves.

A good agreement of these model calculations with the data of different authors that defined on the experiments basis is obtained [3]. The present model is used for selecting the compound and the ratios between the mixture components in order to obtain the prescribed characteristics under the shock wave loading of solid and porous materials and mixtures.

References

1. S. A. Kinelovskii and K. K. Maevskii // High Temp. 2014. V. 52. P. 821–829.
2. S. A. Kinelovskii., K. K. Maevskii. // High Temperature. 2016. V. 54(5). P. 675–681.
3. S. A. Kinelovskii., K. K. Maevskii // Technical Physics. 2016. V. 61(8). P. 1244–1249.

4-50

МНОГОМАСШТАБНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ

А. Е. Майер, П. Н. Майер, В. С. Красников,
В. В. Погорелко, И. Н. Бородин

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: mayer@csu.ru

Явление откольного разрушения имеет место, например, при отражении импульса ударного сжатия от свободной поверхности металла, что приводит к появлению волны растяжения с отрицательным давлением. Подобные явления могут наблюдаться в расплавах металлов и также приводить к динамическому разрушению в форме кавитации. На основе результатов молекулярно-динамических исследований разработана континуальная модель динамического разрушения твердых металлов при растяжении (откольного разрушения) с учетом неоднородностей структуры, таких как начальные полости, включения [1], дислокации, границы зерен, позволяющая прогнозировать характерные размеры элементов микроструктуры разрушенного материала. Модель включает уравнения кинетики образования, роста [2] и взаимодействия пустот. Она протестирована путем сравнения с имеющимися в литературе экспериментальными профилями скорости свободной тыльной поверхности мишени в задачах о высокоскоростном соударении пластин. Также на основе результатов молекулярно-динамических исследований разработана модель динамического разрушения расплавов металлов, как изначально однородных [3], так и с исходными полостями и включениями [4]. С ее помощью рассчитаны прочности расплавов ряда металлов в широком диапазоне скоростей деформации (от 1–10/мс до 10–100/нс) и температур (от температуры плавления до 70–80% значения критической температуры). Молекулярно-динамическое исследование поздних стадий разрушения твердых и расплавленных металлов показывает, что материал достигает предел прочности задолго до полного разрушения, имеющего вид фрагментации или формирования магистральных трещин. Динамическая прочность достигается, когда скорость роста объема пор становится равной скорости роста объема системы, обычно при величине деформации 0,05–0,2. При этом объединения пор еще не происходит. После

этого величина растягивающих напряжений в системе резко падает, но не до нуля. Дальнейший рост объема системы происходит за счет роста объема пор. Полное разрушение наступает позже и соответствует объему пор более 0,8 от объема системы. Примечательно, что работа, необходимая для фрагментации, в разы превосходит работу по достижению максимального растягивающего напряжения [5]. Предложенные модели используются для расчета задач о высокоскоростном соударении и сильноточном электронном облучении металлов. Основная часть работы выполнена при поддержке гранта РФ (проект 14-11-00538), исследования для магния выполнены при поддержке гранта Президента РФ (МД-7481.2016.1).

Литература

1. Pogorelko V. V., Mayer A. E. Influence of copper inclusions on the strength of aluminum matrix at high-rate tension – *Mater. Sci. Eng., A*. Vol. 642, 2015 – 351–359.
2. Krasnikov V. S., Mayer A. E. Plasticity driven growth of nanovoids and strength of aluminum at high rate tension: Molecular dynamics simulations and continuum modeling – *Int. J. Plast.* Vol. 74, 2015 – P. 75–91.
3. Mayer A. E., Mayer P. N. Continuum model of tensile fracture of metal melts and its application to a problem of high-current electron irradiation of metals – *J. Appl. Phys.* Vol. 118, 2015 – 035903.
4. Mayer A. E., Mayer P. N. Weak increase of the dynamic tensile strength of aluminum melt at the insertion of refractory inclusions – *Comput. Mater. Sci.* Vol. 114, 2016 – 178–182.
5. Mayer P. N., Mayer A. E. Late stages of high rate tension of aluminum melt: Molecular dynamic simulation – *J. Appl. Phys.* Vol. 120, 2016 – 075901.

MULTISCALE INVESTIGATION OF DYNAMIC FRACTURE OF METALS AND METAL MELTS

A. E. Mayer, P. N. Mayer, V. S. Krasnikov,
V. V. Pogorelko, E. N. Borodin

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia
E-mail: mayer@csu.ru

Spall fracture takes place, for instance, at a compression pulse reflection from a metal free surface that leads to arising of a tension wave with negative pressure. Similar phenomena are observed in metal melts and also lead to the dynamic fracture in the form of cavitations. Basing on the molecular dynamic simulations, we develop a continuum model of the tensile (spall) fracture of solid metals with accounting of the structural heterogeneities, such as initial voids, inclusions [1], dislocations and grain boundaries. The model allows one to predict the characteristic sizes of the fractured metal microstructure elements. It includes the kinetic equations for formation, growth [2] and interaction of voids. The model is verified by means of comparison with the taken from literature experimental time profiles of the free rear surface velocity in the problems of the high-velocity plate impact. Also basing on the molecular dynamic simulations, we develop a

continuum model of the dynamic fracture of metal melts, both initially homogeneous [3] and with initial voids or inclusions [4]. With the help of the latter model, we calculate the dynamic tensile strengths of some metals in wide ranges of strain rates (from 1–10/ μ s to 10–100/ns) and temperatures (from melting temperature to 70–80% of critical temperature). The molecular dynamic investigation of the late stages of fracture of both solid and molten metal shows that material reaches the tensile strength much earlier the complete fracture, which occurs as a fragmentation or a main crack formation. The dynamic strength reaching corresponds to the moment when the growth rate of voids volume becomes equal to the growth rate of the system volume, typically at the strain in the range 0.05–2. After that, the tensile stress value in the system rapidly drops down, but not till zero. Further growth of the system volume goes at the expense of the void growth. The complete fracture comes later and corresponds to the void volume fracture more than 0.8 from the system volume. It is remarkable that the work required for fragmentation exceeds several times the work on reaching the maximal tensile strength [5]. The proposed models of fracture are used for numerical modeling in the problems of the high-velocity impact or the high-current electron irradiation of metals. The main part of this work was supported by the grant from the Russian Science Foundation (Project No. 14-11-00538); investigations for magnesium was supported by the grant from the President of the Russian Federation (Project No. MD-7481.2016.1).

References

1. Pogorelko V. V., Mayer A. E. Influence of copper inclusions on the strength of aluminum matrix at high-rate tension – *Mater. Sci. Eng., A*. Vol. 642, 2015 – 351–359.
2. Krasnikov V. S., Mayer A. E. Plasticity driven growth of nanovoids and strength of aluminum at high rate tension: Molecular dynamics simulations and continuum modeling – *Int. J. Plast.* Vol. 74, 2015 – P. 75–91.
3. Mayer A. E., Mayer P. N. Continuum model of tensile fracture of metal melts and its application to a problem of high-current electron irradiation of metals – *J. Appl. Phys.* Vol. 118, 2015 – 035903.
4. Mayer A. E., Mayer P. N. Weak increase of the dynamic tensile strength of aluminum melt at the insertion of refractory inclusions – *Comput. Mater. Sci.* Vol. 114, 2016 – 178–182.
5. Mayer P. N., Mayer A. E. Late stages of high rate tension of aluminum melt: Molecular dynamic simulation – *J. Appl. Phys.* Vol. 120, 2016 – 075901.

4-51

**ФОРМИРОВАНИЕ ВСПЕНЕННОЙ
СТРУКТУРЫ В РАСПЛАВАХ АЛЮМИНИЯ
И ЖЕЛЕЗА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ
РАСТЯЖЕНИИ**

П. Н. Майер, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: polina.nik@mail.ru, mayer@csu.ru

Последние годы распространение в экспериментальной практике получили мощные ультракороткие импульсы лазерного излучения с длительностью импульса в сотни фемтосекунд, которые нагревают поверхностный слой облучаемого материала в изохорном режиме. Нагретый металл плавится и расширяется, сначала под действием возникшего градиента давления, затем по инерции. Механизм абляции вещества в зоне энерговыделения похож на откол в твердых мишенях, но происходит в расплаве. Похожая ситуация имеет место при сильноточном электронном облучении; за счет большего пробега электронов длительности импульсов, соответствующих изохорному режиму, достигают здесь десятков наносекунд. Интерес представляет как полное разрушение расплава на капли, так и возможность затвердевания расплава на промежуточной стадии растяжения в виде вспененной структуры. В работе при помощи молекулярно-динамического моделирования исследованы закономерности образования пористых расплавов алюминия и железа при высокоскоростном растяжении. Процесс разрушения расплава является многостадийным [1]: проходит стадии роста больших и коллапса маленьких пор, разрушения перегородок между порами с образованием струй, распада струй на капли. Пористая структура расплава сохраняется до тех пор, пока объемная доля пустот не превысит, по крайней мере, 0,9. В случае алюминия вспененная структура имеет вид изолированных друг от друга пустот, разделенных плоскими перегородками расплава. В случае железа поры связаны друг с другом в сложно переплетенную структуру. Эволюция пористой структуры контролируется силами поверхностного натяжения. Из соображений размерности получены аналитические оценки для зависимости среднего размера пор от времени, давления в системе и работы по растяжению расплава. Размер полостей в расплаве растет с течением времени даже при прекращении дальнейшего растяжения, а количество пор уменьшается за счет схлопывания более мелких. Моделирование охлаждения вспененного расплава до комнатной температуры показало, что при затвердевании образуется аморфная вспененная структура металла, которая сохраняется с течением времени и демонстрирует упругие свойства. Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-9111.2016.8) в час-

ти образования пористой структуры и гранта РФФИ (проект 14-11-00538) в части исследования прочности расплавов.

Литература

1. Mayer P. N., Mayer A. E. Late stages of high rate tension of aluminum melt: Molecular dynamic simulation – J. Appl. Phys. Vol. 120, 2016 – 075901.

**FORMATION OF FOAMED STRUCTURE IN
ALUMINUM AND IRON MELTS AT HIGH-RATE
TENSION**

P. N. Mayer, A. E. Mayer

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: polina.nik@mail.ru, mayer@csu.ru

Last years, powerful ultra-short pulses of laser irradiation with the pulse duration of several hundreds of femtoseconds got dissemination; these pulses heat the surface layer of the irradiated material in an isochoric mode. The heated metal melts and expands, due to the pressure gradients at first and due to inertia thereafter. The ablation mechanism of matter within the energy deposition area is similar to the spall fracture in solids, but takes place in the melt. A similar situation is observed under the high-current electron irradiation; the pulse durations corresponding to the isochoric mode reach hundreds of nanoseconds in the later case due to larger ranges of fast electrons. Both the complete fracture of melt on droplets and the melt solidification as a foamed structure at some intermediate stage of tension are of interest. In this work, we investigate by means of molecular dynamics the regularities of the foamed aluminum and iron melts formation at the high-rate tension. Melt fracture includes several stages [1]: growth of large and collapse of small pores; destruction of walls between pores with formation of jets; fragmentation of jets on droplets. The foamed melt retains till the void volume fraction exceeds 0.9 at least. In the case of aluminum, the foamed structure consists of isolated voids with flat walls between. In the case of iron, the pores are interconnected in a complexly interplayed structure. The foamed structure evolution is controlled by surface tension. Basing on the dimensional consideration, we propose analytical estimations for the time evolution of the mean radius, pressure in the system and the work on melt tension. The void size grows in time even after termination of further melt extension, while the pore number decreases due to collapse of smallest ones. Simulation of the foamed melt cooling down to room temperature shows an amorphous foamed metal structure formation, which persists over time and exhibits elastic properties. This work was supported by the grant from the President of the Russian Federation (Project No. МК-9111.2016.8) in the part of the foamed structure formation, and by the grant from the Russian Science Foundation (Project No. 14-11-00538) in the part of the investigation of the melt tensile strength.

References

1. Mayer P. N., Mayer A. E. Late stages of high rate tension of aluminum melt: Molecular dynamic simulation – J. Appl. Phys. Vol. 120, 2016 – 075901.

4-52

**ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫЕ
ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ
ПРОЧНОСТИ ZR И СПЛАВА ZR-2,5%NB**

С. Н. Малюгина, А. В. Павленко, С. С. Мокрушин,
А. С. Майорова, Д. Н. Казаков,
О. Е. Козелков, С. Ю. Филатов

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

E-mail: dep5@vniitf.ru (для Малюгиной)

Представлены результаты исследования прочностных свойств чистого циркония (Э100) и циркониевого сплава Zr-2,5%Nb (Э125) в условиях нагружения образцов плоскими ударными волнами субмикросекундной длительности. Изучено влияние температуры на величину откольной прочности и динамического предела упругости.

Цирконий и циркониевый сплав исследовали в α -фазе при нормальной и повышенных температурах и в β -фазе при температуре более 900°C. Температуру образцов варьировали от минус 180 до 950°C. Установлены условия протекания фазового $\alpha \rightarrow \omega$ превращения в исследуемых материалах.

Построены зависимости откольной прочности от скорости деформирования в диапазоне от 10^4 – 10^6 с⁻¹. Приведены экспериментальные данные по релаксации динамических пределов упругости циркониевого сплава Э125.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках государственного контракта № Н.4х.44.9Б.16.1012.

**TEMPERATURE VERSUS VELOCITY
FOR DYNAMICAL STRENGTH OF ZR
AND ZR-2.5%NB ALLOY**

S. N. Malyugina, A. V. Pavlenko, S. S. Mokrushin,
A. S. Mayorova, D. N. Kazakov,
O. E. Kozelkov, S. Yu. Filatov

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

E-mail: dep5@vniitf.ru (for Malyugina)

Strength characteristics of pure zirconium (E110) and zirconium alloy Zr-2.5%Nb (E125) are studied under conditions when samples are loaded by sub-microsecond plane shockwaves and results of this study are presented. Temperature effect on the value of dy-

namic elastic limit and spall strength is also investigated.

Zirconium and its alloy were studied in the α -phase under normal and elevated temperatures and in the β -phase under higher than 900°C temperatures. Temperature of samples varied from minus 180 to 950°C. Conditions for the $\alpha \rightarrow \omega$ phase transition in the samples are determined.

The spall strength dependences on strain rate within 10^4 – 10^6 s⁻¹ are constructed. Experimental data on relaxation of dynamic elastic limits of zirconium alloy E125 are presented.

This work was supported by the State Atomic Energy Corporation «Rosatom» under the State contract No. Н.4х.44.9Б.16.1012.

4-53

**МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ
ОСОБЕННОСТЕЙ УДАРНО-ВОЛНОВОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Л. А. Мержиевский¹, И. Ф. Головнев², Е. И. Головнева²

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

²Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

Излагаются результаты молекулярно-динамического моделирования и исследования особенностей процесса одноосного ударного (кратковременного) сжатия нанокристаллов меди. Для описания межатомного взаимодействия использован модифицированный вариант широко используемого многочастичного потенциала Воутера (A. F. Voter). Расчеты проводились с использованием скоростной модификации Верле второго порядка точности с шагом по времени 10^{-16} с. Анализ результатов расчетов проводился разработанным авторами методом мезоанализа системы.

В результате расчетов детально проанализированы изменения плотности, скорости центров масс, температуры и потенциальной энергии мезообъемов в разные моменты времени. Установлены интервалы амплитуд ударных волн, на которых реализуются разные механизмы диссипации энергии. Показано, что существует предельная внешняя нагрузка, при достижении которой в нанокристалле с идеальной кристаллической решеткой происходит скачкообразное изменение механизма поглощения энергии. В расчете наблюдается образование множества дефектов структуры, в том числе и аналогичных дислокациям. Расчеты позволили определить критические величины амплитуд нагружающего импульса, при которых происходит потеря устойчивости кристаллической решетки. Процесс сопровождается появлением ротационной составляющей деформации. Было исследовано влияние размеров нанокристаллов на особенности процесса одноосного сжатия. Варьировались поперечные размеры кристалла от 5×5 до 10×10 ячеек

кристаллической решетки по осям YZ и числом ячеек по оси X 50 или 200.

Установлено, что с изменением масштаба (размера нанокристалла) происходит увеличение интенсивности формирования ротационных полей и относительное увеличение энергии поля с моментами вдоль направления движения волны. При этом удельная энергия вращательного движения (энергия, приходящаяся на один атом) слабо зависит от размера нанокристалла. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00468.

MOLECULAR-DYNAMIC INVESTIGATION INTO MICROSTRUCTURAL FEATURES OF SHOCK-WAVE DEFORMATION

L. A. Merzhievsky¹, I. F. Golovnev², E. I. Golovneva²

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamic SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The report presents the results of molecular-dynamic modeling and investigation into the features of mono-axial shock process (short-term) compression of copper nanocrystals. In order to describe atom-atom interaction, we used modified version of multi-particle Voter potential (Voter A. F.). Calculations were performed using Verle velocity modification of second order of accuracy with time step 10^{-16} s. Analysis of calculation results was made by meso-analysis method developed by the authors of the paper.

Calculations in details analyzed the changes of density, velocity of mass centers, temperature and potential energy of meso-volumes in different moments of time. We established the intervals of shock wave amplitudes, at which various mechanisms of energy dissipation are realized. It was shown that there is critical external loading, and when it is reached, in nanocrystal with ideal lattice, there is stick-slip change of energy absorption mechanism. In calculation, we observed the formation of structure defects, including those that are similar to dislocations. Calculations permitted to determine critical values of loading pulse amplitudes, at which we may observe the losses of crystal lattice stability. The process is accompanied by appearance of deformation rotation component. We studied the influence of nanocrystal size on the features of mono-axial compression. The transverse crystal sizes varied from 5×5 up to 10×10 crystal lattice cells on axes YZ and the number of cells on axis X was equal to 50 or 200.

It was established that when the scale changes (nanocrystal size), we observe increase of rotation field intensity and relative increase of the field energy with momenta along the direction of wave motion. At the same time, the specific energy of rotation motion (energy per one atom) weakly depends on nanocrystal size. The work was funded in part by RFBR (grant #16-01-00468).

4-54

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Л. А. Мержиевский, М. С. Воронин

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

При облучении полимеров существенно меняется их структура, что, в свою очередь, приводит к изменениям их физико-механических свойств. Основное влияние ионизирующего излучения на химическую структуру и физические свойства полимеров заключается в том, что при его воздействии главная цепь полимера может претерпевать разрывы или деструктурироваться, то есть полимерные молекулы разрываются на более мелкие фрагменты. Кроме того, возможен и процесс сшивания – соединение соседних молекул друг с другом поперечными связями, в результате чего образуются молекулы более крупных размеров. Это открывает возможности целенаправленной модификации свойств полимеров с ионизирующего излучения. В этой связи является актуальным исследование влияния такого воздействия на механические свойства полимерных материалов и особенности поведения при динамическом нагружении. В работе [1] были проведены экспериментальные исследования влияния излучения на механические свойства ряда полимеров.

В данной работе построена модель, описывающая изменение механических характеристик облученных образцов. Используется модель вязкоупругого тела максвелловского типа. Для учета влияния ионизирующего излучения на свойства полимеров строятся соответствующие определяющие соотношения, включающих уравнения состояния при нешаровом тензоре деформаций и зависимости для времени релаксации касательных напряжений от параметров, характеризующих состояние среды. Проведены расчеты диаграмм деформирования исходных и облученных образцов и решены задачи об ударно-волновом деформировании.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-01-00468.

Литература

1. Л. А. Мержиевский, Е. В. Карпов, Е. О. Авсейко, М. В. Коробейников, Е. А. Штарклев. Влияние ионизирующего излучения на механические свойства полимеров. Труды V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Электронный ресурс). Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2011. Электрон. оптич. диск, вкладка «Публикации».

MODELING OF DYNAMIC DEFORMATION OF POLYMERS SUBJECTED TO IONIZING RADIATION

L. A. Merzhievsky, M. S. Voronin

Lavrentyev Institute of Hydrodynamic SB RAS, Novosibirsk, Russia

Under polymer irradiation, its structure changes sufficiently, and this in its turn leads to the changes of its physical and mechanical properties. The main influence of ionizing radiation on chemical structure and physical properties of polymers consists of the fact that the basic chain of polymer can break or destruct, i.e. polymer molecules split into small fragments. Besides, we can observe the process of sewing – linking of neighboring molecules with each other by transverse connections. As the result of it, we observe the formation of bigger molecules. This makes possible of purposeful modification of polymer properties with ionizing radiation. Therefore it is actual to study the influence of such impact on mechanical properties of polymer materials and the features of behavior under dynamic loading. In paper [1], the authors made experimental study of radiation influence on mechanical properties of several polymers.

In this work, we built a model, which describes the change of mechanical characteristics of irradiated samples. We used a model of viscous-elastic body of Maxwell type. In order to take into account the influence of ionizing radiation on polymer properties, we built corresponding definitive ratios, including EOS with nonball deformation tensor and dependences for time of shearing strain relaxation on parameters characterizing the state of medium. We calculated the diagrams for deformation of initial and irradiated samples and solved the problems on shock-wave deformation.

The work was funded in part by RFBR (grant # 16-01-00468).

References

1. L. A. Merzhievsky, E. V. Karpov, E. O. Avseiko, M. V. Korobeinikov, E. A. Shtaklev. Influence of ionizing radiation on mechanical properties of polymers. Proceedings of V Russian scientific conference RESOURCE AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS AND DESIGNS (Electronic resource). Ekaterinburg: IMASH UB RAS, 2011. Electronic optical disc, insertion "Publications".

Рассмотрены α -, γ - и ОЦТ-фазы урана, для которых определены зависимости свободной энергии и энтальпии в диапазоне плотности от 18,4 до 40,1 г/см³. Исследована стабильность этих фаз при холодном гидростатическом сжатии до 1 ТПа. Для объемно-центрированной тетрагональной (ОЦТ) фазы урана с помощью пути Бейна найдены параметры равновесной решетки в рамках рассмотренных значений плотности. Предсказан переход из α -фазы в ОЦТ-уран при сжатии давлением 0,28 ТПа до 60% от исходного объема α -урана при нулевом давлении, что находится в хорошем согласии с данными расчетов (1). ОЦТ-фаза урана обнаружена более стабильной, чем γ -фаза на всем исследованном диапазоне плотности от 18,4 до 40,1 г/см³.

Определена точность расчета сил и потенциальной энергии тепловых колебаний, обусловленной конфигурацией ионов в γ -уране, нагретого до температур не более 5000 К. Потенциальная энергия рассчитана в рамках термодинамической теории возмущений с помощью псевдопотенциального и полноэлектронного расчетов. Также изучено влияние нагрева электронов и обнаружено, что электронный коэффициент Грюнайзена Γ_e γ -урана равен 2 при $T_e = 5000$ К и двукратном сжатии, что выше значения ионного коэффициента Грюнайзена (2).

Рассмотрено влияние гидростатического сжатия/растяжения на стабильность α_1 -фазы урана, обусловленной появлением волн зарядовой плотности. Показана неэквивалентность схем смещения атомов (3) в смысле предсказываемых равновесных параметров решетки и энергии α_1 -фазы. Найдено критическое давление гидростатического сжатия, делающее переход в α_1 -уран энергетически невыгодным, которое оказалось равным 2,5 ТПа. Получены значения смещений атомов, минимизирующих энергию α_1 -урана, которые равны 0,056 и 0,068 Å для полноэлектронного и псевдопотенциального расчетов.

Литература.

1. Adak S., Nakotte H., de Châtel P. F. et al // Physica B. 2011. V. 406. P. 3342.
2. Мигдал К. П., Покашашкин П. А., Янилкин А. В. // ТВТ. 2015. отправлено в печать.
3. Dewaele A., Bouchet J., Occelli F. et al // Phys. Rev. B. 2013. V. 88. P. 134202.

4-55

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ СВОЙСТВ УРАНА МЕТОДАМИ ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛА И APW

К. П. Мигдал, А. В. Янилкин

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

E-mail: aleyanilkin@gmail.com

FIRST-PRINCIPLES CALCULATIONS OF URANIUM PROPERTIES BY PSEUDOPOTENTIAL AND APW METHODS

K. P. Migdal, A. V. Yanilkin

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

E-mail: aleyanilkin@gmail.com

We considered α -, γ - and bct- uranium and carried out calculations of total energies and enthalpies for these polymorphs in the range of densities from 18.4 to 40.1 g/cc.

The stability of the polymorphs is investigated at hydrostatic compression up to 1 TPa. Using the Bain path we obtain the lattice parameters of equilibrium bct-uranium at densities in the discussed range. Predicted in our work polymorph transition from α - to bct-uranium takes place at 0.28 TPa which is in a good agreement with the calculated previously result (1). In the whole density range bct-uranium is found to be more stable, than γ -uranium.

The check of accuracy of calculated forces and potential contributions to thermal energies was provided for fixed temperatures up to 5000 K. The potential contributions were calculated using the thermodynamic perturbation theory by pseudopotential and full-electron approaches. We investigated an effect of electron heating and determined electron Grüneisen at 5000 K and $V/V_0 = 0.5$ to be equal to 2 which is greater, than predicted ionic Grüneisen (2).

The transition to α_1 -uranium polymorph which occurs due to charge densities waves was considered at different volumes. Nonequivalence of two proposed atomic displacement schemes (3) was shown for this transition. Calculation of a critical pressure at which α_1 -uranium becomes unstable, gives 2.5 GPa. Using pseudopotential and full-electron approaches we obtained the atomic shifts minimizing α_1 -uranium total energy, are equal to 0.056 and 0.068 Å.

Literature.

1. Adak S., Nakotte H., de Châtel P. F. et al // Physica B. 2011. V. 406. P. 3342.
2. Migdal K. P., Pokatashkin P. A., Yanilkin A. V. // High Temperature. 2015. in press.
3. Dewaele A., Bouchet J., Occelli F. et al // Phys. Rev. B. 2013. V.88. P.134202.

4-56

ПРИМЕНИМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕЙТЕРИДА ЛИТИЯ ПРИ СЖАТИИ

Д. В. Минаков^{1,2}, П. Р. Левашов^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва, Россия

E-mail: minakovd@ihed.ras.ru

В данной работе мы проанализировали влияние электронов внутренней оболочки Li и перекрытия псевдопотенциальных ядер на термодинамические свойства LiD при сжатии, используя метод функционала плотности и квантовой молекулярной динамики.

Расчеты холодной кривой не выявили существенного влияния электронов 1s оболочки лития на давление в веществе вплоть до пятикратного сжатия. Однако расчеты ударных адиабат с использованием одного

или трех валентных электронов для лития дают различные результаты уже при давлениях выше 200 ГПа. Анализ показал, что данный факт объясняется более слабым отталкиванием ионов лития с замороженной внутренней электронной оболочкой, а не возбуждением внутренних электронов.

В данной работе мы оценили условия, при которых одноэлектронный псевдопотенциал для лития неприменим для расчетов разупорядоченной фазы. В результате квантовых молекулярно-динамических расчетов получены данные о термодинамических свойствах дейтерида лития при ударно-волновом сжатии вплоть до давления 1,4 ТПа, а также при повторном сжатии до давления 1,2 ТПа. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными, в том числе с новыми данными Национальной лаборатории Сандии по повторному ударному сжатию LiD.

APPLICABILITY OF DIFFERENT PSEUDOPOTENTIALS FOR CALCULATIONS OF THERMODYNAMIC PROPERTIES OF LITHIUM DEUTERIDE UNDER COMPRESSION

D. V. Minakov^{1,2*}, P. R. Levashov^{1,2}

¹Joint Institute for High Temperature of RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russia

E-mail: *minakovd@ihed.ras.ru

In this work, we analyze the contribution of the inner-shell electrons of Li and overlapping of pseudopotential cores to thermodynamic properties of LiD under compression using density functional theory and quantum molecular dynamics.

At zero temperature, there is no noticeable influence of 1s electrons of Li on pressure up to fivefold compression. However, shock compression reveals significant difference in pressure in calculations with 1 or 3 valence electrons for Li at pressures higher than 200 GPa. Our analysis shows, that this fact can be explained by the weaker repulsion of Li ions with the frozen inner shell rather than by the excitation of the inner-shell electrons.

In this work, we estimate conditions at which the one-electron pseudopotential is inapplicable in the unordered phase. Also, we obtain new data about thermodynamic properties of LiD along the principle Hugoniot up to 1.4 TPa and on double shock compression of LiD up to 1.2 TPa. Our results are in a good agreement with available experiments, including recent experiments on double shock compression of LiD in Sandia National Laboratories.

4-57

МНОГОФАЗНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛИСТИРОЛА

В. М. Елькин, В. Н. Михайлов, Т. Ю. Михайлова

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

Email: v.m.elkin@vniitf.ru

Построено двухфазное уравнение состояния полистирола и предложен вариант фазовой диаграммы. Функциональное представление свободной энергии полистирола учитывает ионизацию вещества, и в пределе высоких температур, соответствует полностью ионизированному идеальному газу. Холодные составляющие энергии и давления при сверхвысоком сжатии предусматривают предельный переход к модели атома Томаса–Ферми. Уравнение состояния согласованно с имеющимися статическими и динамическими экспериментальными данными, а также с результатами расчетов по модели ТФПК в области сверхвысоких давлений и температур.

A MULTIPHASE EQUATION OF STATE FOR POLYSTYRENE

V. M. Elkin, V. N. Mikhaylov, T. Yu. Mikhaylova

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

Email: v.m.elkin@vniitf.ru

A two-phase equation of state and a phase diagram for polystyrene are proposed. The functional relation of free energy describes material ionization and corresponds to fully ionized ideal gas in the limit of high temperatures. At ultrahigh compressions the cold energy and pressure provide for transition to the Thomas–Fermi model in the limit. The equation of state is fit to available data from static and dynamic experiments, and from theoretical calculations with the Thomas–Fermi model with Kopyshv corrections at ultrahigh pressures and temperatures.

4-58

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ X16H15M3T1 И X13B2 ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ СУБМИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

С. С. Мокрушин¹, А. С. Майорова¹, С. Н. Малюгина¹,
А. В. Павленко¹, В. В. Сагарадзе²,
Н. В. Катаева², Е. Г. Волкова²

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

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург,
Россия

E-mail: dep5@vniitf.ru1

В докладе представляются экспериментальные исследования перспективных реакторных сталей X16H15M3T1 и X13B2 при ударно-волновом нагружении на легкогазовой пушке.

Для перспективной реакторной аустенитной стали X16H15M3T1 исследования проведены в диапазоне скоростей деформирования от $4 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^6$ с⁻¹ и длительности импульсов ударной нагрузки от 0,05 до 1 мкс. Получены данные о прочностных свойствах стали: зависимости откольной прочности, динамического предела упругости, для широкого диапазона температур от –90 до ~910°C. Проведен металлографический анализ сохраненных образцов и образцов-свидетелей.

Сталь X13B2 с ОЦК решеткой, выполняющая роль основы для широкого класса реакторных сталей, исследовалась в состоянии поставки и отжига. Исследования проведены при нормальной температуре и повышенной до 500°C. Получены данные по релаксации динамических пределов упругости и амплитуд фазовых предвестников по мере распространения упруго-пластической волны в материале. Определены зависимости откольной прочности в диапазоне скоростей деформирования от 10^4 до 10^6 с⁻¹, при скоростях соударения от 0,2 до 1,2 км/с, и условия протекания фазовых превращений при нормальной и повышенной температуре. Установлено, что для прогнозирования откольной прочности стали X13B2 можно использовать универсальную эмпирическую зависимость для материала в α фазе, материала претерпевшего $\alpha \leftrightarrow \epsilon$ превращение, и в исследованном диапазоне температур. Определены структурные изменения в образцах обусловленные воздействием ударных волн интенсивностью менее 4 ГПа.

**DYNAMIC PROPERTIES
OF REACTOR STEELS KH16N15M3T1
AND KH13V2 UNDER SHOCK-WAVE LOADING
OF SUBMICROSECOND SCALE**

S. S. Mokrushin¹, A. S. Maiorova¹, S. N. Malyugina¹,
A. V. Pavlenko¹, V. V. Sagaradze²,
N. V. Katayeva², Y. G. Volkova²

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

²M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of
Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

The paper presents experimental investigations of promising reactor steels Kh16N15M3T1 and Kh13V2 under shock-wave loading in a light-gas gun.

For a promising reactor austenite steel Kh16N15M3T1, the studies were conducted over the deformation velocity range from $4 \cdot 10^4$ to $3 \cdot 10^6$ s⁻¹ and at the shock-wave pulse duration from 0.05 to 1 μs. The following data for strength properties of steel was obtained: dependencies of the spallation strength, dynamic elastic limit for a wide temperature range from -90 to ~910°C. Metallographic analysis of the recovered samples and witness samples was carried out.

Steel Kh13V2 with the bcc lattice serving as a basis for a wide range of reactor steels was studied as-received and as-annealed. The studies were conducted at normal temperature and at the temperature elevated to 500°C. The data for relaxation of dynamic elastic limits and phase precursor amplitudes as the elastoplastic wave propagates in the material was also obtained. Dependencies of the spall strength over the deformation velocities ranging from 10^4 to 10^6 s⁻¹ at collision velocities ranging from 0.2 to 1.2 km/s, as well as the evolution conditions for phase transformations at normal and elevated temperatures were specified. It has been found that a universal empirical dependence for the material in α phase, as well as the material subjected to α ↔ ε transformation, and within the studied temperature range can be used to predict the spall strength of steel Kh13V2. Structural changes due to the effect of shock-waves of the intensity 4 GPa were determined.

4-59

**О НЕКОТОРЫХ АВТОМОДЕЛЬНЫХ
ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ РАЗВИТИЯ
НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И ВОЛНОВЫХ
ФРОНТОВ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ
С ДЕФЕКТАМИ**

О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,
Россия

E-mail: naimark@icmm.ru

Теоретическое и экспериментальное исследование посвящено изучению связи механизмов структурной релаксации, обусловленных различными типами метастабильных состояний в сплошных средах с дефектами, неустойчивостью деформирования и развитием разрушения в широком диапазоне интенсивностей нагружения. Показано, что «распад» метастабильных состояний сопровождается зарождением и развитием многомасштабных коллективных мод ансамблей мезодефектов (микросдвигов, микротрещин) в условиях неравновесных (структурно-скейлинговых) переходов и описывается кинетикой двух структурных переменных – тензора плотности дефектов, имеющего смысл деформации, обусловленной дефектами, и параметра структурного скейлинга, представляющего отношение двух характерных масштабов – среднего размера дефекта и расстояния между ними. На основе статистико-термодинамического описания установлены два критических значения параметра структурного скейлинга, определяющих различные области метастабильности термодинамического потенциала (неравновесной свободной энергии среды с дефектами) и типы многомасштабных коллективных мод ансамблей дефектов: автоволновые моды, характерные для механизмов локализованной пластической неустойчивости, и моды «обострения», приводящие к формированию очагов разрушения. Коллективные моды имеют природу автомодельных решений полученных эволюционных уравнений для обсуждаемых структурных переменных. Закономерности «возбуждения» и развития коллективных мод связываются с механизмами неустойчивости и разрушения в конденсированных средах с дефектами и использованы для объяснения оригинальных экспериментов: упруго-пластические переходы в ударных волнах (релаксация упругого предвестника, степенная универсальность пластических волновых фронтов в металлах и жидкостях), «резонансное» возбуждение множественных очагов разрушения при отколе, «волн разрушения», пространственно-временная универсальность статистики фрагментации в стеклах и керамиках.

Литература

1. Наймарк О. Б. О некоторых закономерностях скейлинга в процессах пластичности, разрушения, турбулентности. Физическая мезомеханика, 2015, 18(3), 71–83.
2. Наймарк О. Б. Неустойчивости в конденсированных средах, обусловленные дефектами // Письма в ЖЭТФ. – 1998. – Т. 67. – № 9. – с. 751–757.
3. 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, P. Mariano. – Boston, Birkhauser. – 2004. – P. 75–114.

**SELF-SIMILAR REGULARITIES
OF INSTABILITY DEVELOPMENT
AND WAVE FRONTS IN CONDENSED MATTER
WITH DEFECTS**

O. B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm,
Russia

E-mail: naimark@icmm.ru

Theoretical and experimental study is devoted to mechanisms of structural relaxation caused by different types of metastable states in continuous media with defects, strain instability and fracture in a wide range of load intensities. It is shown that the «decay» of the metastable states is accompanied by the origin and development of multi-scale collective modes of mesodeflects ensembles (microshears, microcracks) in a non-equilibrium (structural-scaling) transitions and is described by the kinetics of two structural variables – defect density tensor having a sense of deformation due to defects, and structural scaling parameter representing the ratio of two characteristic scales – the average size of the defect and the distance between them. On the basis of statistical and thermodynamic description two critical values of structural scaling parameter were defined for different areas of metastable thermodynamic potential (non-equilibrium free energy of solid with defects) and characteristic types of multi-scale collective modes in defects ensembles were found: auto-solitary modes that are characteristic of the mechanisms of localized plastic strain instability, and blow-up modes resulting in the formation of damage localization and fracture. Collective modes have the nature of self-similar solutions of evolution equations obtained for the structural variables of solid with defects. Dynamics of excitation and evolution of collective modes are linked to the mechanisms of instability and failure in condensed media with defects and used to explain the original experiments: elastic-plastic transition in shock waves (relaxation of the elastic precursor, universality of plastic wave fronts in metals and liquids), «resonant» excitation of multiple spall failure and «failure waves», spatial-temporal universality of fragmentation statistics in the glass and ceramics in wide range of load intensity.

References

1. Naimark O. B. Scaling regularities in plasticity, fracture and turbulence // *Physical Mesomechanics*, 2015, 18(3), 71–83. (in Russian)
2. Naimark O. B. Instabilities in condensed matter induced by defects // *JETPh Letters*, 1998. 67(9), 751–757. (in Russian)
3. 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, P. Mariano. – Boston, Birkhauser. – 2004. – P. 75–114.

4-60

**О ВОЛНЕ РАЗРЕЖЕНИЯ
В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ**

В. Н. Ногин

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

E-mail: v.n.nogin@vniitf.ru

Получено аналитическое решение для автономной волны разрежения в упругопластическом материале, уравнение состояния которого имеет вид $P = (\gamma - 1)\rho E + C_{0k}^2(\rho - \rho_{0k})$. Последовательно рассмотрены идеальная упругопластическая модель, модель с упрочнением при увеличении давления, модель с деформационным упрочнением, эффект Баушингера. Показано, что в пластической области возмущения распространяются со скоростью, меньшей объемной скорости звука.

**ON RAREFACTION WAVE
IN ELASTIC-PLASTIC MATERIAL**

V. N. Nogin

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

E-mail: v.n.nogin@vniitf.ru

An analytical solution is derived for self-similar rarefaction wave in an elastic-plastic material, whose state is described by the equation $P = (\gamma - 1)\rho E + C_{0k}^2(\rho - \rho_{0k})$. The paper successively considers an ideal elastic-plastic model, a model with hardening under increasing pressure, a strain hardening model, and the Bauschinger effect. It is shown that in the plastic region, perturbations propagate at velocities below the volume sound velocity.

4-61

**ЦИРКОНИЙ, КОММЕРЧЕСКИЕ
ЦИРКОНИЕВЫЕ СПЛАВЫ ZR-1%NB
И ZR-2.5%NB: $\alpha \rightarrow \omega$ ПРЕВРАЩЕНИЕ,
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ
ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ,
МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ**

А. В. Павленко¹, С. Н. Малюгина¹, С. С. Мокрушин¹,
А. С. Майорова¹, Д. Н. Казаков¹, О. Е. Козелков¹,
С. Ю. Филатов¹, А. В. Добромислов², Н. И. Талуц²

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

²Институт Физики Металлов УрО РАН, Екатеринбург,
Россия

E-mail: avpalenko@vniitf.ru

Представлены результаты исследования динамической прочности чистого йодидного циркония и циркония марки Э100, коммерческих циркониевых сплавов Э110, Э635 (Zr-1%Nb) и Э125 (Zr-2.5%Nb). Исследование динамических свойств проводили с использованием техники ударных волн. Нагружение плоских образцов осуществляли ударными волнами субмикросекундной длительности. Амплитуду ударных волн варьировали в диапазоне от 3 до 26 ГПа и контролировали с точностью 0,2%. Профили волн напряжений регистрировали интерферометрами VISAR и PDV с наносекундным временным разрешением и погрешностью измерения лучше 0,8%. В диапазоне от –180 до 1000°C изучено влияние температуры на величину откольной прочности и динамического предела упругости образцов.

Определены зависимости откольной прочности от скорости деформирования в диапазоне от 10^4 – 10^6 с⁻¹. Приведены экспериментальные данные по релаксации динамических пределов упругости циркония и циркониевых сплавов.

Установлены условия протекания фазового $\alpha \leftrightarrow \omega$ превращения в равновесных условиях и $\alpha \rightarrow \omega$ превращения в исследуемых материалах в ударных волнах.

Исследованы структурные изменения в материалах обусловленные воздействием ударных волн амплитудой до 12 ГПа, определены механизмы деформации и откольного разрушения.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках государственных контрактов № Н.4х.44.9Б.16.1012 и № Н.4х.44.90.13.1111.

**ZIRCONIUM, INDUSTRIAL ZIRCONIUM
ALLOYS ZR-1%NB AND ZR-2.5%NB:
 $\alpha \rightarrow \omega$ TRANSITIONS, TEMPERATURE
DEPENDENCES OF DYNAMIC BEHAVIOR,
DEFORMATION AND SPALLATION
MECHANISMS**

A. V. Pavlenko¹, S. N. Malyugina¹, S. S. Mokrushin¹,
A. S. Mayorova¹, D. N. Kazakov¹, O. E. Kozelkov¹,
S. Yu. Filatov¹, A. V. Dobromyslov², N. I. Taluts²

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

²M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, RAS Ural Branch,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: avpalenko@vniitf.ru

Dynamic strength of the pure zirconium iodide, zirconium E100, industrial alloys E110, E635 (Zr-1%Nb), and E125 (Zr-2.5%Nb) is studied and results of this study are presented. The dynamic behavior thereof was investigated through shock-wave loading. Plane samples were subjected to sub-microsecond shock waves with their amplitude varying from 3 to 26 GPa and controlled to the accuracy of 0.2%. VISAR-, and PDV-techniques with the nanosecond time resolution and the better than 0.8% measurement error were used to record stress wave profiles. Temperature effect on the value of dynamic elastic limit and spall strength of samples is investigated within –180 and 1000°C.

The spall strength dependences on strain rate within 10^4 – 10^6 s⁻¹ are constructed. Experimental data on relaxation of dynamic elastic limits of zirconium and its alloys are presented.

Conditions for the $\alpha \rightarrow \omega$ phase transition in the equilibrium state and for the $\alpha \leftrightarrow \omega$ transition in test materials in shock waves are determined.

Structural changes induced by shock waves with the up to 12 GPa amplitude in materials are investigated and mechanisms of deformation and spallation are determined.

This work was supported by the State Atomic Energy Corporation «Rosatom» under the State contracts No. H.4x.44.9Б.16.1012 and No. H.4x.44.90.13.1111.

4-62

**ОСОБЕННОСТИ
ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА – ЛЕ ШАТЕЛЬЕ
В AL-MG-MN СПЛАВЕ
С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ
СТРУКТУРОЙ**

А. Н. Петрова¹, А. Ю. Изюмова²,
И. А. Пантелеев², И. Г. Бродова¹

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

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,
Россия

E-mail: petrovanastya@yahoo.com

В данной работе исследовали механическое поведение алюминиевого сплава А5083 (система легирования Al-Mg-Mn), имеющего субмикроструктурную структуру, в процессе квазистатического растяжения в широком диапазоне скорости деформации от 10^{-5} до 10^{-2} с $^{-1}$. Для получения образцов, имеющих структуру со средним размером зерна 500 нм, применен метод динамического канально-углового прессования (ДКУП), который сочетает в себе высокоскоростную деформацию простым сдвигом и воздействие на материал ударных волн. В процессе статического растяжения деформацию на поверхности плоского образца регистрировали с помощью системы StrainMaster. Для построения полей продольной деформации использовали метод корреляции цифровых изображений. Кинетику процесса деформации также исследовали с применением метода инфракрасной термографии. Температуру на поверхности образцов регистрировали инфракрасной камерой FLIR SC5000.

В результате исследований получены и проанализированы деформационные кривые при растяжении с разной скоростью деформации. Определены пространственные параметры локализации пластической деформации в СМК сплаве при прерывистой текучести.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» №0120146333 при поддержке РФФИ (проект 15-02-03225).

**THE SPECIFICS
OF PORTEVIN – LE CHATELIER EFFECT
OF AL-MG-MN ALLOY
WITH SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURE**

A. N. Petrova¹, A. U. Izumova²,
I. A. Panteleev², I. G. Brodova¹

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

²Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia

E-mail: petrovanastya@yahoo.com

The mechanical behavior of aluminum A5083 alloy (Al-Mg-Mn) with submicrocrystalline structure was investigated during tensile tests in the wide range of strain rates (10^{-5} до 10^{-2} s $^{-1}$). The investigated material with average grain size of 500 nm was produced by means of Dynamic Channel Angular Pressing (DCAP). During DCAP the material deforms at high strain rate simple shear and shock wave. At tensile tests, deformation on the surface of flat sample was registered using StrainMaster system. To build up deformation field patterns the method of digital image correlation was used. The kinetics of deformation process was also studied by means of infrared camera FLIR SC5000.

As the results of investigations, deformation curves at different strain rates were obtained and analyzed. The space parameters of strain localization were defined for submicrocrystalline alloy in presence of discontinuous yielding.

The work was performed in the framework of State Task № 0120146333 (Struktura) with the financial support of RFBR (grant №15-02-03225).

4-63

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА AL-MG-MN СПЛАВА,
ПОЛУЧЕННОГО ИНТЕНСИВНОЙ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ,
НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ**

А. Н. Петрова^{1,2}, И. Г. Бродова¹,
С. В. Разоренов^{3,4}, Е. В. Шорохов⁵

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

²Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,
Россия

⁴Национальный исследовательский Томский
государственный университет, Томск, Россия

⁵Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: petrovanastya@yahoo.com

В последние несколько десятков лет исследования интенсивной пластической деформации, проводимые рядом научных коллективов во всем мире, показали позитивное влияние формирования субмикроструктурных и нанокристаллических структур на различные свойства металлических материалов. В частности, было показано, что статическая прочность и твердость материалов возрастает на 100–200%. В то же время, немногочисленные результаты исследования динамических свойств демонстрируют, что существенное измельчение зерна менее 1 мкм приводит к повышению динамического предела текучести всего на несколько десятков процентов, а откольная прочность может как увеличиваться, так и уменьшаться. Кроме того, информация об отклике таких материалов на ударно-волновое нагружение иногда неоднозначна. Для материалов на основе алюминия, как для материалов для авиационного и космического применения, работающих при экстремальных условиях, необходимо повышать динамические прочностные характеристики также, как и получать хорошее сочетание прочности и пластичности при статических скоростях деформации.

Представлены результаты исследования сопротивления высокоскоростной деформации и разрушению субмикроструктурного и нанокристаллического алюминиевых сплавов А5083 (хим. состав. Al (основа) – 4,4; Mg – 0,6; Mn – 0,11; Si – 0,23; Fe – 0,03; Cr – 0,02; Cu – 0,06 Ti, wt. %). Образцы в виде дисков толщиной 2 мм нагружались тонкой пластиной толщиной 0.4 мм, разогнанной до скорости 620–650 м/с. Максимальное давление ударного сжатия составляло от 4 до 5 ГПа, а скорость деформации в разгрузочной

части волны сжатия перед откольной разрушением варьировалась в пределах $(1,2-3) \times 10^5 \text{ c}^{-1}$. Анализируя зарегистрированные с помощью лазерного Доплеровского измерителя скорости VISAR профили скорости свободной поверхности образцов были определены динамический предел упругости σ_{HEL} , предел текучести Y и откольная прочность σ_{sp} сплавов.

Установлено, что упрочняющий эффект интенсивной пластической деформации сохраняется в исследованном сплаве при скоростях деформирования, соответствующих условиям ударно-волнового нагружения. Динамический предел упругости и динамический предел текучести субмикроструктурного сплава выше на 70–80%, чем у промышленного крупнокристаллического сплава. Измельчения зерна до нано-уровня приводит к дальнейшему повышению σ_{HEL} и Y . Откольная прочность также повышается при измельчении зерна менее 1 мкм.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № 01201463331 при поддержке РФФИ (проект №15-02-03225).

THE INFLUENCE OF THE GRAIN SIZE OF AL-MG-MN ALLOY PRODUCED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION ON DYNAMIC STRENGTH

A. N. Petrova^{1,2}, I. G. Brodova¹,
S. V. Razorenov^{3,4}, E. V. Shorokhov⁵

¹M. N. Miheev Institute of metal physics, Ural branch, Russian academy of sciences, Ekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

³Institute of problems of chemical physics, Russian academy of sciences, Chernogolovka, Russia

⁴National research Tomsk state university, Tomsk, Russia

⁵Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: petrovanastya@yahoo.com

In the last decades, studies of the severe plastic deformation conducted by several world research teams have allowed to determine the positive influence of ultrafine-grained and nano-scale structures formation on the variety of properties of the metallic materials. Namely, it is shown that the static strength and hardness of materials can be increased on 100–200%. At the same time, scarce results on dynamic mechanical properties demonstrate that strong grain refinement under 1 μm leads to the increasing of dynamic yield strength on tens of percent only, and the spall strength both slightly increases and decreases. Moreover, the information about the response of ultrafinegrained and nanostructured materials to shock wave loading is sometimes contradictory. For aluminum-based materials, as the materials for airspace applications operating at extreme conditions, it is necessary to increase dynamic strength as well as to obtain good combination of strength and plasticity at static strain rates.

Here the results of experimental investigations of the resistance of ultrafinegrained and nanostructured alumi-

num A5083 alloys (chemical composition is Al (base)–4.4, Mg – 0.6, Mn – 0.11, Si – 0.23, Fe – 0.03, Cr – 0.02, Cu – 0.06, Ti, wt. %) to high rate deformation and fracture are presented. The disc shape specimens of 2 mm thick were loaded by flat plate of 0.4 mm thick, which was accelerated to a velocity of 620–650 m/s using explosive devices. The loading conditions correspond to the maximum pressure of the impact compression of 4–5 GPa and to the strain rate of $(1.2-3) \times 10^5 \text{ s}^{-1}$. Dynamic elastic limit (Hugoniot elastic limit) – σ_{HEL} , yield strength – Y , and spall strength – σ_{sp} were determined by analyzing the recorded by means of the VISAR laser Doppler velocimetry experimental velocity profiles of the free surface of the specimens.

For investigated aluminum alloy, it was established that the hardening effect of severe plastic deformation is retained at strain rates that correspond to the conditions of shockwave loading. Hugoniot elastic limit and dynamic yield strength of the ultrafine-grained A5083 alloy are by 70–80% higher than of the industrial coarse-grained alloy. The grain refinement to nano-scale results in additional growth of σ_{HEL} and Y . The spall strength of both ultrafine grained and nanostructured alloys is increased.

This work was performed in the framework of the «Structura» State Task No. 01201463331 and was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project №15-02-03225).

4-64

МЕХАНИЗМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОКСИДОВ И СУЛЬФИДОВ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ БАРОДЕФОРМАЦИЯХ

В. П. Пилюгин¹, А. И. Анчаров², Ю. В. Соловьёва³,
Т. П. Толмачёв¹, Б. А. Гижевский¹

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

²Институт химии твердого тела и механосинтеза СО РАН, Новосибирск, Россия

³Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

E-mail: pilyugin@imp.uran.ru

Экспериментально установлено, что интенсивная деформация под высоким давлением соединений p -элементов и переходных d -металлов с серой и кислородом MeX ($\text{Me} = \text{Sn, Pb, Bi, Cu, Ag, Ti, Fe}$; $\text{X} = \text{O, S}$) приводит к химическому восстановлению металлов или, по крайней мере, к уменьшению их валентности в соединении. Представляет интерес установление механизмов подобных реакций при воздействии высоких внешних механических напряжений всестороннего сжатия и сдвиговых напряжений.

На настоящее время установлены данные по влиянию ряда параметров обработки и свойств соединений на проявление процесса распада, а именно давления, величины, скорости и температуры деформации и величины энтальпии соединения. Регистрация реак-

ции восстановления металлов из оксидов и сульфидов в настоящей работе проводилась электронно-микроскопическими и рентгеноструктурными методами после обработки, в том числе с применением интенсивного синхротронного излучения, а также по измерению электрического сопротивления образцов *in situ* при деформации под давлением. Оксиды и сульфиды являются диэлектриками или полупроводниками, поэтому в процессе бародеформации прямое измерение электросопротивления при переходе от мегаомного к микроомному диапазону значений и позволяет зафиксировать образование в образцах микроучастков, состоящих из чистых восстановленных металлов. Для ряда соединений существует скоростная пороговая зависимость реакции, что связано с критической концентрацией необходимой плотности точечных дефектов, преимущественно вакансий и необходимой критической скорости их миграции. Для некоторых оксидов, в частности BiO определен скоростной порог реакции по взрывной кинетике. Количество восстановленного металла соединений при прочих равных условиях находится в обратной зависимости от величины энтальпии соединения.

Структурные исследования выполнены в ЦКПЭМ ИФМ УрО РАН, Екатеринбург и СЦСТИ ИЯФ СО РАН, Новосибирск.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Деформация», № 01201463327).

MECHANISM OF METAL RECOVERY BY SEVERE DEFORMATION UNDER PRESSURE OF OXIDES AND SULFIDES

V. P. Pilyugin¹, A. I. Ancharov², Yu. V. Solov'eva³,
T. P. Tolmachev¹, B. A. Gizhevskii¹

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

²Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

³Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

E-mail: pilyugin@imp.uran.ru

It is established experimentally that severe deformation under high pressure of MeX (Me = Sn, Pb, Bi, Cu, Ag, Ti, Fe; X = O, S) compounds leads to metal recovery or at least valence reduction of metals in the compound. Mechanisms of such reactions under high hydrostatic compression of external mechanical stresses and shear stresses are of scientific interest.

Registration of the metal oxides and sulfides reduction in the present study was carried out by electron microscopy and X-ray diffraction techniques after the treatment as well as measuring the electric resistance of the samples during deformation. Oxides and sulfides are insulators or semiconductors, so in the process of deformation by pressure a direct measurement of the electrical resistance from a megohm to microhm values of one allows to fix the appearance of micro-areas of recovered pure metals.

For a number of compounds there is a speed threshold dependence of the reaction, due to the critical concentration of required density of point defects, especially vacancies, and required critical speed of their migration. For some oxides, such as BiO, speed threshold for explosive reaction kinetics was defined. The amount of reduced metal compounds is inversely proportional to the value of the enthalpy of the compound.

Structural measurements were carried out at CCA SSTRC, BINP SB RAS, Novosibirsk and at CCA TC NAM, IMP UB RAS, Yekaterinburg.

The research was carried out within the state assignment of FASO of Russia (theme «Deformation» No. 01201463327).

4-65

АТОМИСТИЧЕСКОЕ И КОНТИНУАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ АЛЮМИНИЯ И ЖЕЛЕЗА С ИНОРОДНЫМИ НАНОВКЛЮЧЕНИЯМИ

В. В. Погорелко, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: vik_ko83@mail.ru, mayer@csu.ru

Нанокompозиты и сплавы с алюминиевой и железной матрицами, усиленные наноразмерными включениями, являются перспективными материалами для различных приложений. Такие материалы могут иметь высокую жесткость, лучшую удельную сдвиговую прочность и другие высокие характеристики в сравнении с чистым материалом матрицы. Гетерогенность структуры является общей чертой сплавов и композитов. Наличие наноразмерных включений в матрице препятствует движению дислокаций, что ведет к увеличению сдвиговой прочности. С другой стороны, наличие включений, так же как и присутствие пор, может уменьшать динамические предел прочности (откольную прочность).

С использованием молекулярно-динамических расчетов, на примере Cu, Ti и Mg включений в Al матрице, и Ni включений в Fe матрице, мы рассмотрели три различных механизма уменьшения предела прочности материала с включениями в сравнении с чистым материалом матрицы. Первый механизм связан с концентрацией напряжений в матрице вблизи жесткого и твердого включения (Ti, Cu); в этом случае, разрушение происходит в матрице и не затрагивает включение. Второй механизм действует в случае мягкого и хрупкого включения (Mg); разрушение начинается внутри включения и затем распространяется в матрицу. Третий механизм связан с порядочностью атомов вдоль границы включения (Ni); в этом случае, меньшая энергия необходима для формирования поры в области вблизи поверхности включения.

Мы предложили континуальную модель разрушения нанокompозитов, которая основана на уравнениях нуклеации и роста пор; модель учитывает концентрацию напряжений вокруг включений. Сравнение с молекулярно-динамическими расчетами показывает, что континуальная модель позволяет нам описывать скоростные и температурные зависимости прочности нанокompозитов по крайней мере для скоростей деформации $\geq 0,1/\text{нс}$. При умеренных скоростях деформации, значения прочности, посчитанные с помощью континуальной модели, описывают экспериментальные данные для алюминиевого сплава 2024 с выделениями второй фазы.

**ATOMISTIC AND CONTINUUM
INVESTIGATION OF THE DYNAMIC TENSILE
STRENGTH OF ALUMINUM AND IRON WITH
NANOINCLUSIONS**

V. V. Pogorelko, A. E. Mayer

Chelyabinsk state university, Chelyabinsk, Russia

E-mail: vik_ko83@mail.ru, mayer@csu.ru

Nanocomposites and alloys with aluminum and iron matrices reinforced by the nanoscale inclusions are promising materials for various applications. They can have higher stiffness, better specific shear strength and other increased characteristics in comparison with a pure material of matrix. Heterogeneity of structure is a common feature of alloys and nanocomposites. The presence of nanoinclusions in matrix obstructs the motion of dislocations that leads to an increase of shear strength. On the other hand, the presence of inclusions, as well as the presence of pores, can decrease the dynamic tensile (spall) strength.

With the use of the molecular dynamics simulations, by examples of Cu, Ti and Mg inclusions in Al matrix, and Ni inclusions in Fe matrix, we consider three different mechanisms of reduction of the tensile strength of a material with inclusions in comparison with a pure material of matrix. The first mechanism is connected with a stress concentration in matrix near a stiff and strong inclusion (Ti, Cu); in this case, the fracture occurs inside the matrix and does not touch the inclusion. The second mechanism acts in the case of a soft and weak inclusion (Mg); the fracture begins inside the inclusion and thereafter propagates into the matrix. The third mechanism is connected with atoms disorder along surface of inclusion (Ni); in this case, the less energy is required for the voids formation in the area near at the inclusion surface.

We propose a continuum model of the nanocomposite fracture that is based on the equations of nucleation and growth of voids; the model takes into account the stress concentration around inclusions. A comparison with the MD results shows that the continuum model allows us to describe the rate and temperature dependences of the nanocomposite strength at least for strain rates $\geq 0.1/\text{нс}$. At moderate strain rates, the strength values that are calcu-

lated with the continuum model correspond to the experimental data for the aluminum alloy 2024 with the second phase precipitates.

4-66

**АМОРФИЗАЦИЯ В α -БОРЕ:
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ**

П. А. Покаташкин, П. Ю. Коротаев, А. В. Янилкин

Всероссийский Научно-исследовательский Институт
Автоматики им. Н. Л. Духова (ВНИИА), Москва, Россия

E-mail: p.a.pokatashkin@gmail.com

Тонкие аморфные полосы часто считаются причиной резкого изменения механических свойств в боронасыщенных керамиках. Цель работы исследовать возможные механизмы аморфизации методами крупномасштабного молекулярно-динамического моделирования.

Изучается процесс высокоинтенсивного нагружения на примере α -бора. При моделировании распространения ударных волн, а также одноосном сжатии (характерные скорости деформирования 10^8 – 10^9 с⁻¹), активируется система скольжения [101]/(010). Сдвиговая деформация приводит к нанодвойникованию. В работе производится исследование этого дефекта. В ходе статических и динамических расчетов показано, что нанодвойник не может аморфизоваться сам по себе. Он остается стабильным при высоких давлениях и температурах. Тем не менее, сопутствующая пластическая деформация приводит к локальному увеличению плотности, что и является предшественником аморфизации. Показано, что сдвиг в плоскости (010) и аморфная зона начинаются в одном месте, что согласуется с экспериментальными наблюдениями. Аморфная зона крайне чувствительна к локальным упругим полям, поэтому предпочтительных направлений распространения не обнаружено. Этим объясняется разнообразие кристаллографических плоскостей, в которых наблюдаются аморфные зоны.

**AMORPHIZATION IN α -BORON:
A MOLECULAR DYNAMICS STUDY**

P. A. Pokatashkin, P. Yu. Korotaev, A. V. Yanilkin

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

E-mail: p.a.pokatashkin@gmail.com

Thin amorphous bands are often thought to be the cause of drastic change of properties in boron-rich ceramics. The purpose of present work is investigating possible mechanisms of amorphization by performing large-scale molecular dynamics simulations.

High-intensity loading of α -boron is studied. Modeling of shock waves propagation and uniaxial loading (typical strain rates 10^8 – 10^9 s $^{-1}$) shows activation of the [101]/(010) slipping system. Shear deformation leads to nanotwinning. The properties of this defect are studied. Both static and dynamic calculations show no evidence that the nanotwin can become amorphous. It remains stable at high pressures and temperatures. However, inherent plastic deformation leads to local increasing of density that is the precursor of so-called amorphization. It is shown that shear in the (010) plane and amorphous zone are originating from one place, which is in agreement with experimental observations. Amorphous zone is highly sensitive to local strain fields. That is why we cannot distinguish preferable direction of its propagation. That is the reason why amorphous zones are found in a big variety of crystallographic planes.

ханизма двойникования и уменьшения вероятности протекания процессов возврата и рекристаллизации при высокоскоростной деформации. По сравнению с чистой медью бронза упрочняется быстрее и для нее может быть достигнута более высокая твердость, чем для меди. Однако в бронзе существует опасность образования трещин, для преодоления которой рекомендуется проводить более тщательную подготовку сплава в исходном состоянии, а именно, выравнивать состав по всему объему и минимизировать концентрацию газовых примесей, способствующих образованию неметаллических включений и пор.

4-67

**ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ
ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ И МЕДИ ПРИ
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ**

В. В. Попов¹, А. В. Столбовский¹, Е. Н. Попова¹,
Р. М. Фалахутдинов¹, Е. В. Шорохов²

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

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

E-mail: vpopov@imp.uran.ru

Исследованы структура и свойства образцов оловянистой бронзы и меди, полученных методом высокоскоростной динамической деформации – так называемого динамического канально-углового пресования (ДКУП) и проведено сравнение эволюции их структуры и достигаемых при такой обработке свойств. Исследования выполнены методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии и дюротрии.

Исследование структуры бронзы в исходном отожженном состоянии показало, что в ней, в отличие от меди, присутствует газовая пористость, и образуются оксидные включения. Это, по-видимому, объясняется неоптимальными условиями выплавки, следствием чего является относительно высокая концентрация газовых примесей.

Обнаружено, что в отличие от меди, в которой деформация осуществляется исключительно скольжением, в случае бронзы реализуются оба механизма деформации: и скольжение, и двойникование, причем двойникование превалирует. Это является следствием того, что легирование меди оловом понижает энергию дефектов упаковки.

Показано, что результатом легирования является более интенсивное упрочнение за счет включения ме-

**EVOLUTION OF STRUCTURE OF TIN BRONZE
AND COPPER AT HIGH-SPEED DYNAMIC
DEFORMATION**

V. V. Popov¹, A. V. Stolbovsky¹, E. N. Popova¹,
R. M. Falahutdinov¹, E. V. Shorohov²

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

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

E-mail: vpopov@imp.uran.ru

The structure and properties of specimens of tin bronze and copper processed by high-speed dynamic deformation, the so-called dynamic channel-angular pressing (DCAP) have been studied, and evolution of their structure and the properties achieved at such treatment are compared. The research has been carried out by the methods of optical, scanning and transmission electron microscopy and microhardness measurements.

The study of bronze structure in its initial annealed state has shown the presence of gas porosity in it and some oxide inclusions, contrary to copper where they are not observed. These features are obviously due to non-optimal melting conditions of the former, which result in relatively high concentration of gas impurities.

Contrary to copper, in which deformation is realized exclusively by dislocation glide, in the bronze both mechanisms of plastic deformation, sliding and twinning, are realized, the latter being prevailing. This results from the decrease of stacking fault energy in case of copper doping by tin.

It is demonstrated that the result of doping is more intensive strengthening of bronze due to twinning mechanism along with less probable occurring of recovery and recrystallization processes under the high-speed deformation. Compared to pure copper, the bronze strengthens faster, and higher hardness can be achieved in it. However, there is a danger of bronze cracking, and to overcome this problem it is recommended to optimize preparation of bronze specimens in the initial state, namely, to homogenize their composition throughout the whole bulk and to minimize concentration of gas impurities which cause the formation of non-metal inclusions and pores.

4-68

ДИНАМИКА ЗАТУХАНИЯ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА В АЛЮМИНИИ И ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТЕ

*Т. В. Попова¹, А. Е. Майер¹, К. В. Хищенко²¹Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

*E-mail: tatyana_maskaeva@mail.ru

Высокоскоростное столкновение пластины ударника и пластины мишени генерирует импульс сжатия, который состоит из ударной волны и последующей волны разряжения. Распространение этого импульса внутрь образца вызывает пластическую деформацию и изменение микроструктуры, в то время как его отражение в виде импульса растяжения может привести к откольному разрушению. Изменение микроструктуры и явление откола чувствительны к амплитуде удара, которая уменьшается с расстоянием из-за того, что волна разряжения догоняет ударную волну. Амплитуда импульса уменьшается, в то время как его толщина (продолжительность) в результате увеличивается. Это было показано в работе [1] на основе дислокационной модели пластичности, упругопластические свойства существенно влияют на эволюцию ударной волны и, в частности, на ее взаимодействие с волной разряжения в металлах. В этом случае импульс сжатия был сгенерирован высокоскоростным соударением пластин. С другой стороны, в работе [2] на основе модели Максвелла было показано, что в полиметилметакрилате (ПММА) изменение амплитуды ударной волны с глубиной примерно одинаково для гидродинамического и вязкоупругого случаев. В этом случае, импульс сжатия был сгенерирован с помощью импульса давления, приложенного к поверхности образца. Параметры модели Максвелла выбраны исходя из сравнения с экспериментальными данными. Для расчета зависимости давления от плотности и внутренней энергии использовано калорическое уравнение состояния. Цель данной работы состоит в более детальном изучении влияния упругопластических/вязкопластических свойств на эволюцию импульса сжатия в металлах на примере алюминия и полимеров на примере ПММА. Сравнение выполняется для близких параметров импульса сжатия и условий их генерации. Результаты не только позволяют отделить влияние материала от влияния параметров импульса, но и выявить диапазон параметров, в пределах которого упругопластические/вязкопластические свойства должны быть приняты во внимание для правильности расчетов динамики импульса сжатия.

Литература

1. Mayer, A. E. and Khishchenko, K. V. and Levashov, P. R. and Mayer, P. N. Modeling of plasticity and fracture of met-

als at shock loading. J. Appl. Phys., V. 113, № 19, p.193508, 2013.

2. Popova, T. V. and Mayer, A. E. and Khishchenko, K. V. Numerical investigations of shock wave propagation in polymethylmethacrylate. J. Phys.: Conf. Ser., V.653, № 012045, 2015.

DYNAMICS OF SHOCK PULSE ATTENUATION IN ALUMINUM AND POLYMETHYLMETHACRYLATE

*T. V. Popova¹, A. E. Mayer¹, K. V. Khishchenko²¹Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: tatyana_maskaeva@mail.ru

High-velocity impact of the impactor plate and the target plate generates compression pulse, which is composed of a shock wave and a following rarefaction wave. Propagation of this pulse inside the sample applies plastic deformation and microstructure change, while its reflection in the form of tension wave causes spall fracture. Microstructure change and the effect of spallation are sensitive to the shock amplitude, which decreases with distance due to overtaking of the shock wave by the rarefaction wave. The pulse amplitude decreases, while its thickness (duration) increases as a result. It had been shown in the work [1] on the basis of dislocation plasticity model that elastoplastic properties significantly effect the shock wave evolution and, particularly, its overtaking by the release wave in metals. The compression pulse had been generated by high-velocity plate impact in this case. On the other hand, it had been shown in the work [2] on the basis of Maxwell model that the changes of the shock wave amplitude with the depth are approximately identical in the hydrodynamic and viscoelastic cases in polymethylmethacrylate (PMMA). The compression pulse in the later case had been generated by a pressure pulse applied to sample surface. Parameters of the Maxwell model are chosen by comparison with the experimental data. A caloric equation of state is used to calculate the pressure from density and internal energy. Purpose of present work consists in a more detailed study of the elastoplastic/viscoplastic properties influence on the compression pulse evolution in metals by an example of aluminum and in polymers by an example of PMMA. Comparison is performed for close compression pulse parameters and conditions of their generation. The results not only allow one to separate the effect of material from the influence of the pulse parameters, but also to identify the parameter range, within which the elastoplastic/viscoplastic properties should be taken into account for correctness of calculations of the compression pulse dynamics.

References

1. Mayer, A. E. and Khishchenko, K. V. and Levashov, P. R. and Mayer, P. N. Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading. J. Appl. Phys., V. 113, № 19, p.193508, 2013.

2. Popova, T. V. and Mayer, A. E. and Khishchenko, K. V. Numerical investigations of shock wave propagation in poly-methylmethacrylate. *J. Phys.: Conf. Ser.*, V.653, № 012045, 2015.

4-69

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ЦЕРИЙ

С. А. Атрошенко¹, А. А. Лукин², В. А. Морозов²,
Г. Г. Савенков³, А. Н. Зубарева⁴, А. В. Уткин⁴

¹Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург,
Россия

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

³Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет), Санкт-Петербург,
Россия

⁴Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,
Россия

На образцы в виде пластинок церия толщиной 0,9–1,1 мм воздействовали сильноточным электронным пучком (СЭП) (со средней энергией электронов 250 кэВ) наносекундной длительности (20–50 нс). Тыльной стороной пластинки устанавливались на пьезокварцевый датчик, с помощью которого пытались зафиксировать интенсивность упругой волны напряжения, возникающей в мишени при ее взаимодействии с электронным пучком. Однако зафиксировать указанные напряжения не удалось, реакция датчика на напряжения отсутствовала. Такие результаты позволяют сделать вывод о сильнейшем затухании термомеханических упругих напряжений в пластинках церия.

Металлографические исследования испытанных образцов позволили установить, что они состоят из двух слоев – тонкого приповерхностного и основного (подложки). В приповерхностном слое толщиной от 80 до 150 мкм в нетравленном состоянии обнаружены в большом количестве микротрещины и микропоры, при травлении этот слой был светлым по отношению к основному металлу, при этом тонкая структура практически не выявлялась, что указывало на ее полную или частичную аморфизацию. Высказаны предположения: 1) приповерхностный слой является результатом воздействия двух факторов СЭП: непосредственно самого пучка электронов и катодного факела, представляющего, по сути, металлическую плазму; 2) затухание упругих напряжений обусловлено большими потерями их энергии, связанные с образованием дефектов в приповерхностном слое.

Микроструктура в центре образца церия представляет собой фрагментированные зерна с большим количеством двойников, типичных для высокоскоростного нагружения. Ближе к тыльной поверхности изменение микроструктуры отсутствует.

PECULIARITIES OF EFFECT OF HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM ON THE CERIUM

S. A. Atroshenko¹, A. A. Lukin², V. A. Morozov²,
G. G. Savenkov³, A. N. Zubareva⁴, A. V. Utkin⁴

¹Institute of problems of mechanical engineering RAS,
Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg state University, Saint-Petersburg, Russia

³Saint-Petersburg State Technological Institute
(technical university), Saint Petersburg, Russia

⁴Institute of problems of chemical physics RAS,
Chernogolovka, Russia

The samples of cerium in the form of plates with thickness 0.9–1.1 mm was subjected by high-current electron beam (HCEB) (with an average electron energy 250 keV) by nanosecond duration (20–50 ns). The rear side of the plate was installed on a piezoelectric quartz sensor with which we tried to capture the intensity of the elastic wave stresses appearing at the target during its interaction with the electron beam. However, to fix these stresses fails, the sensor response to stress was absent. These results suggest the strong attenuation of thermomechanical elastic stresses in cerium plates.

Metallographic examination of the tested samples revealed that they consist of two layers – a thin surface and core (substrate). In the surface layer with a thickness of 80 to 150 microns in not etched condition a large number of microcracks and micropores was detected. After etching this layer was light compared to the base metal, while the fine structure practically was not detected, indicating its complete or partial amorphization. Assumptions: 1) the surface layer is a result of two factors (HCEB): direct beam of electrons and a cathode torch, representing, in fact, the metal plasma; 2) the attenuation of elastic stresses due to large losses of energy associated with the formation of defects in the surface layer.

The microstructure in the center of a cerium sample is fragmented grains with a large number of twins, typical for high-speed loading. Toward the back surface microstructure change is absent.

4-70

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ ТРЕЩИН ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

А. В. Кузнецов¹, А. А. Лукин², В. А. Морозов²,
А. Ю. Григорьев³, Г. Г. Савенков^{1,3}

¹Машиностроительный завод «Армалит», Санкт-Петербург,
Россия

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

³Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет), Санкт-Петербург,
Россия

С применением магнитно-импульсного метода определена скорость движения трещины в кольцевых образцах с *V*-образным надрезом и углом при вершине 600, изготовленных из фольги толщиной 30 мкм из стали 12Х18Н10Т с пределом прочности $\sigma_B = 1,6$ ГПа. Длительность импульса нагружения составляла 2–5 мкс, расчетная скорость деформации $\sim 10^4$ с⁻¹. Для всех испытанных образцов скорость трещины находилась в диапазоне 200 ± 10 м/с.

Исследована поверхность разрушения образцов. Установлено, что разрушение металла на начальном этапе движения трещины реализовалось с участием трансляционных и ротационных мод деформации в форме вихревого механического поля. На электронно-микроскопическом изображении наличие изгибной (вихревой) компоненты механического поля подтверждается локальными участками светлой «засветки» и микротрещиной. Последующее общее разрушение ленты происходило в условиях релаксации напряжений за счет микропластических деформаций, реализованных механизмом образования и слияния пор.

THE STUDY OF VELOCITIES OF CRACKS AT HIGH STRAIN RATES IN STAINLESS STEEL 12KH18N10T

A. V. Kuznetsov¹, A. A. Lukin²,
V. A. Morozov², G. G. Savenkov^{1,3}

¹Machine Building Plant «Armalit», St. Petersburg, Russia

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

³Saint-Petersburg State Technological Institute
(technical university), Saint Petersburg, Russia

With the use of magnetic-impulse method determined by the velocity of the crack in annular specimens with a *V*-shaped incision and the apex angle of 600, made of foil with a thickness of 30 microns made of 12X18H10T steel with a tensile strength of $\sigma_B = 1.6$ GPa. The duration of pulse loading was 2–5 μ s, the calculated strain rate of $\sim 10^4$ s⁻¹. For all samples tested the speed of the cracks was in the range of 200 ± 10 m/s.

Investigated the fracture surface of the samples. It is established that the destruction of the metal at the initial stage of movement of the crack was realized

with the participation of the translational and rotational modes of deformation in the form of vortex mechanical field. On electron-microscopic image, the presence of Flexural (vortex) components of the mechanical field is confirmed by the local sections of the light «exposure» and a hairline fracture. The subsequent total destruction of the tapes occurred in the conditions of stress relaxation due to micro-plastic deformations implemented by the mechanism of formation and merging of pores.

4-71

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛЕГКИХ АКТИНИДОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ

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

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

В связи с перспективами применения в ядерной энергетике замкнутого плутоний-уран-ториевого цикла важно знать временную границу сохранения функциональных свойств в микро-образцах легких актинидов, находящихся в экстремальных условиях.

Методы нелинейной физики позволяют установить универсальные признаки эволюции неравновесных систем, обусловленные коллективными эффектами и явлениями самоорганизации в возникающих диссипативных структурах в неравновесных системах.

В работе показано, что физическая природа долговечности легких актинидов, находящихся в экстремальных условиях (плотность поглощенной энергии $dE/dm \sim 0,05 - 0,3$ эВ/атом) в диапазоне неравновесных состояний $t \sim 10^{-6} - 10^{-10}$ с, определена временем образования критической плотности каскада центров разрушения, меняющей связность тела. Каскад центров разрушения является перколяционным кластером. Долговечность складывается из времени ожидания появления центров разрушения $t_{ож}$ и времени кластеризации каскада центров разрушения t_k , когда возникает связность в системе центров разрушения, и возникает перколяционный кластер.

Методом нормированного размаха (R/S-метод) определен показатель Херста распределения центров разрушения и фрактальная размерность каскада центров разрушения в ряде металлов, подвергнутых воздействию теплового удара.

Единый механизм процесса динамического разрушения, единый параметр порядка (плотностная переменная – плотность центров разрушения) и одинаковая размерность пространства, в котором протекает процесс, определяют физическую природу долговечности металлов, включая делящиеся материалы.

Литература

1. Ильяев Р. И., Пунин В. Т., Учаев А. Я., Новиков С. А., Кошелева Е. В., Платонова Л. А., Сельченкова Н. И., Юкина Н. А. Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения // ДАН, 2003, том 393, № 3. – С. 326–331.
2. А. Я. Uchaev, V. T. Punin, N. I. Selchenkova, E. V. Kosheleva and V. V. Kosachev. Physical nature of light actinides longevity in the dynamic failure phenomenon // Physics of Atomic Nuclei, 2015, №. 12. – P. 1-4
3. Кошелева Е. В., Пунин В. Т., Сельченкова Н. И., Учаев А. Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений: монография – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2015. – 211 с.

**PHYSICAL NATURE OF LIGHT ACTINIDE
LONGEVITIES IN THE DYNAMIC FAILURE
PROCESSES**

E. V. Kosheleva, N. I. Selchenkova, A. Ya. Uchaev

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

Due to the prospects of application of closed plutonium-uranium-thorium cycle in nuclear power engineering, it is important to know the time boundary of functional properties maintenance in micro-samples of light actinides under extreme conditions.

Nonlinear physical methods allow determination of universal attributes for non-equilibrium systems' evolution, conditioned by collective effects and self-organization phenomena in originating dissipative structures in non-equilibrium systems.

The paper shows that physical nature of light actinide longevity under extreme conditions (absorbed energy density $dE/dm \sim 0,05 - 0,3$ eV/atom) in the nonequilibrium state range $t \sim 10^{-6} - 10^{-10}$ s, is specified by formation time of critical failure centers' cascade density, changing the body connectivity. Failure centers' cascade is a percolation cluster. The longevity is formed from the waiting time of failure centers' appearance t_w and clustering time of failure centers' cascade t_{cl} , when connectivity originates in the failure centers' system, and the percolation cluster appears.

The Hearst index was determined by a normalized method (R/S-method) for distribution of failure centers and fractal dimension of failure centers' cascade in a number of metals, exposed to thermal shock action.

A unique mechanism of the dynamic failure process, a single order parameter (density variable – failure centers' density) and equal space dimension, where the process is going on, specify the physical metal longevity nature, involving fissile materials.

References

1. Il'kaev R. I., Punin V. T., Uchaev A. Ya., Novikov S. A., Kosheleva E. V., Platonova L. A., Selchenkova N. I., Yukina N. A. Time regularities of dynamic metals' failure process, conditioned by hierarchy properties of dissipative structures – failure centers' cascade // RAS, 2003, vol. 393, № 3. – P. 326–331. (in Russian)
2. A. Ya. Uchaev, V. T. Punin, N. I. Selchenkova, E. V. Kosheleva and V. V. Kosachev Physical nature of light actinides longevity in the dynamic failure phenomenon // Physics of Atomic Nuclei (Fiz. At. Yad.), 2015, №. 12. – P. 1–4
3. E. V. Kosheleva, V. T. Punin, N. I. Selchenkova, A. Ya. Uchaev. General regularities of hierarchy relaxation processes in metals under the action of penetrating radiation pulses: a monograph – Sarov: RFNC-VNIIEF, 2015. – 211 p. (in Russian)

4-72

**ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВИНЦА
ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

Н. А. Смирнов

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

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

В работе исследовался ряд термодинамических свойств кристаллического свинца при сжатии. Первопринципные расчеты были выполнены с обменно-корреляционным функционалом в обобщенном градиентном приближении (GGA) с учетом и без учета спин-орбитального взаимодействия. Исследовано влияние на результаты вычислений спин-орбитального взаимодействия, как при нормальных условиях, так и под давлением. Кроме этого, была исследована относительная устойчивость ряда плотноупакованных структур свинца при сжатии и изучена возможность структурных фазовых переходов в этом металле при давлениях выше 200 ГПа.

**THERMODYNAMIC PROPERTIES
OF LEAD UNDER HIGH PRESSURES
FROM AB INITIO CALCULATIONS**

N. A. Smirnov

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

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

In this paper we have investigated a series of thermodynamic properties of lead crystals under compression. Ab initio calculations were performed with the exchange-correlation functional in generalized gradient approximation (GGA) with and without spin-orbit interaction. The influence of spin-orbit coupling effects is investigated

under ambient conditions and under compression. Also studied are the relative stability of some close-packed structures under pressure and the possibility of structural phase transitions in Pb at pressures above 200 GPa.

4-73

**СТРУКТУРНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ
И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ
Ni₃X (X = Ge, Al, Fe) ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ
ДЕФОРМАЦИЯХ ПОД ВЫСОКИМ
ДАВЛЕНИЕМ**

В. П. Пилюгин¹, Ю. В. Соловьёва², А. И. Анчаров³,
В. А. Старенченко², С. В. Старенченко², Б. А. Гринберг¹,
А. М. Пацелов¹, Т. П. Толмачёв¹, А. В. Плотников¹

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

²Томский государственный архитектурно-строительный
университет, Томск, Россия

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Россия

E-mail: pilyugin@imp.uran.ru, star@tsuab.ru

Упорядоченные по типу L1₂ сплавы на основе никеля Ni₃X (X = Ge, Al, Fe) представляют интерес как составная часть жаропрочных материалов, применяемых в энергомашиностроении, в авиационной и космической технике. Особый интерес представляют монокристаллы Ni₃Ge, в которых при определенных ориентациях ярко проявляется эффект аномальной зависимости физического предела текучести по шкале температур с максимумом около 873 К. Физическим механизмом причины проявления аномального эффекта является самоблокировка сверхдислокаций.

В работе проведено комплексное структурное исследование влияния холодной, теплой и с нагревами (80–600 К) пластической деформации под высоким квазигидростатическим давлением (8–10 ГПа) от малых начальных величин до мегапластических (5–7 ед. истинной деформации) с изучением характера разрушения излома и измерения механических свойств *in situ* в процессе барической и деформационной обработки. Малые деформации приводят к началу развития процессов потери ориентационной устойчивости монокристаллов, которые выражаются в появлении объемных областей монокристаллов, отличных по ориентировке от исходного монокристалла. В дальнейшем, по мере повышения деформации эти процессы развиваются, монокристаллы переходят в поликристаллический агрегат с одновременным фазовым переходом «упорядоченное состояние – разупорядоченное состояние». Дальнейшая деформация до мегапластических величин приводит к формированию разупорядоченного сплава с нанокристаллическим масштабом кристаллитов. Изучено как структурное состояние оказывает влияние на характер изло-

мов при разрушении деформированных образцов. Исходное монокристаллическое состояние Ni₃Ge при их изгибном разрушении дает картину хрупкого излома по плоскостям спайности. Начальная деформация слегка трансформирует картину, нарушая ровные сколы искривлениями. Рост деформации приводит к появлению перетяжек в областях разупорядочения и границ еще упорядоченных поликристаллов. Деформационное разупорядоченное состояние проявляется межкристаллитным нанокристаллическим изломом. Переход к сплавам с более низкими значениями энергии антифазных границ Ni₃Fe, Ni₃Al сказывается на характере изломов тем, что исходное моно- и деформационное поликристаллическое состояния характеризуется менее ярко выраженным хрупким изломом. Величина деформации перехода к разупорядоченному наноструктурному состоянию происходит при меньших значениях, чем в сплаве Ni₃Ge. Измерены *in situ* напряжения сдвига сплава Ni₃Ge при различных температурах, получено проявление аномальных механических свойств монокристаллов по температуре, аналогичное аномалии физического предела текучести.

Исследование выполнено частично при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-03-00182-а и в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Деформация», № 01201463327).

**STRUCTURAL FRAGMENTATION
AND MECHANICAL PROPERTIES
OF Ni₃X (X = Ge, Al, Fe) SINGLE CRYSTALS
UNDER SEVERE DEFORMATION
AT HIGH PRESSURE**

V. P. Pilyugin¹, Yu. V. Solov'eva², A. I. Ancharov³,
V. A. Starenchenko², S. V. Starenchenko²,
B. A. Greenberg¹, A. M. Patselov¹,
T. P. Tolmachev¹, A. V. Plotnikov¹

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of
Sciences, Ekaterinburg, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk,
Russia

³Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB
RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: pilyugin@imp.uran.ru, star@tsuab.ru

Ordered by type L1₂ nickel-based alloys Ni₃X (X = Ge, Al, Fe) are of great interest as a part of the heat-resistant materials used in power engineering, aviation and space technology. Ni₃Ge single crystals under the certain orientations demonstrate the pronounced effect of the anomalous temperature dependence of the flow stresses with the peak temperature around 873 K. The superdislocation self-locking is the main physical mechanism causes the anomalous behavior of these alloys.

The paper conducted a comprehensive structural study of the influence of cold, warm and with heating (80–600 K) of plastic deformation at high hydrostatic pressure (8–10 GPa) of the small initial quantities to mega plastic (5–7 units of true strain) to the study of the

nature of destruction measuring and fracture mechanical properties in situ during the isobaric and deformation processing. Small deformation leads to the top of the loss of stability of the process orientation of single crystals, which are expressed in the appearance of bulk regions of single crystals, differing in the orientation of the original single crystal. In the future, with increasing deformation of these processes are developing, moving in single crystals, polycrystalline aggregate with simultaneous phase transition ordered state – disordered state. Further deformation to mega plastic quantities leads to the formation of a disordered alloy with nanocrystalline scale crystallites. It was studied as a structural condition has an impact on the nature of fracture of the deformed samples. The bending fracture of Ni₃Ge single crystals at the initial state when gives a picture of brittle fracture along cleavage planes. The initial deformation transforms the picture slightly, breaking the smooth chipped curvatures. The growth of the strain leads to a constriction in the regions of disorder and borders more ordered polycrystalline. Strain disordered state manifested intercrystallite break of nanocrystals. As for Ni₃Al Ni₃Fe alloys having the lower antiphase boundaries energies in comparison with the Ni₃Ge, the character of the fracture of the original single and polycrystalline strain state is characterized by less pronounced brittle fracture. The amount of deformation of the transition to nanostructured disordered state occurs at lower values than in Ni₃Ge alloy. The Ni₃Ge shear stresses were measured in situ at different temperatures and the anomalous temperature dependence of the mechanical properties had been obtained under the severe sever plastic deformation at high pressure.

Acknowledgements. The reported study was partially funded by RFBR according to the research project No. 16-03-00182-a and was carried out within state assignment of FASO of Russia (theme «Deformation» No.01201463327)

4-74

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЖЕЛЕЗА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ В СФЕРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Н. И. Талуц¹, А. В. Добромислов¹, Е. А. Козлов²

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

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

E-mail: NinaTaluts@imp.uran.ru

Изучение структуры и механических свойств металлов и сплавов, подвергшихся ударно-изэнтропическому нагружению, имеет большое значение для понимания деформационного и фазового поведения материалов в условиях высоких давлений и больших скоростей деформации. Известно, что формирование

деформационной структуры железа в процессе пластической деформации зависит от таких факторов, как степень пластической деформации, скорость пластической деформации, температура деформации и присутствие примесей. В работе представлены результаты изучения деформационной структуры железа высокой чистоты, содержащего 0,001 мас. % углерода, и армо-железа, содержащего 0,024 мас. % углерода, после нагружения сходящимися детонационными волнами во взрывной сферической системе с наружным радиусом слоя взрывчатого вещества 40 мм. Реализованный режим взрывного нагружения обеспечивал протекание $\alpha \rightarrow \epsilon$ превращения во всем объеме шаров.

Обнаружено, что высокоскоростная пластическая деформация железа в рассматриваемых условиях нагружения осуществляется скольжением. В процессе нагружения происходит локализация деформации, приводящая к образованию полос сдвига, а в глубоких слоях шаровых образцов – дополнительно полос локализации деформации по границам зерен. На микроуровне формируется смешанная структура, состоящая из ячеистой и полосовой структуры. При реализованном режиме нагружения высокоскоростная пластическая деформация протекает в ϵ -фазе, поэтому двойники не образуются. Проведенное исследование показало, что уменьшение содержания углерода вносит некоторые изменения в особенности деформационного поведения железа. Обнаруженное различие в деформационной структуре высокочистого железа и армо-железа связывается с разной подвижностью дислокаций.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта УрО РАН № 15-17-2-11.

FEATURES OF HIGH-RATE PLASTIC DEFORMATION OF IRON UNDER EXPLOSIVE LOADING IN SPHERICAL SYSTEMS

N. I. Taluts¹, A. V. Dobromyslov¹, E. A. Kozlov²

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

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

E-mail: NinaTaluts@imp.uran.ru

The study of the structure and mechanical properties of metals and alloys subjected to shock-isentropic loading is of great importance for the understanding of deformation and phase behavior of materials at high pressures and large strain rates. It is known that the formation of the deformation structure of iron during plastic deformation depends on such factors as the degree of plastic deformation, the rate of plastic deformation, the deformation temperature and the presence of impurities. The results of the study of the deformation structure of high-purity iron containing 0.001 wt % carbon and of Armco iron containing 0.024 wt % carbon after converging of loading explosive detonation waves in a system with a spherical outer

radius of 40 mm explosive. The loading regime ensured the $\alpha - \varepsilon$ transition to proceed in the whole volume of the sphere.

It is revealed that high-rate plastic deformation of iron proceeds by slip in these loading conditions. Localization of deformation occurs in the process of loading, leading to the formation of shear bands, and also to the formation of localized deformation bands along the grain boundaries in deep layers of spherical samples. Mixed structure consisting of dislocation cells and bands are observed at microlevel. High-rate plastic deformation of iron at realized regimes loading proceeds in the ε -phase therefore twins aren't formed. The study showed that a reduction in the carbon content makes some changes in the features of the deformation behavior of iron. The found distinction is explained by different mobility of dislocations.

This work was supported by the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, project No 15-17-2-11.

4-75

**ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ
И КОМПАКТИРОВАНИЕ ЛАТУНИ Л63.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

И. А. Терёшкина^{1,2}, И. Р. Трунин^{1,2}, В. Г. Симаков^{1,2},
А. М. Подурец^{1,2}, В. А. Брагунец¹, Ю. В. Батьков²,
И. Н. Кондрохина¹, М. И. Ткаченко^{1,2}, Г. Г. Иванова¹,
М. А. Десятникова¹, А. В. Цветков¹

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

²СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

E-mail: TIRSarov@yandex.ru

В докладе приводятся результаты полного цикла работы по исследованию откольного разрушения и компактирования латуни Л63, включающий проведение экспериментов, металлографический анализ сохраненных образцов и численное моделирование опытов:

- прослежена динамика развития внутренней откольной поврежденности в образцах из двухкомпонентного сплава латуни при ударном нагружении;
- определены ширина зоны откольного разрушения, которая увеличивается при возрастании скорости ударного нагружения и толщина откольного слоя;
- получена картина процесса компактирования предварительно поврежденных образцов, и, впервые, удалось получить полностью «залеченную» внутреннюю структуру поврежденного образца.
- по результатам численного моделирования экспериментов получены количественные оценки параметров моделей откольного разрушения и компактирования металлов: параметр $\omega_{кр}$ (критическая поврежденность), отвечающий за переход с уровня незначительной внутренней поврежденности материала к уровню образования магистральной трещины;

параметр P_c (давление компактирования) превышение которого сжимающим напряжением приводит к полному «залечиванию» поврежденного образца.

**SPALL DAMAGE AND COMPACTION
OF BRASS L63. EXPERIMENTAL STUDIES
AND NUMERICAL SIMULATION**

I. A. Tereshkina^{1,2}, I. R. Trunin^{1,2}, V. G. Simakov^{1,2},
A. M. Podurets^{1,2}, V. A. Bragunets¹, Yu. V. Bat'kov²,
I. N. Kondrokhina¹, M. I. Tkachenko^{1,2}, G. G. Ivanova¹,
M. A. Desyatnikova¹, A. V. Tsvetkov¹

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

²SarFTI NIYaU Moscow Engineering and Physical Institute,
Sarov, Russia

E-mail: TIRSarov@yandex.ru

The paper contains the results of a full working cycle for the study of spall damage and compaction of brass L63, including the fulfillment of experiments, a metallographic analysis of recovered samples and the numerical simulation of tests:

- dynamics of a growth of internal spall damage was traced in samples made of a binary brass alloy under shock loading;
- width of a spall damage zone increasing with rise in a velocity of shock loading and a thickness of a spall layer were determined;
- a pattern of a compaction process of preliminarily damaged samples was obtained, and, for the first time, a fully «healed» internal structure of a damaged sample was successfully gained.
- according to the results of numerical simulation of experiments quantitative assessments were achieved for parameters of models of spall damage and compaction of metals: the parameter ω_{cr} (critical damage), which is responsible for a transition from a level of slight internal damage of a material to a level of formation of a main crack; the parameter P_c (compaction pressure), whose excess by compression stress leads to a complete «healing» of a damaged sample.

4-76

**ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ
И КОМПАКТИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ
СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК. ЭКСПЕРИМЕНТ
И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

И. Р. Трунин^{1,2}, И. А. Терёшкина^{1,2}, И. В. Шиберин¹,
М. И. Ткаченко^{1,2}, А. Н. Баландина¹

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

²СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

E-mail: TIRSarov@yandex.ru

Приведены результаты экспериментов по откольному разрушению сферических стальных оболочек и их компактированию при повторном взрывном нагружении. Оболочка с незначительной внутренней поврежденности при повторном нагружении полностью «залечилась», оболочка, имевшая поврежденность в виде магистральной трещины, после нагружения имела остаточную поврежденность.

На новых экспериментальных данных проведена отработка модели компактирования поврежденного материала с квадратичной зависимостью поврежденности от давления.

Представлены результаты численного моделирования откольного разрушения и компактирования поврежденных стальных оболочек. Использование кинетических моделей разрушения и компактирования позволяет правильно описать временной многостадийный характер разрушения и компактирования.

SPHERICAL STEEL SHELL SPALL FRACTURE AND COMPACTION. EXPERIMENTS AND NUMERICAL SIMULATION

I. R. Trunin^{1,2}, I. A. Tereshkina^{1,2}, I. V. Shiberin¹,
M. I. Tkachenko^{1,2}, A. N. Balandina¹

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

²SarFTI NIYaU Moscow Engineering and Physical Institute, Sarov, Russia

³Sarov State Physics and Technical Institute National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Russia

E-mail: TIRsarov@yandex.ru

The paper presents experimental data on spall fracture of spherical steel shells and shell compaction with explosive reloading. The shell having insignificant internal damage was completely recovered after explosive reloading, the shell with main crack had residual damage after it had been reloaded.

Compaction model of damaged material with quadratic dependence of damage on pressure was tested using new experimental data.

The work presents the results of numerical simulation of steel shell spall fraction and further compaction. Using kinetic fracture and compaction models makes it possible to get correct description of temporal multistage character of fracture and compaction.

4-77

О ПОДОБИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, С. С. Соколов,
И. Р. Трунин, А. Я. Учаев

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

В работе приведены результаты исследований процесса диспергирования металлов при ударно-волновом нагружении (УВН) при воздействии импульсов релятивистских электронных пучков. Исследовались образцы из Cu, Al с нанесенными на поверхность возмущениями в виде пирамидок с углом раствора 60° и высотой менее 1 мм.

Результаты исследования процесса диспергирования металлов, приведенные в работе, показали, что при УВН возникает спектр диссипативных структур, подобный спектру диссипативных структур в явлении динамического разрушения. При определенных амплитудно-временных характеристиках внешнего воздействия, происходит процесс диспергирования из вершин пирамидок (происходит кумуляция энергии ударной волны (УВ) самой средой при определенной геометрии).

В работе показано, что процесс диспергирования и динамического разрушения при длине УВ меньше, чем геометрические размеры нанесенных возмущений, может происходить не из углублений возмущений, а из их вершин, процессу диспергирования предшествуют процессы гидродинамических течений металла.

Показано, что спектр диспергированных частиц для медного и алюминиевого образцов имеют близкие значения при близких значениях отношений параметров нагружения к энергетическим параметрам кристаллической решетки и одинаковой геометрии исследованных образцов.

Проведено численное моделирование нагруженных мишеней от момента нагружения до макроразрушения с использованием математического пакета программ ТИМ 3D [4].

Результаты исследований необходимо учитывать при разработке высокоинтенсивной импульсной техники.

Литература

1. Кошелева Е. В., Пунин В. Т., Сельченкова Н. И., Учаев А. Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений: монография – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2015. – 211 с.

2. Учаев А. Я., Пунин В. Т., Сельченкова Н. И., Кошелева Е. В., Косачев В. В. Влияние геометрии и амплитудно-временных характеристик высокоинтенсивного внешнего воздействия на долговечность металлов, применяемых в ядерной энергетике // *Ядерная физика и инжиниринг*, 2015, том 5, № 5–6, с. 1–11.
3. Ильяев Р. И., Пунин В. Т., Учаев А. Я., Новиков С. А., Кошелева Е. В., Платонова Л. А., Сельченкова Н. И., Юкина Н. А. Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения // *ДАН*, 2003, том 393, № 3. – С. 326–331.
4. Соколов С. С., Попов А. И., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. матем. моделирование физ. процессов*, 2005, вып. 3. – С. 37–52.

**ON SIMILARITY OF DYNAMIC
FAILURE PROCESSES IN DIFFERENT
GEOMETRY METALS
AT VARIOUS TIME-AMPLITUDE
CHARACTERISTICS OF EXTERNAL ACTION**

E. V. Kosheleva, N. I. Selchenkova, S. S. Sokolov,
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

The paper presents results of studying metal dispersion processes under shock-wave loading (ShWL) under the action of relativistic electron beam pulses. Studied were samples made of Cu, Al with surface-applied perturbations in the form of pyramids with a corner angle 60° and the height less than 1 mm. The results of studying the metals' dispersion process, presented in the paper, have shown, that when shock-wave loading, a spectrum of dissipative structures originates. It is similar to dissipative structures' spectrum in the dynamic failure process. At specific time-amplitude characteristics of external action, there occurs a dispersion process from pyramids' vertexes (shock wave energy is cumulated (ShW) by the medium itself at specified geometry).

The paper shows that given that ShW length is less, than geometric dimensions of applied disturbances, the process of dispersion and dynamic failure can occur not from depressions of disturbances, and from their vertexes, dispersion process is preceded by processes of hydrodynamical metal flows.

It is shown that spectrum of dispersion particles for copper and aluminium samples have close values at close values of ratios between loading parameters and crystal lattice energy parameters as well as studied sample equal geometries.

Performed was numerical modeling of loaded targets beginning from loading up to macro-failure using a mathematical package TIM 3D [4].

One should take into account results of studies at development of high-intensity pulse technology.

References

1. E. V. Kosheleva, V. T. Punin, N. I. Selchenkova, A. Ya. Uchaev. General regularities of hierarchy relaxation processes in metals under the action of penetrating radiation pulses: a monograph – Sarov: RFNC – VNIIEF, 2015. – 211 p. (in Russian)
2. A. Ya. Uchaev, V. T. Punin, N. I. Selchenkova, E. V. Kosheleva and V. V. Kosachev. Effect of geometry and time-amplitude characteristics of external high-intensity action on metals' longevity, applied in nuclear power engineering // *Nuclear Physics and Engineering (Yad. Fiz. i Inzh.)*, 2015, vol. 5, № 5–6, p. 1–11. (in Russian)
3. Il'kaev R. I., Punin V. T., Uchaev A. Ya., Novikov S. A., Kosheleva E. V., Platonova L. A., Selchenkova N. I., Yukina N. A. Time regularities of dynamic metals' failure process conditioned by hierarchy properties of dissipative structures – failure centers' cascade // *RAS*, 2003, vol. 393, № 3. – P. 326–331. (in Russian)
4. Sokolov S. S., Popov A. I., Voropinov A. A., Novikov I. G. et al. TIM calculation method for three-dimensional problems of continuum mechanics on unstructured multifaceted Lagrangian nets // *Issues for Atomic Science and Engineering (Voprosy At. Nauki i Tekh.)*. Ser. Mathematical modeling of physical processes, 2005, issue 3. – P. 37–52. (in Russian)

4-78

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА РЕГИСТРАЦИИ
МИНИМАЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ
МАССЫ ЧАСТИЦ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ
УДАРНОВОЛНОВОГО ПЫЛЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ
ЛАЗЕРНОГО ГЕТЕРОДИН-ИНТЕРФЕРОМЕТРА.
РЕГИСТРАЦИЯ ЭФФЕКТА
МНОГОКРАТНОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ
ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА**

А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин,
Е. А. Чудаков, Д. А. Калашников,
И. С. Гнутов, Е. И. Бутусов

Институт физики взрыва Российского федерального
ядерного центра – ВНИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

При выходе ударной волны на свободную поверхность металлов происходит выброс потока частиц, параметры которого регистрируются различными методами. В докладе представлены результаты серии экспериментов по определению минимальных значений удельной массы потока частиц, при которых скорость их движения возможно зарегистрировать с помощью лазерного гетеродин-интерферометра (метода PDV). Порог регистрации определялся при измерении скорости потока пыли после нанесения на исследуемую поверхность слоя частиц известной удельной массы. В экспериментах зарегистрирован эффект взаимо-

действия лазерного излучения с тонким слоем частиц, который приводит к многократному сдвигу частоты доплеровского сигнала. Данный эффект играет существенную роль при расшифровке данных, полученных в опытах по регистрации параметров ударноволнового пыления материалов.

**STUDY OF REGISTRATION THRESHOLD
FOR MINIMAL SPECIFIC WEIGHT
OF PARTICLES WHEN INVESTIGATING
SHOCK-WAVE EJECTION
FROM MATERIAL SURFACE USING LASER
HETERODYNE-INTERFEROMETER.
RECORDING OF MULTIPLE DOPPLER
FREQUENCY SHIFT EFFECT**

A. V. Fedorov, A. L. Mikhailov, S. A. Finyushin,
E. A. Chudakov, D. A. Kalashnikov,
I. S. Gnutov, E. I. Butusov

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

When the shock wave reaches the free metal surface, the particle ejection occurs. Particle flow parameters are recorded by different methods. This paper contains the results of experimental series on determination of minimal specific weight of the particle flow, when particle velocities can be recorded using laser heterodyne-interferometer (PDV method). The registration threshold is determined by measuring the velocity of ejected particles after coating a test surface with a layer of particles having the certain specific weight. The effect of laser emission interaction with a thin layer of particles is recorded in experiments, and it causes the multiple Doppler frequency shift. This effect plays a vital role in interpretation of data obtained in experiments with recording of parameters of shock loaded ejection of materials.

4-79

**ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ
В МЕДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ
ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
СХОЖДЕНИЯ И ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ
РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

Н. Ю. Фролова¹, В. И. Зельдович¹, А. Э. Хейфец¹,
С. М. Долгих², К. В. Гаан², Е. В. Шорохов²

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

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

E-mail: frolova@imp.uran.ru

Массивная медная цилиндрическая оболочка с внутренним диаметром 118 мм и толщиной стенки 5,9 мм была подвергнута действию взрыва цилиндрического заряда ВВ толщиной 40 мм, окружающего оболочку. Для задержки разлета продуктов взрыва и увеличения времени действия высокого давления система была окружена стальным корпусом. В результате высокоскоростной деформации, вызванной взрывом, был получен цилиндр диаметром 57–58 мм. Металлографическое исследование структуры цилиндра в поперечном сечении показало, что схлопывание оболочки произошло под действием осесимметричной радиальной деформации, которая осуществлялась преимущественно двойникованием. В продольном сечении было видно, что, наряду с радиальной, имеет место осевая деформация. В поперечном сечении микроструктура состояла из трех зон. Снаружи сформировалась широкая кольцевая зона деформации, ближе к центру кольцевая зона рекристаллизации и в центре круглая область с дендритной структурой. Наличие дендритов свидетельствовало о том, что на границе этой области температура достигала температуры плавления меди. Была исследована рекристаллизация образцов, вырезанных из деформированной зоны. Было обнаружено, что рекристаллизация происходит в два этапа. При температурах 300–350°C рекристаллизовались двойниковые участки микроструктуры, при 400–450°C – промежутки между ними.

Работа выполнена по плану РАН тема «Структура» (N г.р. 01201463331) и при частичной поддержке проекта УрО РАН (15-17-2-24).

**FORMATION OF THE MICROSTRUCTURE
IN THE COPPER CYLINDRICAL SHELL
DURING HIGH-SPEED DEFORMATION OF THE
CONVERGENCE AND DURING SUBSEQUENT
RECRYSTALLIZATION**

N. Yu. Frolova¹, V. I. Zel'dovich¹, A. E. Kheifets¹,
S. M. Dolgikh², K. V. Gaan², E. V. Shorokhov²

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

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

E-mail: frolova@imp.uran.ru

Massive copper cylindrical shell with an inner diameter of 118 mm and a wall thickness of 5.9 mm was subjected to the action of the explosion of a cylindrical explosive charge 40 mm thick surrounding the shell. To delay extension of the explosion products and the increasing duration of the high pressure system was surrounded by a steel casing. The result is high-speed deformation caused by the explosion, had been received cylinder diameter 57–58 mm. Metallographic study of the structure of the cylinder in the cross-section showed that the collapse of the shell occurred under the action of axisymmetric radial deformation, which was carried out mainly by twinning. In longitudinal section it was seen that along with radial, is the

axial strain. In the cross-section microstructure consisted of three zones. The outside formed a wide annular area of deformation, is closer to the center of the annular zone of recrystallization, in the center of a circular region with a dendritic structure. The presence of dendrites testified that on the border of this region the temperature reaches the melting temperature of copper. We investigated the recrystallization of the samples cut from the deformed zone. It was found that the recrystallization occurs in two stages. At temperatures of 300–350°C recrystallized microstructure twin sites, at 400–450°C – spaces between them.

This work was supported by RAS theme «Structure» (g.r. 01201463331) and partially supported by Ural Division of RAS (15-17-2-24).

4-81

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭВОЛЮЦИЮ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕДИ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ

И. В. Хомская¹, В. И. Зельдович¹, Е. В. Шорохов²,
Н. Ю. Фролова¹, А. Э. Хейфец¹

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

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

E-mail: khomskaya@imp.uran.ru

4-80

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЛЬДА И ВОДЫ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

К. В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва,
Россия

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Развита полуэмпирическое уравнение состояния льда и воды с учетом полиморфных фазовых превращений, плавления и испарения. Представлены результаты расчетов термодинамических характеристик различных модификаций льда, жидкой и паровой фаз в широком диапазоне давлений и температур. Проведено сопоставление расчетных результатов с имеющимися ударно-волновыми данными. Полученное многофазное уравнение состояния может быть эффективно использовано в численном моделировании различных высокоинтенсивных процессов.

PHASE TRANSFORMATIONS OF ICE AND WATER AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

K. V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Semiempirical equation of state for ice and water with taking into account polymorphic phase transformations, melting and evaporation effects is developed. Results of calculations of thermodynamic characteristics of different modifications of ice as well as liquid and steam phases in a wide range of pressures and temperatures are presented. Comparison of calculated results with available shock-wave data is carried out. Obtained multiphase equation of state can be used effectively in numerical modeling of various high-intensity processes.

Изучены закономерности деформационного поведения, эволюции структуры и свойств меди и сплавов меди, подвергнутых высокоскоростной (10^4 – 10^7 с⁻¹) деформации по различным режимам. Представлены результаты экспериментальных исследований эффектов взаимодействия сходящихся ударных волн и связанных с ним явлений локализации пластической деформации и разрушения по остаточным изменениям микроструктуры. Рассмотрена связь между параметрами ударно-волновых воздействий (давлением, высокоскоростной деформацией, температурой) и микроструктурными изменениями в материалах. Предложена классификация типов локализованного течения по характеру массопереноса в области течения. Показано, что явления локализованной деформации обусловлены воздействием первичных и отраженных волн напряжения, и не связаны с особенностями структуры нагруженных образцов. Эффекты локализованного разрушения обусловлены геометрическими условиями нагружения, макро- и микроструктурой материалов и их свойствами.

Установлены механизмы трансформации крупнокристаллической структуры меди и специальных сплавов меди в субмикроструктурную (СМК) и нанокристаллическую (НК) структуру при динамическом канально-угловом прессовании (ДКУП), отличительной особенностью которого является комбинированное воздействие высокоскоростной (10^4 – 10^7 с⁻¹) деформации простого сдвига, ударно-волновой деформации сжатия и температуры. Показано, что измельчение структуры этих материалов на три порядка (от 100–300 до 0,1–0,4 мкм), и повышение прочностных свойств в 1,5 и 3,3 раза может быть достигнуто уже при трех-четырёх проходах ДКУП. Установлен оптимальный режим ДКУП и последующего старения для получения СМК сплавов меди, легированных микродобавками хрома и циркония. Показано, что уменьшение значений удельного электросопротивления до 2,1 мкОм · см, повышение твердости в 2,4–2,6 раза и характеристик прочности в 2,8–5,1 раза после ДКУП и отжига в интервале температур 400–500°C обусловлено протеканием в сплавах в этом температурном интервале процессов распада α -твердого раствора с выделением наноразмерных частиц вторых фаз.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Структура», № 01201463331) и при частичной поддержке УрО РАН (проект №15-17-2-24).

This work was obtained within the state assignment of FASO of Russia (theme «Structure», No. 01201463331) and partially supported by Ural Division of RAS (project No 15-17-2-24).

EFFECT OF THE HIGH SPEED DEFORMATION ON THE EVOLUTION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COPPER AND COPPER-BASED ALLOYS

I. V. Khomskaya¹, V. I. Zeldovich¹, E. V. Shorokhov²,
N. Yu. Frolova¹, A. E. Kheifets¹

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

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

E-mail: khomskaya@imp.uran.ru

The regularities of the deformation behavior, the evolution of the structure and properties of copper and copper alloys subjected to high-speed (10^4 – 10^7 s⁻¹) the strain on the various modes. The results of experimental studies of the effects of the interaction of convergent shock waves and related phenomena of localization of plastic deformation and fracture, upon the loading by residual microstructure changes, are presented. The relationship between the parameters of the shock-wave effects (pressure, high-speed deformation and temperature) and microstructural changes in materials was studied. The classification of types of localized flow on the basis of the mass transfer pattern in the field of flow was offered. It was shown that the phenomena of localized deformation are caused by the action of primary and reflected shock waves and are not correlated with the features of the structure of loaded samples. The effects of localized fracture are caused by the geometric conditions of loading, macro- and microstructure of materials and their properties.

The mechanisms of transformation of the coarse-grained structure of copper and special copper alloys to submicrocrystalline (SMC) and nanocrystalline (NC) structures at loading by dynamic channel-angular pressing (DCAP) were found. A distinctive feature of the DCAP is the combined effect of high-speed (10^4 – 10^7 s⁻¹) deformation by simple shear, the shock-wave compressive strain and temperature. It is shown that in these materials the structure refinement on the order of three (from 100–300 to 0,1–0,4 μm) and increasing of strength properties in 1,5 and 3,3 times can be obtained by three or four passes of DCAP only. The optimal mode of DCAP and subsequent aging for SMC copper alloys, alloyed with chromium and zirconium microaddings, was found. It was shown that decreasing in the value of the electrical resistivity to 2,1 μOhm · sm, the increasing in hardness in 2,4–2,6 times, and increasing the strength characteristics in 2,8–5,1 times after the DCAP and annealing in the temperature range of 400–500°C in the alloys were due to the processes of α-solid solution decomposition with precipitation of second phase nanoparticles in this temperature range.

4-82

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА УПОРЯДОЧЕНИЕ УГЛЕРОДА В МАРТЕНСИТЕ

П. В. Чирков, А. А. Мирзоев

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

E-mail: chirkovpv@susu.ru

При резком охлаждении ГЦК фазы системы Fe-C наблюдается мартенситное превращение, лежащее в основе закалки стали. Согласно экспериментальным исследованиям [1] мартенситу присуща тетрагональная решетка. Для объяснения этого явления тетрагональности была предложена термодинамическая теория упорядочения в сплавах внедрения [2], основанная на концепции о неравномерном заполнении октаэдрических междоузлий кристаллической решетки. В ОЦК решетке по направлению короткой диагонали октаэдра можно выделить три типа октапоров (x , y и z), соответственно при попадании атома углерода в междоузлие определенного типа, например z , происходит растяжение решетки вдоль этой оси. Согласно данной теории при некоторой температуре T_{crit} происходит фазовый переход порядок-беспорядок.

В работе [3] было отмечено, что внешние напряжения могут оказывать сильное влияние на тетрагональность мартенсита, однако термодинамический анализ устойчивости выполнен не был. Кроме того указанные теории не могут предоставить описание процессов перераспределения атомов углерода на атомистическом уровне, поэтому для решения данной задачи целесообразно использование моделирования методом молекулярной динамики.

Расчеты проводились в пакете LAMMPS с межчастичным потенциалом погруженного атома (EAM), в NPT ансамбле. Результаты моделирования показали, что при достижении определенного значения сжимающего вдоль оси Oz напряжения происходит миграция атомов углерода, в результате чего происходит смена оси тетрагональности и формируется упорядоченное состояние вдоль оси Ox или Oy , причем выбор направления осуществляется случайным образом. С помощью моделирования получены концентрационные и температурные зависимости критического напряжения, при котором происходит смена оси тетрагональности.

Литература

1. Курдюмов, Г. В. Кристаллическая решетка мартенсита. Механизм А-М превращения и поведение углерода в мартенсите / Г. В. Курдюмов // ФММ. – 1976. – Т. 42, № 3 – С. 527–545.
2. Zener, C. Theory of Strain Interaction of Solute Atoms / C. Zener // Phys. Rev. – 1948. – Vol. 74, no. 6. – P. 639–647.
3. Штремель, М. А. Влияние напряжений на порядок в растворах внедрения / М. А. Штремель, Ф. Ф. Сатдарова // ФММ. – 1972. – Т. 34, № 4. – С. 699–708.

**INFLUENCE OF EXTERNAL STRESS
ON CARBON ORDERING IN MARTENSITE
LATTICE BY MOLECULAR DYNAMICS**

P. V. Chirkov, A. A. Mirzoev

South Ural State University (national research university),
Chelyabinsk, Russia

E-mail: chirkovpv@susu.ru

On rapid cooling of a fcc phase in Fe-C alloys martensitic transformation occurs, this is the basis of quench steel hardening. According to experimental investigations [1] martensite has a tetragonal lattice. C. Zener [2] mentioned that iron atoms in bcc iron lattice form a distorted octahedron where one space diagonal is shorter than others. When a carbon atom occupies an octahedral interstice of the α -iron lattice, it moves apart the nearest two iron atoms with greater force than other four atoms. Thus, lattice tension occurs in one direction only. The bcc lattice contains octahedral interstices having the small diagonal oriented along x , y and z axes, so interstices of the corresponding types should be distinguished. For instance, the carbon atom located in the z type site deforms the lattice along the z axis, and in the x type site it tensions along the x axis and so on. According to this theory, at the temperature below T_{crit} cubic disordered phase is stable and at the temperatures higher than T_{crit} ordered tetrahedral phase is preferred.

It was noted [3] that external stresses may exert great influence on martensite tetragonality, however, thermodynamic analysis of stability was not considered. Apart from mentioned theories does not provide description on atomistic level therefore molecular dynamics simulation is reasonable way to solve this problem.

Calculations were performed in LAMMPS package with embedded atom model interatomic potential at NPT ensemble. Simulation results show that external stress applied along tetragonality axis (e.g. z) causes the migration of carbon atoms from z -sites. When certain stress value is reached tetragonality orientation is changed to x or y axis. Concentration and temperature dependence of the critical stress value was calculated.

References

1. Kurdyumov, G. V. Martensite crystal lattice. Mechanism of A-M transformation and behavior of carbon at martensite / G. V. Kurdyumov // Fiz. Met. Metalloved. – 1976. – V. 42, iss. 3 – P. 527–545.

2. Zener, C. Theory of Strain Interaction of Solute Atoms / C. Zener // Phys. Rev. – 1948. – Vol. 74, no. 6. – P. 639–647.
3. Shtremel', M. A. Влияние напряжений на порядок в растворах внедрения / М. А. Shtremel', F. F. Satdarova // Fiz. Met. Metalloved. – 1972. – V. 34, iss. 4. – P. 699–708.

4-83

**МОБИЛЬНЫЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ
КОМПЛЕКСЫ НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ
ИМПУЛЬСНЫХ БЕТАТРОНОВ. КОНЦЕПЦИЯ
РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ**

Д. И. Зенков, С. Г. Козлов, Ю. П. Куропаткин,
В. И. Нижегородцев, И. Н. Романов, К. В. Савченко,
В. Д. Селемир, Е. В. Урлин, О. А. Шамро

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

E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

В работе описан мобильный рентгенографический комплекс на базе безжелезных импульсных бетатронов для радиографирования динамических объектов больших оптических толщин. Приведены параметры комплекса при его тестовых включениях на экспериментальной площадке. При граничной энергии электронного пучка бетатрона $E_{гр} \sim 13$ МэВ (определяется величиной емкостного накопителя системы импульсного питания электромагнита бетатрона) толщина просвеченного свинцового теста на 1,5 м от танталовой мишени бетатрона составила ~ 120 мм. Предложена концепция рентгенографического комплекса на базе безжелезных импульсных бетатронов для мало-ракурсной томографии.

**MOBILE X-RAY COMPLEX BASED
ON IRONLESS PULSED BETATRONS.
X-RAY COMPLEX CONCEPTION
FOR SMALL-ANGLE TOMOGRAPHY**

D. I. Zenkov, S. G. Kozlov, Yu. P. Kuropatkin,
V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov, K. V. Savchenko,
V. D. Selemir, E. V. Urlin, O. A. Shamro

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

E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

This paper describes a mobile radiographic facility based on uncored pulsed betatrons. It is intended for radiography of dynamic objects having large optical thickness. The parameters of facility taken during its testing trial are provided. At the limiting energy of the electron beam of betatron $E_{lim} \sim 13$ MeV (it's defined by the value of the capacitive storage of the betatron electromagnet pulsed powering system) the X-ray lead thickness was ~ 120 mm at 1.5 m from the tantalum target

of betatron. The conception of X-ray facility based on the ironless pulsed betatrons is proposed for small-angle tomography.

4-84

**ИЗЛОМЫ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ
И КРИВАЯ ПЛАВЛЕНИЯ КАРБИДА БОРА
В МЕГАБАРНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ**

А. М. Молодец, А. А. Гольшев, Д. В. Шахрай

ФГБУН Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: molodets@icp.ac.ru

Выявлен излом ударной адиабаты карбида бора, который соотнесен с началом плавления карбида бора при давлении 100 ГПа. Разработаны уравнения состояния карбида бора и его расплава вплоть до мегабарных давлений ударного сжатия.

Проведено сравнение между разнообразными литературными и собственными расчетными теплофизическими свойствами при ударном и статическом сжатии карбида бор и его расплава. Показано, что в рассмотренном диапазоне высоких давлений 0–400 ГПа предложенное термодинамическое описание карбида бора и его расплава соответствует эксперименту в пределах его погрешности.

Построена кривая плавления карбида бора при давлениях 0–120 ГПа, которая, обладая отрицательной кривизной, прогнозирует его плавление при температуре 700 К в области давлений 120 ГПа.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных научных исследований Президиума Российской Академии Наук № 13 «Теплофизика высоких плотностей энергии»

**KINKS OF HUGONIOT
AND MELTING CURVE OF BORON CARBIDE
AT HIGH PRESSURES**

A. M. Molodets, A. A. Golyshev, D. V. Shakh-ray

Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

E-mail: molodets@icp.ac.ru

The kink of shock velocity-mass velocity Hugoniot of boron carbide is revealed at pressure 100 GPa. It is supposed, the kink is caused by the beginning of melting of shocked boron carbide

The equations of state of boron carbide and its melt are developed up to megabar pressure of shock compression. The comparison is carried out between various literary and own calculations of thermophysics properties under shock and static compression of boron carbide and its melt. The offered thermodynamic description of boron carbide and its melt corresponds to experiment

within its error in the considered range of high pressures 0–400 GPa.

The melting curve of boron carbide is constructed at pressure 0–120 GPa. This melting curve possesses negative curvature and predicts fusion of boron carbide at temperature about 700 K in the pressure region 120 GPa.

This work was supported by the Presidium RAS (basic research program № 13 «Thermophysics of high energy densities»).

4-85

**СИНТЕЗ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЕДИНЕНИЙ
НА ОСНОВЕ AL И AL₂O₃**

Д. В. Шахрай, В. В. Авдонин, А. В. Пальниченко

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,
Россия

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия

E-mail: shakh-ray@icp.ac.ru

Известно, что в гранулах и пленках некоторых сверхпроводников, когда размер зерен достаточно мал, регистрируется более высокая температура сверхпроводящего перехода (T_c) по сравнению с объемным материалом. Например, в пленках из алюминия и его оксида вследствие этого эффекта регистрируется температура сверхпроводящего перехода, вдвое превышающая таковую для объемного материала, равную 1,2 К. Кроме того, было обнаружено, что оксид алюминия сам по себе не участвует в изменении T_c , а роль кислорода заключается в сохранении мелких алюминиевых зерен, покрытых оксидом алюминия и стабилизации мелкозернистой структуры пленки алюминия. В настоящей работе, смесь из Al и Al₂O₃ была подвергнута ударно-волновому нагружению в плоских ампулах сохранения до давлений 170 кбар с последующим вакуумированием и охлаждением до температуры жидкого азота. Измерения магнитной восприимчивости синтезированных образцов показали наличие метастабильной сверхпроводимости при $T_c = 37$ К.

**SYNTHESIS OF SUPERCONDUCTING
COMPOUNDS ON THE BASIS OF ALUMINUM
AND ALUMINUM OXIDE**

D. V. Shakh-ray, V. V. Avdonin, A. V. Palmichenko

Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia
Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Russia

E-mail: shakh-ray@icp.ac.ru

It is known that granular films of some superconductors exhibit enhancement of the superconducting transition temperature T_c , compared to that in the bulk, when the grain size is small enough. For example, in aluminum

this effect is about a double value of $T_c = 1.2$ K for the bulk. Moreover, it has been found that the films with comparable grain size evaporated at low temperatures in oxygen-free ambience and at room temperature in oxygen atmosphere demonstrate similar enhancement of the T_c , which led to a conclusion that the aluminum oxide itself does not participate in the T_c -enhancement mechanism. The only role of oxygen has been considered to conserve small aluminium grains with aluminium oxide coating, thus stabilizing the fine-grain structure of the Al films, which results in stabilization of the enhanced T_c . In this work, a mixture of Al and Al_2O_3 has been subjected to a shock-wave pressure of 170 kbar, followed by vacuum-encapsulating and quenching of the product to liquid nitrogen. The ac magnetic susceptibility measurements of the samples have revealed metastable superconductivity with $T_c = 37$ K.

4-86

О РАСЩЕПЛЕНИИ ПОЛОСЫ ПРОВОДИМОСТИ РТУТИ

А. И. Киселев, В. Г. Шевченко, А. В. Конюкова

ФГБУН Институт химии твердого тела УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

Представление о расщеплении полосы проводимости ртути в жидком состоянии было введено Н. Моттом в работе [1]. Причину существенной расхожденности экспериментальных данных по электропроводности с модельными оценками подхода П. Друде (модель почти свободных электронов) он объяснял наличием существенного понижения плотности состояний в области поверхности Ферми в энергетическом спектре электронов ртути. Экспериментальные данные различных методов подтверждают гипотезу Н. Мотта о наличии псевдощели в энергетическом спектре ртути. В работах [2, 3] методом ультрафиолетовой фотоэмиссионной спектроскопии исследована плотность состояний ртути вблизи уровня Ферми. При этом экспериментальный спектр электронов сравнивался со спектром модели почти свободных электронов. Показано, что плотность состояний на уровне Ферми заметно меньше, чем это следует из модели почти свободных электронов. В работах [4–6] по данным углового распределения гамма-квантов при аннигиляции позитронов, облучающих металл, изучали ртуть и разбавленные амальгамы индия и натрия. Из результатов этих исследований также сделан вывод о понижении плотности состояний на уровне Ферми. Отмечалось, что добавление 4% натрия еще более снизило эту плотность. Для ртути также характерно наличие фазового перехода «металл–изолятор». Такой переход в ней наблюдали экспериментально [7]. При низких температурах ее электропроводность имеет явный металлический характер. При высоких

температурах проводимость падает на несколько порядков и приближается по величине к проводимости полупроводников. Позднее Ю. Хафнером [8] с помощью первопринципного пакета VASP была рассчитана плотность электронных состояний для широкого диапазона плотностей ртути, и было найдено, что при достижении плотности ртути $8,8$ г/см³, в области которой совершается переход «металл–изолятор», в плотности состояний образуется щель. Исследование оптических свойств также позволяют судить о степени отклонения характеристик проводимости ртути от модели почти свободных электронов. Анализ экспериментально установленной зависимости оптической проводимости от частоты света свидетельствует о несоответствии с моделью ПСЭ [9, 10]. Здесь при анализе данных оптического эксперимента для ртути используется методика работы [11], в которой при изучении спектра оптической проводимости расплава алюминия было высказано предположение, что расщепление полосы проводимости алюминия, обеспечивающее свойства сверхпроводимости при низких температурах, сохраняется вплоть до температуры плавления. Отмечалось, что количество электронов в полосе проводимости минимально или их нет вообще. При этом вклад в оптическую проводимость от проводимости, описываемой моделью П. Друде, близок к нулю. Стационарную проводимость алюминия, наблюдаемую в опыте, обеспечивают электроны, находящиеся на уровнях вблизи полосы проводимости. Этот факт можно трактовать в духе предположения Н. Мотта о возможности существования внутри полосы проводимости запрещенной области, т. е. говорить о расщеплении полосы проводимости в расплаве алюминия. В настоящей работе методология работы [11] применена к экспериментальным данным [10] для спектра оптической проводимости ртути при комнатной температуре. В работе [10] совмещены результаты работы [12], где измерены оптические характеристики в диапазоне энергии фотонов от 0,5 до 2 эВ, результаты работы [13] с рабочим диапазоном от 1,8 до 3 эВ. Эти результаты были дополнены данными работы [14], в которой рабочий диапазон был расширен до 4 эВ. При описании модельного спектра оптической проводимости в [11] каждый вклад в процессы поглощения фотонов, был представлен в графическом представлении с помощью значений положения пика поглощения фотонов (энергии фотона), высоты пика (совпадающей с частотой плазменных колебаний) и его полуширины (т. е. частоты релаксации). Все эти параметры рассматриваются в зависимости от эффективной массы электронов. Из правила сумм можно сделать вывод, что величина частоты плазменных колебаний вклада в оптическую проводимость, во многом, зависит от заселенности электронами уровня, с которого совершается инициированный фотонами переход. Показана зависимость от эффективной массы электронов величин вкладов в оптическую проводимость от 0 до 2 ртути. Из него видно, что полоса проводимости расщеплена. При описании электропроводности этого металла при комнатной температур

нет необходимости учитывать проводимость модели Друде, поскольку $\omega_{p0} \approx 0$. Стационарную проводимость ртути обеспечивают электроны, находящиеся на уровне с $j = 1$. Электронные параметры вкладов в модельный спектр оптической проводимости представлены для значения эффективной массы электронов полученной из условия близости экспериментальных [15] и расчетных значений поверхностной энергии. Значение эффективной массы электронов для этого условия близко к 0,94. При расчете поверхностной энергии суммируются два вклада от поверхностных локализованных состояний (учитываются электронные характеристики для полос с j равными 2 и 3 [16]). Показано, что экспериментальный спектр оптической проводимости жидкой ртути может быть описан только с привлечением представления о возможности расщепления полосы проводимости.

Литература:

1. Mott N. F., *Phil. Mag.* 13, 989 (1966).
2. Norris C., Rodway D. C., Williams C. P., Enderby J. E., *J. Phys. F: Met. Phys.* 3, L182 (1973).
3. Cotti P., Guntherodt H. J., Munz P. et al., *Solid state com.* 12, 635 (1973).
4. Tsuji K., Fukushima J., Oshima R., Endo H., *Phys. Lett. A.* 30, 173 (1969).
5. Barton L. D., Huang W.F. // *Phys. Lett. A.* 49, 323 (1974).
6. Gustafson D. R., Mackintosh A. R., Zaffarano D. J. // *Phys. Rev.* 130, 1455 (1963).
7. Hensel F., Franck E. U., *Rev. Mod. Phys.* 40, 697 (1968).
8. Kresse G., Hafner J., *Phys. Rev. B.* 55, 7539 (1997).
9. Schulz L., *Adv. Phys.* 6, 102 (1957).
10. Hodson J. N., *Advances in Physics* 16, 675 (1967).
11. Kiselev A., Kononenko V., Akashev L., *ZhFT* 77, 75 (2007). [in Russian]
12. Hodgson J. N. // *Phil. Mag.* 4, 183 (1959).
13. Faber T. E., *J.O.S.A.* 58, 102 (1968).
14. Inagaki T., Arakawa E. T., Williams M. W., *Phys. Rev. B.* 23, 5246 (1981).
15. Kiselev A. Numerical investigation of the state of aggregation of alloys Al-8 at.% Ce on the splitting of the conduction band / scientific papers 2nd International Scientific and Technical Conference «Informatization of processes of formation of open systems based on databases, CAD, ARS and artificial intelligence systems». – Vologda, 2011. p. 90–93.
16. Kiselev A., Kononenko V., *VI, TW* 40, 50 (2002).

ON SPLITTING OF THE CONDUCTION BAND OF MERCURY

A. I. Kiselev, V. G. Shevchenko, A. V. Konukova

Institute of Solid State Chemistry RAS, Ekaterinburg, Russia

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

The idea of splitting of the conduction band of mercury in the liquid form was proposed by Mott in work [1]. The reason for significant divergence between experimental data on electrical conductivity and the model estimates within the Drude's approach (nearly free electron (NFE)

model) were explained by a considerable reduction of the density of states (DOS) in the Fermi surface region in the energy spectrum of mercury electrons. Available experimental data obtained by different methods support the Mott's hypothesis about the presence of a pseudogap in the energy spectrum of mercury. In studies [2, 3], the DOS of mercury near the Fermi level were examined using ultraviolet photoemission spectroscopy. The experimental electron spectrum was compared with the spectrum of the NFE model. It was shown that the DOS at the Fermi level is much smaller than that in the NFE model. In works [4–6], mercury and dilute indium and sodium amalgams were studied using gamma-ray angular distribution during annihilation of metal-irradiating positrons. The results of these studies also showed that the DOS lowers at the Fermi level. It was noted that addition of 4% sodium leads to further reduction of the DOS. Mercury is also characterized by a «metal–insulator» phase transition. This transition was observed experimentally [7]. At low temperatures, electrical conductivity of mercury is of an explicit metallic character. At high temperatures, conductivity decreases by several orders of magnitude and approaches the conductivity values of semiconductors. Later, Kresse et al. [8] calculated the electronic density of states for a wide range of mercury densities using the VASP ab initio package. It was found that a gap is formed in the DOS when the density of mercury reaches 8.8 g/cm³, i. e. in the region where a «metal–insulator» transition takes place. The degree of deviation of the conduction characteristics of mercury from those of the NFE model can be also judged by the optical properties. Analysis of the experimental dependence of optical conductivity on the frequency of light exhibits a misfit with the NFE model [9, 10]. Here, the data of optical experiments for mercury were analyzed employing the method of work [11], where in the consideration of the spectrum of optical conductivity of molten aluminum it was supposed that the splitting of the conduction band of aluminum ensuring superconducting properties at low temperatures is retained up to the melting point. It was noted that the number of electrons in the conduction band is minimal or they are lacking. The contribution to optical conductivity from conductivity described by the Drude's model is close to zero. Fixed conductivity of aluminum observed in the experiments is provided by electrons at the levels close to the conduction band. This fact can be interpreted using the assumption made by Mott about the possibility of existence of a forbidden region inside the conduction band, i. e. we can suppose that the conduction band in molten aluminum is split. In this study, the method of work [11] is applied to the experimental data [10] for the spectrum of optical conductivity of mercury at room temperature. In Ref. [10], the results of work [12], where the optical characteristics are measured in the photon energy range from 0.5 to 2 eV, are combined with the results [13] for the range from 1.8 to 3 eV. These results were supplemented with data [14] for the photon energy range expanded to 4 eV. In the description of the model spectrum of optical conductivity [11], each contribution to photon absorption was graphically represented by the values of the photon

absorption peak position (photon energy), the peak height (coinciding with the frequency of plasma oscillations), and the peak half-width (i. e. by the relaxation frequency). All these parameters are considered as functions of the effective electron mass. To solve the problem of minimizing the deviation model curve optical conductivity from experimental as to account for the behavior of electrons excited phonons 17 transitions, we have to use the model function containing 51 parameter. We proposed minimization procedure, in which a swarm of each parameter was determined by cyclic parabolically when this parameter ensures minimum deflection for three values of the model of the optical conductivity. With the second (mean) value was determined by the magnitude of the working parameters of the previous step of the loop. It is possible to form of an open procedure to minimize [15], which is in itself quite easily and quickly determine the values of the parameters, in contrast to the rigid scheme of the method such as least squares. From the sum rule we can conclude that the value of the plasma oscillation frequency of the contribution to optical conductivity depends considerably on the population of the electronic level from which the photon-initiated transition takes place, demonstrates the dependence between the effective electron mass and the values of the contributions to optical conductivity of mercury with j from 0 to 2. It is seen that the conduction band is split. In the description of electrical conductivity of this metal at room temperature there is no need to consider the conductivity of the Drude's model, since $\omega_{p0} \approx 0$. Fixed conductivity of mercury is provided by electrons at the level with $j = 1$. The electronic parameters of the contributions to the model spectrum of optical conductivity, which provides the best fit with the experimental data are presented for the effective electron mass value obtained on the condition that the experimental [15] and calculated values of the surface energy are similar. The effective electron mass for this condition is close to 0.94. In the calculation of the surface energy, two contributions of the surface localized states are summed the electronic characteristics of the bands with j equal to 2 and 3 are considered [16]. It is shown that the analysis of the experimental spectrum of the optical conductivity of liquid mercury cannot confirm the presence of the splitting of the conduction band and to establish the characteristics of the process.

References

1. Mott N. F., Phil. Mag. 13, 989 (1966).
2. Norris C., Rodway D. C., Williams C. P., Enderby J. E., J. Phys. F: Met. Phys. 3, L182 (1973).
3. Cotti P., Guntherodt H. J., Munz P. at all., Solid state com. 12, 635 (1973).
4. Tsuji K., Fukushima J., Oshima R., Endo H., Phys. Lett. A. 30, 173 (1969).
5. Barton L. D., Huang W. F. // Phys. Lett. A. 49, 323 (1974).
6. Gustafson D. R., Mackintosh A. R., Zaffarano D. J. // Phys. Rev. 130, 1455 (1963).
7. Hensel F., Franck E. U., Rev. Mod. Phys. 40, 697 (1968).
8. Kresse G., Hafner J., Phys. Rev. B. 55, 7539 (1997).
9. Schulz L., Adv. Phys. 6, 102 (1957).
10. Hodson J. N., Advances in Physics 16, 675 (1967).
11. Kiselev A., Kononenko V., Akashev L., ZhFT 77, 75 (2007). [in Russian]
12. Hodgson J. N. // Phil. Mag. 4, 183 (1959).
13. Faber T. E., J.O.S.A. 58, 102 (1968).
14. Inagaki T., Arakawa E. T., Williams M. W., Phys. Rev. B. 23, 5246 (1981).
15. Kiselev A. Numerical investigation of the state of aggregation of alloys Al-8 at.% Ce on the splitting of the conduction band / scientific papers 2nd International Scientific and Technical Conference «Informatization of processes of formation of open systems based on databases, CAD, ARS and artificial intelligence systems». – Vologda, 2011. p. 90–93.
16. Kiselev A., Kononenko V., VI, TW 40, 50 (2002).

4-87

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА С НАНОРЕЛЬЕФОМ

А. А. Эбель^{1,2}, А. Е. Майер¹

¹Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

E-mail: mayer@csu.ru, ebel-aa@yandex.ru

При отражении импульса ударного сжатия от свободной поверхности металла возникает распространяющаяся в обратном направлении волна растяжения, которая может вызвать откольное разрушение. Если на свободной поверхности имеется нанорельеф в виде осажженных наночастиц, выступов или впадин, сравнимых по размеру с толщиной импульса сжатия, то воздействие импульса сжатия приводит к интенсивной пластической деформации элементов нанорельефа поверхности. В результате, с одной стороны, часть энергии импульса сжатия рассеивается, что приводит к уменьшению амплитуды волны растяжения и увеличению порога откола [1, 2], с другой стороны происходит компактирование поверхностного слоя образца. Первый эффект можно использовать для увеличения откольной прочности, а второй для закрепления осажженных наночастиц в виде пленки.

В докладе рассмотрены результаты молекулярно-динамического моделирования взаимодействия пикосекундных импульсов сжатия с плоской поверхностью и поверхностью с осажженными наночастицами или выступами. Импульс сжатия возбуждался плоским ударником. Для алюминиевых и медных образцов исследована зависимость минимальной амплитуды ударной волны, приводящей к отколу, от характеристик нанорельефа. Определены условия компактирования слоя наночастиц в монолитное покрытие за счет пластической деформации, инициированной импульсом сжатия.

Литература

1. Mayer A. E., Ebel A. A. Influence of free surface nanorelief on the rear spallation threshold: molecular-dynamics investigation – J. Appl. Phys. Vol. 120, 2016–165903.
2. Ebel A. A., Mayer A. E. Molecular dynamic investigations of the shock pulses interaction with nanostructured free surface of a target – J. Phys.: Conf. Ser. 774, 2016–165903.

ATOMISTIC SIMULATION OF THE PLASTIC DEFORMATION AT THE SHOCK WAVE REFLECTION FROM THE METALS SURFACE WITH NANORELIEF

A. A. Ebel^{1,2}, A. E. Mayer¹

¹Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

²South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

E-mail: mayer@csu.ru, ebel-aa@yandex.ru

Upon reflection of the compression pulse from the free surface of the material, a tensile wave arises propagating in the opposite direction; this wave can induce the spall fracture. If the free surface has a nanorelief in the form of deposited nanoparticles, protrusions or cavities comparable in size with the compression pulse thickness, that the compression pulse action causes a severe plastic deformation of the surface nanorelief elements. Consequently, on the one hand, a part of the compression pulse energy is dissipated that reduces the tensile wave and increases the spalling threshold amplitude [1, 2]; on the other hand, a compaction of the surface layer occurs. The first effect can be used to increase the spallation resistance, and the second effect can be used to secure the deposited nanoparticles in the form of a film

In this report we consider the molecular dynamic simulation results for the interaction of picosecond compression pulses with a flat surface and a surface with deposited nanoparticles or projections. The compression pulse is excited by a flat impactor. We investigate for aluminum and copper samples the dependence of the minimal shock wave amplitude resulting in spallation from the nanorelief characteristics. Also we determine the conditions for a nanoparticle layer compaction into a monolithic coating by means of plastic deformation initiated by the compression pulse.

References

1. Mayer A. E., Ebel A. A. Influence of free surface nanorelief on the rear spallation threshold: molecular-dynamics investigation – J. Appl. Phys. Vol. 120, 2016–165903.
2. Ebel A. A., Mayer A. E. Molecular dynamic investigations of the shock pulses interaction with nanostructured free surface of a target – J. Phys.: Conf. Ser. 774, 2016–165903.

4-88

ИЗУЧЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ В ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т ПОСРЕДСТВОМ РЕГИСТРАЦИИ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ И ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДВУМ НЕЗАВИСИМЫМ МЕТОДАМ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРЕГРАДЕ ИЗ МРАМОРА

Д. Т. Юсупов, Е. А. Козлов, К. С. Сидоров,
А. И. Клёнов, А. Е. Ширококов, Р. В. Комаров,
А. В. Петровцев, Д. М. Шалковский

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

Представлены постановка и результаты взрывных экспериментов с одновременной регистрацией сигналов от четырех низкоомных манганиновых датчиков и от трех лазерных интерферометрических измерителей скорости.

Цель работы – экспериментальная проверка расчетного прогноза и результатов регистрации газодинамических процессов при совмещении двух независимых методик – многоканальной манганиновой (ММД) и лазерно-интерферометрической на основе лазерного гетеродина (ЛГМ).

Задача – в дополнение к выполненным расчетам и проведенным ранее экспериментам получить результаты измерений $\sigma_{xx}(t)$ в реальном физическом процессе с реализацией двойного искусственного откола в ударнике из стали 12Х18Н10Т, при этом измерить скорость $w(t)$ первой пластины и зарегистрировать профиль скорости границы 12Х18Н10Т-оконный материал (LiF) при ударе всего летящего каскада.

Дано описание плосковолнового нагружающего устройства, методов регистрации – манганиновых датчиков и лазерного гетеродина, приведен состав и конструкция используемого механического узла (материал и количество ударников, их плотности и толщины, путь полета, материал, плотность и толщины деталей мишени).

Стальная (12Х18Н10Т) пластина-ударник состояла из трех прижатых друг к другу слоев, толщиной (в порядке соударения с мишенью) соответственно 1 мм, 1 мм и 4 мм, имитирующих первый и второй естественные отколы в пластине с исходной толщиной 6 мм.

Представлены зарегистрированные в эксперименте сигналы от четырех манганиновых датчиков в координатах $\sigma_{xx}(t)$. Показаны результаты лазерно-интерферометрических измерений скорости $w(t)$ первой тонкой откольной пластины и профиль зависимости скорости границы 12Х18Н10Т-LiF от времени. Реализована, предсказанная расчетом, трехволновая конфигурация ударной волны в мраморной преграде.

В экспериментах в представленной постановке можно с достаточным разрешением регистрировать не только макро повреждения (с полным расхождением откольных слоев), но оценить поврежденность в неразрушенном ударнике.

Результаты измерений двух независимых методик в деталях согласуются с расчетным прогнозом, а так же между собой.

**STUDY OF MULTIPLE SPALLATIONS
IN FLAT METAL PLATES MADE
OF 12X18H10T AUSTENITIC STEEL
BY RECORDING VELOCITY PROFILES
AND AXIAL STRESSES IN MARBLE BARRIER
USING TWO INDEPENDENT MEASUREMENT
TECHNIQUES**

D. T. Yusupov, E. A. Kozlov, K. S. Sidorov,
A. I. Kleynov, A. E. Shirobokov, R. V. Komarov,
A. V. Petrovtsev, D. M. Shalkovsky

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

The paper presents results of explosive experiments with concurrent recording of signals from four low-resistance manganin gauges and three interferometric laser velocimeters.

The objective is to test experimentally the predictions and results of recording gas-dynamic processes using two independent techniques – multichannel manganin (MMD) and laser-interferometry based on laser heterodyne (LHM).

The task is to obtain, in addition to performed calculations and earlier experiments, the results of measuring $\sigma_{xx}(t)$ in real physical process with double artificial spall in the impactor made of 12X18H10T steel; to measure the velocity $w(t)$ of the first plate and to record the velocity profile of 12X18H10T-window material (LiF) boundary under impact of all the flying cascade.

The plane-wave loading device, the recording techniques, that is, manganin gauges and laser heterodyne are described, the design and composition of used mechanical assembly (impactor material and quantity, their density and thickness, flight route, material and thickness of target elements) are presented.

The steel (12X18H10T) impactor was composed of three appressed layers of thickness 1 mm, 1 mm, and 4 mm, correspondingly (in order of impact with the target), which simulated the first and the second natural spalls in the plate of initial thickness 6 mm.

Experimental signals recorded by four manganin gauges are presented in $\sigma_{xx}(t)$ coordinates. Shown are the results of interferometric laser velocimetry $w(t)$ of the first thin spall and the profile of 12X18H10T-LiF boundary velocity vs time. The predicted three-wave configuration of shock wave is realized in the marble barrier.

The presented experimental set up allows one to record, with sufficient resolution, not only macro-spalls (with complete divergence of spallation layers), but also to estimate spalls in undamaged impactor.

Measurement results obtained by two independent techniques agree well with each other and with predictions.

4-89

**УДАРНАЯ АДИАБАТА И ЗАВИСИМОСТЬ
СКОРОСТИ ЗВУКА ОТ ДАВЛЕНИЯ
В ОБРАЗЦАХ ИЗ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ
СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ НИКЕЛЯ
И АЛЮМИНИЯ РАЗЛИЧНОЙ
ДИСПЕРСНОСТИ**

В. В. Якушев¹, А. В. Уткин¹, А. Ю. Долгобородов²,
С. Ю. Ананьев², А. Н. Жуков¹, О. А. Ивашко³

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,
Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

³Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: yakushev@icp.ac.ru

Проведено исследование возможности протекания быстрой реакции в двухкомпонентных смесевых образцах (Ni + Al) при ударно-волновом нагружении летящей пластиной за время до прихода тыльной волны разгрузки. Экспериментально определены ударные адиабаты образцов и зависимости скорости звука от давления нагружения. Построено уравнение состояния смеси (Ni + Al) без учета реакции между компонентами. Оценено положение ударной адиабаты смесевых образцов относительно линий плавления компонентов.

Для изготовления образцов использовались эквивалентные механоактивированные смеси порошков никеля и алюминия двух типов – микродисперсная (средние размеры частиц: никель ПНК-1 ~20 мкм и алюминиевая пудра ПП-2 ~100×2 мкм) и нанодисперсная (80 и 100 нм). Из смесей прессовали образцы в форме таблеток диаметром 20–40 мм, толщиной 2,5–9 мм. Пористость образцов составляла 25%. Образцы нагружали до давлений 10 и 30 ГПа алюминиевыми ударниками с использованием взрывных метательных устройств. Регистрация профилей скорости движения границы образец – водяное окно проводилась с использованием лазерного интерферометра VISAR. Скорость ударной волны в образцах определялась по меткам времени. Скорость звука в ударносжатом веществе определялась по методу догоняющей разгрузки.

Показано, что ударные адиабаты образцов из микродисперсной и нанодисперсной смесей совпадают в пределах погрешности эксперимента. В то же время зависимость скорости звука от давления для образцов из нанодисперсной смеси проходит заметно выше таковой для микродисперсной смеси. Несовпадение этих зависимостей не позволяет сделать определенных выводов о глубине протекания реакции, поскольку

ку следует также учитывать возможное влияние на скорость звука структуры материала образцов (дисперсности частиц). С другой стороны, если бы зависимости совпадали, то это бы однозначно указывало на то, что реакция не успевает начаться за короткое время до начала разгрузки.

HUGONIOT AND SOUND VELOCITY PRESSURE DEPENDENCE IN SAMPLES OF REACTIVE MIXTURES OF NICKEL AND ALUMINUM POWDERS OF DIFFERENT DISPERSITY

V. V. Yakushev¹, A. V. Utkin¹, A. Yu. Dolgoborodov²,
S. Yu. Ananov², A. N. Zhukov¹, O. A. Ivashko³,

¹The Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

²Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: yakushev@icp.ac.ru

A research on the possibility of a fast reaction in two-component mixture samples (Ni+Al) at shock wave loading by flying plate for the time interval before coming of back release wave was conducted. Hugoniots of the samples and dependences of sound velocity on pressure are measured. Equation of state of the mixture (Ni+Al) without taking into account the reaction between the components was constructed. Location of the Hugoniot of mixture samples relatively to melting lines of the components is estimated.

For preparation of samples two types of equiatomic mechanically activated mixtures of nickel and aluminum powders were used – microdisperse (average size of particles 20 and 100×2 μm) and nanodisperse (80 and 100 nm). The samples were made by pressing of mixtures to a form of pellets with diameter of 20–40 mm and thickness of 2.5–9 mm. The porosity of samples was about 25%. The loading of the samples to 10 and 30 GPa was fulfilled by aluminum flyers using explosive throwing devices. The registration of velocity profiles of the boundary sample – water window was performed using laser interferometer VISAR. Shock velocity was determined with the help of time markers. Sound velocity in shock compressed substance was measured by the method of overtaking rarefaction wave.

It was shown that the Hugoniots of the samples made of microdisperse and nanodisperse mixtures coincides within the error of the experiment. At the same time the dependence of sound velocity for nanodispersed mixture is located markedly higher than that for microdisperse mixture. Misalignment of those dependencies do not allow drawing definite conclusion relevant to the reaction depth, since it is also necessary to consider possible influence of structure (dispersity) of material of the samples on sound velocity. From the other side if the dependencies coincide it would be uniquely pointed out that the reaction doesn't have enough time to begin within short time before release.

Секция 5

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
И РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ**

Section 5

**SCIENTIFIC BASES
OF NUCLEAR POWER ENGINEERING
AND NUCLEAR MEDICINE**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА
ИЗ ПОЛИКАРБОНАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВОПРОСОВ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
НА АЭС**

Е. В. Безгодков, И. В. Лавренюк, В. А. Симоненко,
С. Д. Пасюков, М. В. Никифоров, В. П. Бакаев,
В. Н. Федюшкин, И. А. Попов

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

E-mail: e.v.bezgodov@vniitf.ru

В 2016 г. в РФЯЦ – ВНИИТФ были проведены эксперименты, направленные на исследование струйных течений, воспламенения и режимов горения водородосодержащих парогазовых смесей (ВПГС) в макетах помещений защитной оболочки (ЗО) атомных электростанций (АЭС) в разных масштабах от 1:10 до 1:200. Часть экспериментов проводилась на пробной установке (макете), стенки которой были выполнены из литых прозрачных поликарбонатных листов [1]. Результаты экспериментов подтвердили эффективность использования макета при исследовании вопросов водородной безопасности (ВБ).

Макет из поликарбоната обладает рядом преимуществ. Для его создания требуются небольшие денежные затраты, малое время развертывания оборудования и инфраструктуры. Прозрачность стенок макета облегчает оптическую регистрацию процессов горения, причем область наблюдения охватывает весь макет. Простота конструкции дает возможность копировать геометрию моделируемых объектов, например таких, как помещения парогенератора и примыкающих к нему помещений. Но вследствие ограниченной прочности и термостойкости макет рассчитан на низкое давление (1 атм.) и температуру до 150°C.

Установка оснащена датчиками непрерывного измерения относительной влажности (до 20 шт.), температуры (≈ 36 шт.), давления (1–3 шт.). Состав смеси газов определяется с помощью газового отбора проб, имеется возможность установки датчиков водорода. Регистрация распространения пламени по макету в нескольких проекциях осуществляется с помощью BOS-методики.

В макете наблюдалась стратификация ВПГС либо однородное перемешивание над источником инъекции. Получены данные по характеру распространения пламени в зависимости от таких особенностей моделируемой конструкции, как проемы между помещениями и загромождение пространства помещения оборудованием. Расчетное сопровождение указывает на возможность применения результатов экспериментов для валидации CFD-кодов и кодов с сосредоточенными параметрами. По результатам экспериментов разработан проект по усилению прочности макета для его многократного использования в экспериментах с горением водорода.

В докладе предложены варианты использования установки из поликарбоната в исследовании вопросов ВБ.

Литература

1. Е. В. Безгодков, И. В. Лавренюк, И. А. Доровских и др. Результаты экспериментальных исследований процессов стратификации и горения ВПГС в разрушаемых макетах, Научная сессия НИЯУ-МИФИ-2016. Сборник научных трудов. Заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии. Технология замыканий ядерного топливного цикла и водородная безопасность. 5–6 мая 2016 г., Снежинск. М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2016.

**THE EXPERIMENTAL POLYCARBONATE
FACILITY FOR RESEARCH OF HYDROGEN
SAFETY AT NUCLEAR POWER PLANT**

E. V. Bezgodov, I. V. Lavrenyuk, V. A. Simonenko,
S. D. Pasyukov, M. V. Nikiforov, V. P. Bakaev,
V. N. Fedyushkin, I. A. Popov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
e.v.bezgodov@vniitf.ru

In 2016 RFNC – VNIITF conducted experiments aimed to study jet flows, ignition and combustion regimes of hydrogen-containing vapor-gas mixture (HVGGM) in prototype chambers of the containment of nuclear power plant (NPP) at different scales from 1:200 to 1:10. Part of experiments on the prototype facility were conducted, whose walls were made with cast transparent polycarbonate sheets [1]. Experimental results confirmed efficiency of the prototype in study of hydrogen safety issues.

The polycarbonate prototype has several advantages. A small cost, short time deployment of equipment and infrastructure is required to create it. Transparent walls simplify optical registration of combustion processes; observation areas cover the entire prototype. Simplicity of the design makes it possible to copy the geometry of the modeled objects, such as the steam generator chamber and adjacent areas. But due to limited strength and heat resistance, the prototype is designed for low pressure (1 bar) and temperatures up to 150°C.

The facility is equipped with continuous measurement sensors of relative humidity (up to 20), temperature (about 36) and pressure (1 to 3). The composition of gas mixture is determined by using gas sampling. There is a possibility to install of hydrogen sensors. Registration of flame propagation on the prototype from several projections is implemented with background oriented schlieren (BOS) method.

In the prototype stratification of HVGGM or homogeneous mixing above the injection source were observed. The data on nature of flame propagation were received, which depend on such parameters of the modeled design as openings between chambers and cluttered space by the chamber equipment. Calculation support indicates to possibility of applying results of experiments for validation

of CFD codes and codes with lumped parameters. According experiments results the project for reinforcement strength of the prototype for reusable in experiments with hydrogen combustion is designed.

The report proposed options usage of the polycarbonate facility in study of hydrogen safety issues.

References

1. Bezgodov E. V., Lavrenyuk I. V., Dorovskih I. A. et al. Experimental results of stratification and combustion processes of hydrogen-containing vapor-gas mixtures in destroyed prototypes. Scientific session NRNU MEPH-2016. Collection of scientific papers. Meeting of thematic sections in the direction of «Innovative nuclear technology. Technology for closing nuclear fuel cycle, and hydrogen safety». May 5–6, 2016, Snezhinsk.

5-2

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ БЛОЧНОГО РАСПЛАВНОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА С РАЗДЕЛЕНИЕМ ФУНКЦИЙ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

М. Н. Белоногов^{1,2}, В. А. Симоненко¹

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

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: m.n.belonogov@vniitf.ru

В работе представлена концепция блочного расплавносолевого реактора с разделением функций производства и передачи энергии. Приводятся результаты оптимизации нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик предложенной модели активной зоны блока реактора на основе результатов многовариантных расчетов.

Для проведения детального теплогидравлического расчета полномасштабной модели реакторной установки необходимо построение сеточной модели с большим количеством ячеек (примерно 2 миллиона). Предварительные теплогидравлические расчеты с таким количеством элементов с использованием программного пакета ANSYS FLOTRAN [1] показали значительное время расчета ввиду отсутствия возможности проведения параллельных вычислений. Поэтому было принято решение использовать параллельную версию программного пакета ANSYS FLUENT. Это позволило на порядок сократить время одного расчета. Для построения сеточной модели использовались средства сеткопостроителя Meshing среды моделирования ANSYS Workbench.

Реализованная модель реакторной установки содержит управляющие параметры, что позволяет упростить построение геометрии реактора и варь-

ровать детализацию расчетной сетки. Разработан и реализован алгоритм движения органов системы управления и защиты (СУЗ). Представлены результаты предварительных расчетов теплогидравлических характеристик.

Нейтронно-физические расчеты проводились с помощью программного комплекса ПРИЗМА+РИСК, разработанного в РФЯЦ – ВНИИТФ [2, 3]. Определен состав топливной соли, обеспечивающий критичность блока. Определена необходимая толщина поглотителя в стержнях СУЗ.

Литература

1. Инженерный анализ в Ansys Workbench / Брюка В. А., Фокин В. Г., Солдусова Е. А., Глазунова Н. А., Адеянов И. Е. Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. – 271 с.
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.

OPTIMIZATION OF NEUTRON-PHYSICAL AND THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF ACTIVE ZONE OF MODULAR MOLTEN SALT REACTOR WITH PARTITION OF ENERGY GENERATION AND ENERGY TRANSMISSION FUNCTIONS

M. N. Belonogov^{1,2}, V. A. Simonenko¹

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

²Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

E-mail: m.n.belonogov@vniitf.ru

The paper presents the concept of modular molten salt reactor with partition of energy generation and energy transmission functions. The results of optimization of neutron-physical and thermal-hydraulic characteristics of the proposed one-module model of reactor active zone on the basis of the multivariate calculations results are described.

For the detailed thermal-hydraulic calculation of reactor plant full scale model it is necessary to build grid model with a large number of cells (approximately 2 million). Preliminary thermal-hydraulic calculations with this number of cells using software package ANSYS FLOTRAN [1] have shown a significant calculation time due to the lack of parallel computation. Therefore it was decided to use a parallel version of the software package ANSYS FLUENT. This allowed reducing the time of single calculation significantly. For constructing grid model, the tools of the Meshing module of the ANSYS Workbench modeling environment were used.

Implemented grid model of reactor plant contains control parameters that allow to simplify construction of reactor geometry and to vary computational grid detailing. The algorithm of motion of the control and protection system (CPS) rods has been developed and implemented. The paper presents the results of preliminary thermal-hydrodynamic calculations.

Neutron-physical calculations has been carried out by means of the software complex PRIZMA+RISK [1, 2] developed by the VNIITF. The fuel salt composition, which provides criticality of reactor, was calculated. The required thickness of the absorber in CPS rods has been determined.

References

1. Engineering analyze in Ansys Workbench / Bruyaka V. A., Fokin V. G., Soldusova E. A., Glazunova N. A., Adeyanov I. E. Samara: Samara State Technical University, 2010. – P. 271 [in Russian].
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 [in Russian].
3. Modestov D. G. The solution of radioactive decay equations. Issues of nuclear science and engineering // Mathematical simulation of physical processes. 2006 [in Russian].

5-3

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ВОДО-ВОДЯНОГО РЕАКТОРА В РАМКАХ ПРОЕКТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ ПО ОТРАБОТАННОМУ ТОПЛИВУ С ГЛУБОКИМ ВЫГОРАНИЕМ

Б. Бивард, Д. М. Скальоне, Р. Монтгомери

Группа по изучению систем использованного топлива,
Окриджская национальная лаборатория, Окридж,
штат Теннесси, США

E-mail: bevardbb@ornl.gov

В рамках проекта по получению данных по отработанному топливу с глубоким выгоранием (далее именуемый «проект»), финансируемого Управлением по атомной энергии Министерства энергетики США (МЭ), проводится экспериментальное определение влияния длительного хранения и транспортировки на топливо из водо-водяного ядерного реактора (ВВЭР) с глубоким выгоранием (>45 гигавайт-суток на метрическую тонну урана). Целью проекта является получение подтверждающих данных для обоснования и потенциального улучшения моделей, получение входных данных для проектирования будущего контейнера сухого хранения, продление действующих и получение новых лицензий для объектов автономного хранения отработанного ядерного топлива и обеспечение поддержки по вопросам получения лицен-

зий для транспортировки использованного топлива. Кроме того, Национальная администрация США по ядерной безопасности (НАЯБ) при Министерстве энергетики США оказывает поддержку проведению измерений по оценке состава делящихся материалов.

Для достижения целей проекта на реакторной площадке «Норд Анна» (North Anna) в оборудованный измерительной аппаратурой контейнер TN-32B с завинчивающейся болтами крышкой будут помещены неповрежденные тепловыделяющие сборки ВВЭР с глубоким выгоранием (проектные ТВС) с четырьмя разными видами оболочек: Циркалой-4 стандартный, Циркалой-4 с низким содержанием олова, ZIRLO® и M5® [1, 2]. Примерно через десять лет оборудованный измерительной аппаратурой контейнер будет вскрыт для проверки и будут определены характеристики нескольких топливных стержней из проектных ТВС [1, 2].

В рамках поставленных задач для определения характеристик были взяты 25 «родственных» стержней, т. е. девять стержней из проектных ТВС и 16 – из аналогичных сборок с глубоким выгоранием. Все 25 «родственных» стержней характеризуются большой глубиной выгорания и набором различных сплавов для оболочек. В начале 2016 года 25 «родственных» стержней были отправлены в Окриджскую национальную лабораторию (ОРНЛ) для проведения детальных неразрушающих (НРА) и разрушающих исследований, целью которых было получение базовых данных по исходному физическому состоянию оболочки и топлива до его загрузки, высушивания и длительного сухого хранения. Далее определялись температурные эффекты, возникшие во время и по окончании процессов высушивания. Аналогичные исследования будут проведены со стержнями из проектных ТВС в конце срока хранения («контейнерные стержни») для выявления каких-либо значительных изменений в топливных стержнях, которые могли произойти в процессе загрузки, высушивания и сухого хранения. Кроме того, некоторые из «родственных» стержней будут исследованы для определения влияния индивидуальных эффектов на процесс, чтобы полученные в ходе выполнения проекта данные можно было применять для всего комплекса средств и для устранения некоторых пробелов в данных, обусловленных длительным хранением и последующей транспортировкой топлива с глубоким выгоранием.

Неразрушающие исследования всех стержней проводятся с использованием имеющегося в ОРНЛ оборудования для усовершенствованной диагностики и оценки, т. е. так называемой «Платформы для усовершенствованной диагностики и оценки». Неразрушающие исследования были начаты в октябре 2016 года и включают в себя полное визуальное обследование топливных стержней на предмет отсутствия дефектов или повреждений, а также документирование наличия каких-либо продуктов коррозии или повреждений/следов износа оболочки. Серия полученных изображений будет смонтирована таким образом, чтобы обеспечить их цифровой просмотр. Гамма-сканирование

будет использоваться для измерения относительной активности в зависимости от осевого положения, для выявления просадок от выгорания в углах дистанционирующей решетки, определения высоты столбика топливных таблеток и выявления зазоров между таблетками. Будет измерена общая длина стержня, а также диаметр стержня в зависимости от осевого положения, при этом особое внимание будет обращаться на какие-либо необычные особенности или овальность. Метод вихревых токов будет использоваться для обнаружения дефектов оболочки (трещины или сквозная коррозия) и оценки толщины оксидов и толщины стенки оболочки. С помощью гамма-сканирования высокого разрешения будут получены данные для оценки состава делящихся материалов, а также выгорания топлива в зависимости от осевого положения.

Разрушающие исследования начнутся после завершения неразрушающих исследований и будут включать в себя металлографию, испытания оболочки на растяжение, анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии, испытания для оценки влияния водорода на оболочку, испытания на изгиб в 4х точках, испытания на изломостойкость, испытания системы «топливо/оболочка» на прочность для измерения устойчивости топлива к транспортным вибрациям (циклические комплексные обратимые испытания на усталостную прочность – CIRFT) и исследование секций стержней, прошедших термообработку для моделирования условий сухого контейнерного хранения. Топливо будет подвергнуто разрушающему анализу для определения изотопного состава с целью подтверждения правильности расчетных кодов.

Ключевые слова: сухое хранение, использованное ядерное топливо, глубокое выгорание, «родственные» стержни.

NON-DESTRUCTIVE EXAMINATIONS OF PWR RODS IN THE HIGH BURNUP SPENT FUEL DATA PROJECT

B. Bevard, J. M. Scaglione, R. Montgomery

Used Fuel Systems Group, Oak Ridge National Laboratory,
Oak Ridge, USA

E-mail: bevardbb@ornl.gov

The High Burnup Spent Fuel Data Project (herein referred to as the “project”), sponsored by the US Department of Energy (DOE) Office of Nuclear Energy (NE), is focused on experimentally defining the effects of long-term storage and transportation on high burnup (HBU) pressurized water reactor (PWR) fuel (>45 gigawatt days per metric ton uranium). The goals of the project are to provide confirmatory data for model validation and potential improvement; to provide input to future dry storage cask design; to support license renewals and new licenses for Independent Spent Fuel Storage Installation facilities; and to support transportation licensing for HBU used fuel. In addition, the DOE’s National Nuclear Secu-

rity Administration (NNSA) is supporting measurements related to estimation of fissile material content.

In support of these project goals, an instrumented TN-32B bolted-lid cask at the North Anna reactor site will be loaded with intact, HBU PWR fuel assemblies (project assemblies) having four different kinds of cladding: standard Zircaloy-4, low-tin Zircaloy-4, ZIRLO®, and M5® [1, 2]. In approximately ten years, the instrumented cask will be opened for inspection and several fuel rods from the project assemblies will be characterized [1, 2].

To support the project goals, the project pulled 25 “sister rods”, nine from the project assemblies and 16 from similar HBU assemblies, for characterization. The 25 sister rods are all high burnup and cover the range of cladding alloys. The 25 sister rods were shipped to Oak Ridge National Laboratory (ORNL) in early 2016 for detailed non-destructive (NDE) and destructive examination. Examinations are intended to provide baseline data on the initial physical state of the cladding and fuel prior to the loading, drying, and long-term dry storage. Further examinations are focused on determining the effects of the temperatures encountered during and following drying. Similar tests will be performed on rods taken from the project assemblies at the end of the storage period (the “cask rods”) to identify any significant changes in the fuel rods that may have occurred during the loading, drying, and dry storage. Additionally, some of the sister rods will be used for separate effects testing to expand the applicability of the project data to the fleet and to address some of the data-related gaps associated with extended storage and subsequent transportation of HBU fuel.

All of the rods are being examined non-destructively using ORNL’s Advanced Diagnostics and Evaluation Platform. The NDE started in October 2016, and includes a complete visual inspection to verify that the fuel rods are sound and undamaged, and to document any crud or cladding damage/wear marks. The series of images obtained will be stitched together to provide a digital user-viewable montage. Gamma scanning will be used to measure relative activity as a function of axial position, note any burnup depressions at spacer grid elevations, determine pellet stack height, and note any gaps between pellets. The overall rod length will be measured, along with the rod diameter as a function of axial position, noting any unusual features or ovality. Eddy current will be used to locate cladding flaws (such as cracks or through-wall corrosion) and to estimate the oxide and cladding wall thickness. High resolution gamma scans will be performed to collect data to estimate fissile material content along with axial dependent fuel burnup.

Destructive testing will follow the completion of the NDE and will include metallography examinations, clad tensile testing, scanning electron microscopy evaluations, testing to evaluate hydrogen effects on the cladding, 4-point bend testing, fracture toughness testing, testing for fuel/clad system strength to measure fuel’s ability to withstand transportation vibration (Cyclic Integrated Reversible Fatigue Testing – CIRFT), and tests on rod sections that have been heat treated to simulate dry cask con-

ditions. The fuel will be analyzed by destruction analysis for isotopic content to validate code calculations.

Keywords: dry storage, used nuclear fuel, high burnup, sister rods.

5-4

ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫБРОСОВ И СБРОСОВ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР

Е. Н. Ботько

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

E-mail: Jeffrey_4@mail.ru

Как любое промышленное предприятие, атомная электростанция (АЭС) взаимодействует с окружающей средой. Кроме этого, эксплуатация АЭС оказывает значительно меньшее воздействие на окружающую среду в сравнении с электростанциями, которые используют углеводородное топливо. Однако, несмотря на наличие глубоководной защиты, многоканальной структуры системы безопасности, наличие активных и пассивных систем безопасности, самозащитности реакторной установки, культуры безопасности и т. д. атомная станция остается источником потенциальной радиационной опасности. Именно поэтому, еще на стадии проектирования АЭС предусматриваются защитные системы и разрабатываются меры, направленные на предупреждение развития аварийных ситуаций.

Достаточность защиты окружающей среды и населения достигается тогда, когда дозовые нагрузки и концентрации вредных веществ в средах не превосходят предельных, критических значений, определенных в правилах и нормах по атомной энергетике (НРБ, СанПиН). Существуют два основных фактора возможного радиационного воздействия АЭС на окружающую среду: газоаerosольные выбросы в атмосферу и сбросы радиоактивных веществ в водные объекты.

В связи с возрастающей долей атомной энергетики трудно переоценить важность работы по отслеживанию влияния на окружающую среду «продуктов нормальной жизнедеятельности АЭС» в свете последних аварий на объектах ядерной промышленности.

В ходе проведенного исследования были проанализированы данные по выбросам и сбросам радиоактивных веществ от АЭС с реакторами типа ВВЭР. Произведена оценка вклада ^3H и ^{14}C в дозу облучения и индекс выбросов. На основании расчетных оценок определена необходимость нормирования выбросов радионуклидов и осуществления их контроля. По результатам расчетных оценок установлено, что вклад ^3H и ^{14}C в дозу облучения и индекс выбросов значительно превышает 1%.

Полученные результаты подтверждают, что экологическая политика на всех атомных электростанциях

постоянно проверяется на соответствие установленным требованиям и актуализируется. С этой целью на рассматриваемых предприятиях ежегодно разрабатываются планы мероприятий по совершенствованию экологического менеджмента, включающие в себя технические мероприятия.

Таким образом, установлено, что все запланированные мероприятия способствуют обеспечению безопасности и снижению воздействия АЭС на окружающую среду.

ASSESSMENT OF ADMISSIBLE VALUES OF EMISSIONS AND DUMPINGS OF RADIOACTIVE MATERIALS ON THE NPP WITH VVER REACTORS

E. N. Botko

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

E-mail: Jeffrey_4@mail.ru

As any industrial enterprise, the nuclear power plant (NPP) interacts with the environment. Besides, operation of the NPP makes considerably smaller impact on the environment in comparison with power plants which use hydrocarbonic fuel. However, despite availability of protection in depth, multichannel structure of a security system, availability of active and passive security systems, the nuclear power plant remain self-security of reactor installation, culture of safety, etc. a source of potential radiation hazard. For this reason, for blueprint stage of the NPP protective systems are provided and the measures directed to the prevention of development of emergencies are developed.

Sufficiency of environment protection and the population is reached when dose loadings and concentration of hazardous substances in environments don't exceed the extreme, critical values determined in rules and regulations by nuclear power (NRB, the SanPiN). There are two major factors of possible radiative effects of the NPP on the environment: gas-aerosol emissions in the atmosphere and dumpings of radioactive materials in water objects.

Due to the increasing share of nuclear power it is difficult to reevaluate importance of work on tracking of an environmental impact of «products of normal activity of the NPP» in the light of the last accidents on objects of the nuclear industry.

During the conducted research data on emissions and dumpings of radioactive materials from the NPP with VVER reactors were analysed. Assessment of a contribution ^3H and ^{14}C in a dose of radiation and an index of emissions is made. Based on estimations need of regulation of emissions of radionuclides and implementation of their control is determined. By results of estimations it is established that the contribution ^3H and ^{14}C in a dose of radiation and an index of emissions considerably exceeds 1%.

The received results confirm that environmental policy on all nuclear power plants is constantly checked for

compliance to the established requirements and is standardized. For this purpose at the considered entities the actions plans on enhancement of ecological management including technical actions annually are developed.

Thus, it is established that all planned actions promote safety and decrease in impact of the NPP on the environment.

5-5

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. А. Бочкарева, О. В. Шульц, И. Р. Makeeva,
В. Ю. Пугачёв, В. Г. Дубосарский, О. В. Кузнецова,
Л. Н. Дарина, И. В. Пешкичев

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

E-mail: a.a.bochkareva@vniitf.ru

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 170100873.

В РФЯЦ – ВНИИТФ разрабатывается программный модуль, предназначенный для термодинамического моделирования высокотемпературных процессов. Основными функциями модуля являются: работа с базой термодинамических данных, расчет термодинамических параметров отдельных реакций и расчет химического равновесия в многокомпонентных многофазных системах.

Термодинамическое моделирование опирается на справочные данные о термодинамических свойствах веществ (зависимости энергии Гиббса, теплоемкости, энтропии, энтальпии от температуры). Для расчетов химического равновесия в многокомпонентных многофазных системах в программном модуле используются алгоритмы минимизации энергии Гиббса.

Программный модуль создан на базе среды Microsoft .NET Framework 4.0 на языке C# 4.0, использует очень быструю автономную СУБД SQLite, а также современную систему построения интерактивного пользовательского интерфейса Windows Presentation Foundation (WPF 4.0) и рассчитан на работу в операционных системах Windows XP/Vista/7/8.

Программный модуль позволяет проводить оценки исходного состава (качественного и количественного), оптимального температурного режима процесса, аппаратного оформления (выбор материалов и размеров аппаратов) для получения продукта заданного состава, прогнозировать результаты высокотемпературных воздействий, определять возможность использования новых перспективных технологий и оценивать возможности модернизации уже используемых.

PROGRAM MODULE FOR THERMODYNAMIC MODELING

A. A. Bochkareva, O. V. Shults, I. R. Makeeva,
V. Yu. Pugachyov, V. G. Dubosarskiy, O. V. Kuznetsova,
L. N. Darina, I. V. Peshkichev

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

E-mail: a.a.bochkareva@vniitf.ru

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 170100873

Program module for thermodynamic modeling of high temperature processes is been developing in the RFNC. Main module functions are work with thermodynamic database, thermodynamic parameters computation of separate reactions and estimating of chemical equilibrium in multicomponent multiphase systems.

Thermodynamic modeling is based on reference data of thermodynamic properties of substances (dependences of Gibbs energy, heat capacity, entropy, enthalpy from temperature). Gibbs energy minimization algorithms are used in program module for chemical equilibrium computation in multicomponent multiphase systems.

Program module is created on base of programming environment Microsoft .NET Framework 4.0 on C# language. Fast stand-alone database management system SQLite and modern system of interactive user interface construction Windows Presentation Foundation (WPF 4.0) are used. Module intended for operation in Windows XP/Vista/7/8 operating system.

Program module enables to estimate initial composition (qualitative and quantitative), optimal temperature process mode and instruments arranging for obtaining of product with specified composition, to define possibility of new perspective technologies application and to evaluate modernization possibility of technologies already in existence.

5-6

О РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБОГАЩЕННОГО УРАНА В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

И. А. Волков, В. А. Симоненко,
А. А. Бочкарева, У. Ф. Шереметьева

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

E-mail: i.a.volkov@vniitf.ru

В России концепция быстрых свинцовых реакторов реализована в проектах реакторных установок

БРЕСТ-ОД-300 и БРЕСТ-1200. Отличительной особенностью этих проектов является принцип «естественной безопасности», который, в соответствии с [1] предъявляет следующие требования к ядерной энергетике будущего:

- исключение тяжелых реакторных аварий и аварий на предприятиях ядерного топливного цикла;
- радиационно-эквивалентное захоронение РАО;
- технологическое усиление режима нераспространения.

Исключение тяжелых аварий достигается, в первую очередь, за счет использования плотного нитридного топлива, которое позволяет создать активную зону с коэффициентом воспроизводства близким к единице и с изменением реактивности $\Delta\rho$ между перегрузками (с учетом непуниевого эффекта), не превышающим эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эфф}}$. Условие $\Delta\rho \leq \beta_{\text{эфф}}$ является важным для реактора, реализующего принцип естественной безопасности, и оно должно выполняться в течение всего срока эксплуатации [1].

Для реакторных установок типа БРЕСТ выделяют два основных этапа их эксплуатации – переходный, при котором изотопный и элементный состав топлива может существенно изменяться, и равновесный. В зависимости от стартовой загрузки, выбег реактивности за микрокампанию $\Delta\rho$ на переходном этапе работы может изменяться в широком диапазоне. Наибольший интерес представляет стартовая загрузка с обогащенным ураном, которую рассматривают в рамках развития крупномасштабной ядерной энергетики [2]. При старте с обогащенного урана и постоянстве геометрии активной зоны выбег реактивности за микрокампанию будет превышать $\beta_{\text{эфф}}$ в течение ~38 лет работы реактора [3]. В докладе анализируются возможности уменьшения выбегов реактивности при использовании в стартовой загрузке обогащенного урана. В частности, рассматривается подход, обсуждаемый разработчиками свинцовых реакторов, в соответствии с которым для уменьшения $\Delta\rho$ предлагается увеличить высоту топливного столба в активной зоне и использовать в стартовой загрузке Np и Am в качестве стабилизаторов реактивности на переходном этапе работы. Оценивается эффективность Np и Am как стабилизаторов реактивности и их необходимое количество в расчете на один реактор. Также рассматривается еще один способ уменьшения выбегов реактивности – использование стартовой загрузки из смеси обогащенного урана и плутония из отработавшего топлива реакторов РБМК.

В результате расчетных исследований установлено, что скомпенсировать выбеги реактивности корректировкой стартового состава топлива можно лишь для небольшого числа реакторов типа БРЕСТ-1200. При этом темп ввода новых реакторных установок будет ограничен темпом наработки нептуния и америдия в действующих реакторах, а также количеством плутония, содержащегося в отработавшем топливе реакторов РБМК.

Литература

1. Белая книга ядерной энергетики / Под ред. проф. Е.О. Адамова / М.:Изд. ГУП НИКИЭТ. 2001.
2. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В. и др. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики в России до 2100 г. – Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 6, с.319–331.
3. Волков И.А., Симоненко В.А., Макеева И.Р. и др. Использование обогащенного урана в быстром реакторе со свинцовым теплоносителем. – Атомная энергия, 2016, т. 121, вып. 1, с. 20–24.

ON IMPLEMENTATION OF NATURAL SAFETY PRINCIPLE IN THE USE OF ENRICHED URANIUM IN LEAD COOLED FAST REACTOR

I. A. Volkov, V. A. Simonenko,
A. A. Bochkareva, U. F. Sheremetyeva

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

E-mail: i.a.volkov@vniitf.ru

The concept of lead cooled fast reactors is implemented in the projects of reactor BREST-OD-300 and BREST-1200 in Russia. A distinctive feature of these projects is the principle of «natural safety» which, in accordance with [1], imposes the following requirements on the nuclear energy in future:

- the elimination of severe accidents at reactors and accidents at nuclear fuel cycle enterprises;
- radiation-equivalent disposal of radioactive waste;
- technological reinforcement of the nonproliferation regime.

Exclusion of severe accidents is achieved primarily through the use of dense nitride fuel, which allows to create a core with a breeding ratio close to unity and with change in reactivity between refueling (including decay of ^{239}Np), not exceeding the effective fraction of delayed neutrons. The condition $\Delta\rho \leq \beta_{\text{эфф}}$ is important for reactor which carries out principle of natural safety, and it must be implemented within the reactor operation life [1].

There are two main operation stages for reactor types of BREST. The first stage is transitional in which the isotopic and elemental composition of the fuel can vary significantly, and the second stage is equilibrium. Depending on the initial charge, the rundown reactivity between refueling can vary widely in the transition phase of operation. Of greatest interest is the starting charge of enriched uranium, which is considered in the development of large-scale nuclear power. At the start of enriched uranium and the stability of the geometry of core reactivity rundown between refueling will exceed $\beta_{\text{эфф}}$ for ~38 years of reactor operation. The possibility of reducing reactivity rundown by means of using the starting charge of enriched uranium is analyzed. In particular, the approach which is under discussion by developers of lead cooled fast reactors, in accordance with which to decrease $\Delta\rho$ is proposed to increase the height of the fuel column in the core and used the starting charge of Np and Am as

stabilizers of reactivity in transition work is considered. The efficiency of Np and Am as stabilizers reactivity and their required quantity per single reactor is evaluated. Another way to reduce reactivity rundown by means of using the starting load from a mix of enriched uranium and plutonium from spent fuel of RBMK reactors is discussed.

In the result of computational studies established that to compensate of reactivity drifts by means of adjustment of the starting fuel composition is possible only for a small number of reactors of the BREST-1200. The pace of new reactor unit introduction will be limited by the rate of accumulation of neptunium and americium in operating reactors and also the amount of plutonium contained in spent fuel of RBMK reactors.

References

1. White-book of nuclear energy /Under ed. prof. E.O. Adamov/. M.:Pub. JSC «NIKIET». 2001.
2. Adamov E.O., Dzhalyavan A.V., Lopatkin A.V. et al. Conceptual outline of the strategy for Russian nuclear power development in the period to 2100. – Atomic Energy, 2012, vol. 112, № 6, с. 319–331 [in Russian].
3. Volkov I.A., Simonenko V.A., Makeeva I.R. et al. Utilization of Enriched Uranium in the Lead Cooled Fast Reactor. – Atomic Energy, 2016, vol. 121, № 1, с. 20–24 [in Russian].

5-7

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ

Л. П. Волков

ООО НПП «Альфа-Диагностика», Обнинск, Россия

В начале XXI века продолжают происходить крупные техногенные катастрофы с человеческими жертвами и большим материальным ущербом. Весной 2011 года авария на японской АЭС «Фукусима-1» еще раз обратила внимание мирового сообщества на проблему безопасности и надежности АЭС. Многие масштабные катастрофы, вызванные разрушением технических систем, привели к экологическим проблемам. И это происходит на рубеже XX–XXI веков, когда научно-техническая мысль достигла больших высот своего развития. Вместе с тем риск техногенной катастрофы можно свести к предельно малому значению и даже ее исключить.

Для такой технической системы, как АЭС, имеющей большую массу радиоактивных материалов, нужно, прежде всего, добиваться высокой безопасности. После Чернобыля-86 была проделана и продолжает проводиться огромная работа по повышению безопасности отечественных АЭС по всем физическим направлениям ее функционирования. Но даже сейчас весь мировой опыт не исключает аварийную ситуа-

цию на АЭС. Это целое научно-техническое направление поиска «слабых мест» АЭС с целью снижения риска аварии. Невзирая на то, что существуют жесткие правила для проектирования и эксплуатации АЭС, в мире периодически случаются серьезные аварии с тяжелыми последствиями. Для решения задачи по повышению безопасности АЭС существенное значение играет культура безопасности, умение анализировать и прогнозировать состояние оборудования АЭС.

На АЭС стопроцентная автоматизация с использованием робототехнических средств на современном этапе развития техники весьма и весьма ограничена. Поэтому работает система «человек–техника». И отсюда высокие требования к профессионализму персонала, обслуживающему оборудование АЭС. Особые технологические условия работы атомных электростанций (радиоактивность) требуют, как правило, применения дистанционного способа обслуживания оборудования с помощью манипуляторов и других технических средств. В целом разработка и внедрение отечественных манипуляторов для дистанционных операций позволили повысить достоверность контроля и качество ремонта в условиях работы с радиоактивным оборудованием, оперативно выполнять работу в труднодоступных местах, сократить дозовую нагрузку на персонал и тем самым решать социальную задачу.

Следует еще раз подчеркнуть, что история развития техники показывает, что абсолютно надежную техническую систему трудно создать и это очень дорого. Но с помощью соответствующей организации работы техники можно добиться очень высокой степени ее безопасности и надежности благодаря целенаправленной деятельности человека.

Основной деятельностью коллектива НПП «Альфа-Диагностика» является школа научно-технической физики Министерства Среднего машиностроения советского периода. При создании технических средств для обслуживания оборудования АЭС в основу положены творческие взаимодействия с Главным конструктором оборудования реактора ВВЭР–ОАО ОКБ «Гидропресс» (г. Подольск, Московская обл.).

Дистанционные технические средства широко применяются в работах с радиоактивными материалами и при ликвидации устаревшего оборудования АЭС.

MAINTENANCE OF NPP HARDWARE AS A WAY OF SAFETY AND RELIABILITY ENHANCEMENT

L. P. Volkov

ООО НПП «Альфа-Диагностика», Obninsk, Russia

Large-scale industrial accidents with human losses and significant damage still happen in the wake of XXI century. Accident in Japanese NPP «Fukushima-1» in spring 2011 has again drawn attention of global community to the problem of NPP safety and reliability. Many large-scale accidents resulting from collapse of engineering systems led to environmental problems. This happens in

early XXI century when technology is so advanced. At the same time risk of industrial accident may be reduced to acceptable value or even eliminate it.

We should first of all strive to high safety of such engineering system as NPP having large amount of radioactive materials. Vast efforts have been made and are still made for the sake of domestic NPP safety enhancement in all aspects of its functioning. However the whole global experience does not exclude occurrence of NPP accident. This is an individual research and development approach searching for “weak points” of the NPP aimed at reduction of accident risk. Despite the existent stringent rules of NPP designing and operation severe accidents with heavy consequences still happen globally from time to time. Culture of safety or ability to analyze and to predict the status of NPP hardware is of crucial importance for NPP safety enhancement.

Hundred percent automation applying robotic systems is currently hardly possible at NPP, therefore the “man-hardware” system is in place. Hence the requirements to professional skills of NPP maintenance personnel are high. Special conditions of nuclear power plants operations (radioactivity) as a rule call for remote techniques of maintenance with the help of manipulators and other appliances. In general development and implementation of domestic manipulators for remote operations enhanced reliability of monitoring and quality of repair works when working with radioactive equipment, allowed timely operations in hardly accessible places, reduction of dose rates of personnel that is socially beneficial.

It should be emphasized that the history of engineering systems progress demonstrates that development of absolutely reliable engineering system is hardly possible and extremely expensive. But when the works are properly organized we can get high level of engineering systems safety and reliability due to meaningful human activities.

Activities of NPP “Alfa-Diagnostika” are based on the system of research and engineering approaches developed in the Soviet Ministry of Medium Machine-Building Industry. Development of equipment for NPP maintenance is based on interaction with leading designer of VVER reactors, ОКБ “Gidropress” (Podolsk, Moscow region).

Remotely controlled equipment is widely used for operation with radioactive materials and disposal of obsolete hardware.

Современная ядерная энергетика базируется на существующем парке реакторов на тепловых нейтронах. Суммарная мощность работающих энергоблоков в России составляет 26,6 ГВт [1]. Доля АЭС в общей энерговыработке за 2015 год составила 18,6% [1]. Основу работающих реакторов на тепловых нейтронах составляют реакторы ВВЭР. Они используют топливо из оксида урана с обогащением по U-235 4,5%. Также в структуре атомной энергетики России работает 11 энергоблоков с реакторами на тепловых нейтронах РБМК-1000, использующих в качестве топлива оксид урана с обогащением по изотопу U-235 2,5% [2]. На площадке Белоярской АЭС также работают два РБН БН-600 и БН-800.

При существующей структуре ядерной энергетики происходит накопление ОЯТ РБМК и ВВЭР. По оценкам, выполненным с помощью ПК АТЭК [3], к концу 2016 году будет накоплено 5787 т ОЯТ ВВЭР-1000 и 17800 т ОЯТ РБМК-1000.

Плутоний, нарабатанный в ОЯТ ВВЭР, предполагается в дальнейшем использовать для изготовления МОХ-топлива для стартовых загрузок реакторов на быстрых нейтронах БН-1200 и БР-1200. Это становится возможным, ввиду близости изотопного состава плутония из ОЯТ ВВЭР к равновесному составу плутония БН-1200. Плутоний, нарабатываемый в ОЯТ РБМК, существенно отличается по своему изотопному составу от плутония из ОЯТ ВВЭР. При этом становится целесообразным рассмотреть работу системы, состоящей из тепловых и быстрых реакторов. В зависимости от стартового состава топлива, компоновки активных зон, кампании топлива параметры такой ЯЭ системы будут существенно отличаться. Ключевым параметром, характеризующим эффективность топливоиспользования в системе, является допустимое соотношение работающих тепловых и быстрых реакторов.

Реактор БН-1200, работая в двухкомпонентной системе, выполняет функции наработчика делящихся материалов для дальнейшей подпитки ими тепловых РУ. Кроме этого, быстрый реактор позволяет сжигать в своей активной зоне минорные актиниды из топливного цикла ТР. Также существуют варианты загрузок БР топливом с делящимися материалами, выделенными из ОЯТ ТР. В докладе рассмотрены эти особенности работы реактора БН-1200, являющегося частью двухкомпонентной ядерно-энергетической системы.

Литература

1. http://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/russian_nuclear/
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%92%D0%AD%D0%A0-1000>
3. Комплекс АТЭК для моделирования технологий ядерного энергетического комплекса / И. Р. Макеева, В. А. Симоненко, В. П. Соколов // Радиохимические технологии: тезисы 7-ой Российской конференции по радиохимии «Радиохимия 2012». – М.: 2012. – С. 160.

5-8

РАБОТА РЕАКТОРА БН-1200 В СИСТЕМЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Н. Д. Дырда, У. Ф. Шереметьева, И. Р. Макеева

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

E-mail: n.d.dyrda@vniitf.ru

REACTOR BN-1200 IN A TWO-COMPONENT SYSTEM OF NUCLEAR POWER

N. D. Dyrda, U. F. Sheremetyeva, I. R. Makeyeva

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

E-mail: n.d.dyrda@vniitf.ru

Modern nuclear power is based on the existing thermal reactors fleet. Total power reactors operating in Russia is 26.6 GW [1]. The part of nuclear power in total electricity generation was 18.6% [1] in 2015. VVER reactors are base of operating thermal reactors. It's use fuel of uranium oxide enriched in U-235 4.5%. Also in the structure of Russia's nuclear power industry has 11 units with thermal neutron reactors RBMK-1000, using uranium oxide fuel with initial enriched in the isotope U-235 2.5% [2]. At the site of Beloyarsk NPP two reactors on fast neutrons are also working: BN-600 and BN-800.

With the current structure of nuclear energy is an accumulation of RBMK and VVER. According to calculation made by ATEK software package [3] will be accumulated 5787 tons of VVER-1000 and 17800 tons of RBMK-1000 wastes by the end of 2016.

Plutonium accumulated in SNF from VVER, is expected in the future be used for the manufacture of MOX fuel for starting downloads fast reactors BN-1200 and BR-1200. This is possible because of the proximity of the isotopic composition of plutonium from spent fuel VVER to the equilibrium composition of the plutonium reactor BN and BR. Plutonium produced in the RBMK significantly different in the isotopic composition of plutonium from spent fuel VVER. Depending on the initial composition of the fuel cores arrangement, fuel campaign parameters in such nuclear energy system will vary significantly. The key parameter that characterizes the efficiency of fuel usage in the system is a valid value for thermal and fast reactors.

BN-1200, working in a two-component system that performs the functions of breeding of fissile materials for further usage in thermal reactors cores. In addition, the fast reactor can burn in their core minor actinides from thermal reactors fuel cycle. There are also options for FR downloads fuel with fissile material isolated from the spent fuel of thermal reactors. The report explain the features of the BN-1200, which is part of a two component nuclear power system.

References

4. http://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/russian_nuclear/
5. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%92%D0%AD%D0%A0-1000>
6. Complex ATEK for modeling of nuclear energy technologies. / I. R. Makeyeva, V.A. Simonenko, V.P. Sokolov // Radiochemical technologies: abstracts of 7-th Russian radiochemical conference «Radiochemistry 2012». – M.: 2012. – P. 160 [in Russian].

5-9

РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГОРЕНИЯ В ОБЕДНЕННЫХ СОСТАВАХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, И. С. Яковенко

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: ivanov_mf@mail.ru

Актуальность задач водородной взрывобезопасности определяется высокой вероятностью сценариев развития тяжелой аварии, сопровождаемых накоплением водорода в помещении реакторного зала АЭС и последующего его взрыва. Настоящая работа посвящена изучению особенностей развития взрыва водородно-воздушных смесей обедненного состава и, в частности, режимам распространения волн горения в закрытых объемах, заполненных предварительно перемешанной смесью обедненного состава. Исследование проведено методами численного моделирования в рамках полной системы уравнений динамики сжимаемой многокомпонентной реагирующей среды. Численно воспроизведены два режима развития горения от локализованного источника энергии: режим дефлаграционного горения, присущий смесям околостехиометрического состава и бедным смесям с содержанием водорода более 9–10%, и режим шарового пламени, поддерживаемого преимущественной диффузией водорода в область горячих продуктов горения в условиях избытка воздуха. В первом случае классического дефлаграционного режима важную роль в развитии горения играют волны сжатия, излучаемые с поверхности расширяющегося очага горения, взаимодействующие со стенками закрытого объема и после отражения от стенок с фронтом пламени. В условиях достаточно крупных пространственных масштабов канал обратного воздействия на фронт горения со стороны отраженных волн сжатия ведет к усилению развивающейся на фронте гидродинамической неустойчивости. Развитие многомерной структуры поверхности фронта обеспечивает дополнительное ускорение распространения пламени в объеме. В случае так называемых ультра-бедных составов формирующееся шаровое пламя в отсутствие внешних силовых полей является устойчивым образованием и может существовать до тех пор, пока не будет израсходована весь накопленный в объеме водород. В реальных условиях такое шаровое пламя подвержено всплытию в поле гравитации. Формирующиеся при этом конвективные течения способствуют усилению собственных пульсаций всплывающего шарообразного очага, развитию его поверхности, ее разрушению и переходу к режиму горения в форме развитой многоочаговой структуры. Указанные особенности определяют вероятность реализации сценария, в котором в условиях реальной стратификации водорода по высоте подвод энергии в области обедненной смеси

может передаваться дистанционно смеси с большим содержанием водорода по средству таких очаговых структур. Вследствие этого развитие дефлаграционного горения в более обогащенной водородом области будет являться причиной динамических нагрузок на ограничивающую помещение оболочку.

REGIMES OF FLAME PROPAGATION IN LEAN HYDROGEN-AIR MIXTURES

M. F. Ivanov, A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko

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

E-mail: ivanov_mf@mail.ru

Problems of hydrogen explosion safety are of primary concern as hydrogen gas leakage inside nuclear plant reactor chamber and further ignition of combustible mixture can possibly result in the worst case scenario of the severe accident in nuclear power industry. Present study is aimed to investigate features of lean hydrogen-air mixture explosion dynamics and in particular to study propagation of combustion waves inside enclosed vessels filled with lean premixed hydrogen-air mixture. Research is carried out by means of numerical modeling utilizing complete system of governing equations for multicomponent compressible reactive gaseous mixture. Two main regimes of combustion wave evolution out from localized ignition source are reproduced numerically: deflagration, for mixtures with near stoichiometric composition and for lean mixtures with hydrogen content larger than 9–10%, and flame ball regime, which is driven by hydrogen diffusion into area of hot combustion products under conditions of air excess. In the first case of classic deflagration important role in combustion dynamics belongs to compression waves generated by the unsteady expanding flame. Compression waves reflect from the combustion vessel walls and come back to the flame front. In case of large combustion vessels interactions between flame and compression waves enhance hydrodynamic instability developing on the flame front. In turn, multidimensional structure of the flame front leads to additional flame acceleration. In absence of the external forces flame ball forming in case of so called ultra-lean mixtures is stable and can exist until the diffusion is able to feed the reaction zone with hydrogen. In real scenario flame ball is objected to the buoyancy force in gravity field. Convective flows promote inherent pulsations of floating spherical combustion kernel and determine its surface evolution and following destruction into multiple spatially splitted combustion zones. In case of stratification of the combustible mixture specified features define the probability of the scenario in which energy release in the area with lean compound can cause ignition in the area occupied with more chemically active mixture by means of combustion kernel buoyancy. Further combustion of hydrogen enriched mixture could be the cause of destructive dynamic loads on the vessel shell.

5-10

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ С АНАЛИЗОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ К ПЕРСПЕКТИВНЫМ СИЛОВЫМ УСТАНОВКАМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

М. Я. Иванов, Ю. И. Малахов, В. К. Мамаев

Центральный Институт Авиационного Моторостроения

E-mail: ivanov@ciam.ru, mamaev@ciam.ru

В первой части доклада изложены элементы теории низкоэнергетических ядерных реакций (НЭЯР), в англоязычной литературе Low Energy Nuclear Reactions – LENR. Предложена интегральная полуэмпирическая и дифференциальная модели НЭЯР, основанные на анализе дефекта массы исходных и конечных продуктов сгорания и на законах сохранения. Наша модель всецело опирается на основы классической ядерной физики. Она позволяет рекомендовать новые составы топлив для аналогичных процессов тепло генерации со сравнительными оценками их термической эффективности. Система НЭЯР представляет собой разновидность ядерной энергии, выделяемой при изменении изотопного состава топлив, и потенциально в 4000 раз превосходит энергетическую плотность химических источников энергии. При этом отсутствуют эмиссия вредных веществ и радиоактивное излучение, что делает применение НЭЯР исключительно многообещающим.

Во второй части доклада проанализирована возможность применения НЭЯР в аэрокосмических силовых установках. Глобальная зависимость энергии от сырой нефти создает возможность революционных изменений с внедрением НЭЯР технологий для перспективных силовых установок. Использование НЭЯР технологий обещает кардинальное улучшение характеристик летательных аппаратов, окажет существенное влияние на военные возможности, экологию, экономику и, в целом, на темпы развития нашего общества. В то же время обычно эксперты не исследуют вопроса научно-технической осуществимости НЭЯР и предполагают, что система реально доступна. В отличие от сказанного, в нашей работе дано возможное обоснование НЭЯР.

SCIENTIFIC BACKGROUND OF LOW ENERGY NUCLEAR REACTIONS WITH ITS CAPABILITIES FOR PERSPECTIVE AEROSPACE PROPULSION SYSTEMS

M. Ja. Ivanov, Yu. I. Malakhov, V. K. Mamaev

Central Institute of Aviation Motors

E-mail: ivanov@ciam.ru, mamaev@ciam.ru

In the first part of report we consider the scientific background of Low Energy Nuclear Reactions – LENR. We propose integral semi-empirical and differential

LENR simulations. Our semi empirical consideration bases on physics change of the isotopic composition for fuel in accordance with typical canons of classical nuclear physics. Detail differential LENR simulation is supported of Avogadro's law and analysis for the internal structures of electron, proton, and neutron and nuclei with their particle thermodynamics. The developed model allows recommending other combinations of substances (fuels) for similar heat generators with the comparative assessments of their thermal efficiency.

In the second part of report we present an overview of several missions that exploit the capabilities of LENR aircraft propulsion system. LENR is a form of nuclear energy and potentially has over 4,000 times the energy density of chemical energy sources. It does not have any harmful emissions or radiation which makes it extremely appealing. The global reliance on crude oil for aircraft energy creates the opportunity for a revolutionary change with LENR. LENR will impact aircraft performance capabilities, military capabilities, the environment, the economy, and society. Although there is a lot of interest in LENR, there is no proven theory that explains it. Some of the technical challenges are thermal run away and start-up time.

5-11

УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРОВ И ВЕСА КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕВОЗКИ ОЯТ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ОБЕДНЕННОГО УРАНА

Т. В. Казаковская, В. И. Шаповалов,
С. Г. Ермичев, В. З. Матвеев

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

Введение

Получение обогащенного урана для ядерной энергетики привело к накоплению в мире огромного количества обедненного урана (0,25–0,35% масс. ^{235}U). В мире в настоящее время накоплено около $1,2 \cdot 10^6$ т оксидов обедненного урана (ОУ), основные запасы которого находятся в США и России.

Одним из многообещающих путей утилизации оксидов ОУ является использование новых материалов на основе диоксида ОУ (металлокерамических и цементирующих материалов) для изготовления контейнеров для хранения и перевозки ОЯТ.

В работе обсуждаются возможность уменьшения размеров и веса контейнеров для ОЯТ, изготовленных из кермета DUO_2 -сталь, а также из специального бетона DUCRETE.

Материалы на основе обедненного урана

Кермет представляет собой компаунд, полученный путем внедрения керамических частиц ОУ в стальную

матрицу. Керамика в металлической матрице обладает преимуществами обоих материалов: защита от гамма-радиации, замедление абсорбции нейтронов, удаление тепла от радиоактивного распада.

Специальный бетон (DUCRETE) может использоваться как конструкционный и защитный материал в металлобетонных контейнерах для транспортирования и хранения ОЯТ и высокоактивных отходов. Новый вид бетона состоит из керамики на основе диоксида ОУ (DUAGG), которая заменяет традиционный наполнитель, применяемый в стандартном бетоне. Данная матрица, называемая содержит как вещества, состоящие из тяжелых элементов (для ослабления γ -излучения), так и вещества с малым атомным номером, для ослабления нейтронов. DUAGG имеет очень высокую плотность ($\rho \sim 10 \text{ г/см}^3$). Это на ~70% больше реально достигнутой плотности специальных бетонов, применяемых в металлобетонных контейнерах.

Сравнение обычных контейнеров и контейнеров из материалов на основе ОУ

Было проведено «сравнительное» исследование размеров и веса контейнеров.

В качестве эталона использовалась система стальных контейнеров для хранения и перевозки HI-STAR 100. Сравнивались радиус и масса, при этом поверхностная доза радиации была одинаковой для контейнеров из кермета и традиционных контейнеров. Получено, что при 70% содержании DUO_2 в кермете внешний радиус в контейнере снижается на 5,8%, а масса уменьшается на 16,5%.

Контейнеры из материала DUCRETE на 35 т легче и на 100 см меньше в диаметре, чем контейнеры из обычного бетона. Более эффективные защитные характеристики нового материала дают возможность использовать меньшую толщину защиты в контейнерах для ОЯТ, что приведет к уменьшению габаритов (в ~1,5 раза) и массы (на ~35 т). Уменьшение размеров и снижение массы позволит перевозить контейнеры нового поколения железнодорожным транспортом. Контейнеры на основе DUCRETE имеют более высокую теплоемкость нагрузки из-за уменьшенной толщины стенки.

Заключение

По сравнению с обычным стальным контейнером на 24 сборки ОЯТ контейнер из кермета будет на 16 т легче, и иметь меньший диаметр (2,26 м вместо 2,42 м).

Диаметр контейнера из DUCRETE (по сравнению с обычным бетонным контейнером на 32 сборки) уменьшится с 3,38 м до 2,38 м, при этом контейнер будет легче на 35 т.

России требуется 220 контейнеров для перевозки и 2500 контейнеров для хранения. Использование диоксида ОУ в качестве материала для контейнеров позволит практически полностью потребить все запасы избыточного обедненного урана, т. е. выгодно их утилизировать и существенно повысить безопасность хранения ядерных отходов.

Литература

1. Scientific and Technical Priorities at Yucca Mountain, EPRI Report No. 1003335, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, December 2003.
2. T. V. Kazakovskaya et al., «Sorption of Long-Lived Radioisotopes in Geological Repository Underground Waters by Depleted Uranium Oxides», 10th International Conference on Environmental Remediation и Radioactive Waste Management, Glasgow, Scotland, September 4–8, 2005.
3. Background, Status, and Issues Related to the Regulation O SNF Facilities. ACNW&M White Paper. Advisory Committee on Nuclear Waste and Materials. June 2008.

REDUCTION OF CASK'S SIZE AND WEIGHT THROUGH THE USE OF MATERIALS BASED ON DEPLETED URANIUM OXIDES

T. V. Kazakovskaya, S. G. Ermichev,
V. Z. Matveev, V. I. Shapovalov

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

Introduction

Depleted uranium (DU) is a residual product of the enrichment process of natural uranium to obtain ^{235}U -enriched product used as nuclear fuel. Fabrication of 1 ton of low-enriched nuclear fuel provides 5–7 tons of depleted uranium.

As a rule, depleted uranium is accumulated in the form of high-toxic uranium hexafluoride (UF₆), which is stored in steel cylinders near power stations. It is expedient to convert the UF₆ to stable compounds, such as uranium oxides. Currently more than $1.2 \cdot 10^6$ tons of DU oxides are accumulated in the world, the main DU stocks are situated in the USA and Russia. One of the promising ways of beneficial DU use is the producing of waste casks for spent nuclear fuel (SNF) using material based on depleted uranium.

In this work some issues on reduction of size and weight of SNF casks made of materials based on DU oxides are discussed.

Materials based on depleted uranium oxides

Cermet is a compound composed of ceramic particles embedded in metal matrix. This material has the advantages of both materials: gamma radiation protection, moderation of neutron absorption, cooling of SNF during radioactive decay.

Special concrete (DUCRETE) may serve as construction and shielding material in casks for transportation and storage of SNF and high level wastes (HLW).

The new kind of concrete consists from ceramics based on DU dioxide (DUAGG), which replaces traditional aggregate of standard concrete. Then DUAGG is mixed with Portland cement, sand and water as during fabrication of ordinary concrete. Such matrix named DUCRETE includes compositions both with heavy elements (to attenuate gamma-radiation), and with light elements to decrease neutron radiation.

DUAGG density is considerably high (approximately 10 g/sm³). That is why the theoretical density of DUCRETE could exceed 7 g/sm³. It is 1.7 higher than density of special concretes used at present for cask production.

Comparison of ordinary casks and casks made of materials based OB DU

The calculations were done for conventional multipurpose cask with 24 PWR SNF assemblies in comparison with the cermet cask. The system of steel casks HI-STAR 100 for storage and transportation was used as a standard. We compare cask radius and weight because surface radiation dose was the same. DUO₂ content in cermet was equal to 70 vol.%. The calculations demonstrated that the outer cask radius reduction was 5.8% and cask weight reduces up to 16.5%.

The similar calculations were done for conventional concrete SNF cask with 32 PWR SNF assemblies in comparison with the DUCRETE cask. We compare cask radius and weight because surface radiation dose was the same.

The DUCRETE cask is 35 tons lighter and 100 cm smaller in diameter than casks made from ordinary concrete. The use of DUCRETE reduces size and weight, allows higher thermal loads, meets technical and economic performance criteria.

Conclusion

The cermet cask will be smaller than a conventional 24 SNF-assembly cask (the outside diameter will decrease from 2.42 m to 2.26 m) and 16-ton lighter than a conventional 24 SNF-assembly cask.

The DUCRETE cask will be smaller than a conventional 32 SNF-assembly concrete cask (the outside diameter will decrease from 3.38 m to 2.38 m) and 35-ton lighter than a conventional 32 SNF-assembly concrete cask.

Both materials based on depleted uranium (cermet and DUCRETE) are very promising for SNF cask fabrication.

References

1. Scientific and Technical Priorities at Yucca Mountain, EPRI Report No. 1003335, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, December 2003.
2. T. V. Kazakovskaya et al., «Sorption of Long-Lived Radioisotopes in Geological Repository Underground Waters by Depleted Uranium Oxides», 10th International Conference on Environmental Remediation и Radioactive Waste Management, Glasgow, Scotland, September 4–8, 2005.
3. Background, Status, and Issues Related to the Regulation O SNF Facilities. ACNW&M White Paper. Advisory Committee on Nuclear Waste and Materials. June 2008.

5-12

РЕЖИМЫ СВЕРХЗВУКОВОГО И ДЕТОНАЦИОННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В КАНАЛАХ

А. Д. Киверин, И. С. Яковенко, М. Ф. Иванов

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: alexeykiverin@gmail.com

Наиболее важными с точки зрения задач взрыво-безопасности являются сценарии развития ускоряющихся и быстрых волн горения, сопровождающихся формированием ударных и/или детонационных волн. В рамках настоящего исследования на основе анализа известных экспериментальных данных и результатов численного моделирования проведена классификация режимов распространения сверхзвуковых волн горения в закрытых объемах (каналах и трубах), заполненных предварительно перемешанными газобразными горючими смесями. Показано, что основой развития быстрых волн горения и соответствующих им динамических процессов является два механизма формирования волн сжатия в потоке: за счет расширения горячих продуктов горения в закрытом объеме и за счет локализации энерговыделения в узкой зоне фронта пламени, изменяющего свое положение в пространстве в процессе распространения по горючей смеси. При этом первый фактор содействует ускорению пламени только на ранних стадиях. Далее по мере ускорения пламени роль расширения продуктов снижается и сводится лишь к поддержанию некой характерной скорости распространения волны горения. В виду того, что сжатие горючей смеси происходит по средству последовательности волн сжатия, то состояние смеси в ходе ускорения пламени изменяется вдоль ударной адиабаты. Отслеживая эволюцию потока от начального состояния вдоль ударной адиабаты можно выделить три базовых критерия, определяющих развитие быстрой волны горения. Во-первых, существует естественный предел газодинамического ускорения пламени – скорость звука в продуктах горения. При достижении пламенем скорости звука волны сжатия, излучаемые из зоны энерговыделения, отстают от фронта пламени и оказывают влияние на горение только на масштабах самого фронта. В условиях такого дополнительного сжатия на масштабах зоны реакции становится возможным дополнительное ускорение пламени до сверхзвуковой скорости. Эта возможность обеспечивается особенностями кинетики горения исследуемой смеси и реализуется только при достижении определенного состояния среды, что определяет второй критерий. По достижении второго критерия становится возможным переход горения в детонацию. Третьим критерием является достижение состояния среды, при котором становится возможным независимое воспламенение смеси перед фронтом пламени. Согласно построен-

ной теории становится возможной оценка вероятности реализации различных режимов быстрого горения на основании информации о составе смеси и ее начальном состоянии.

REGIMES OF SUPERSONIC AND DETONATIVE PROPAGATION OF COMBUSTION WAVES IN CHANNELS

A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko, M. F. Ivanov

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

E-mail: alexeykiverin@gmail.com

Regimes of accelerating and fast combustion waves are of great importance for problems of explosive safety as such regimes are usually accompanied with formation of shock waves and/or detonation waves. This study provides a classification of supersonic combustion regimes in closed vessels (channels and tubes) filled with premixed gaseous combustibles. The classification is based on the analysis of available experimental data and results of numerical simulations. It is shown that evolution of fast flames and corresponding dynamic processes is provided via two basic mechanisms of compression waves formation: due to expansion of hot combustion products in the confined space and due to localized energy release inside narrow zone of the flame front propagating through the combustible mixture. Herewith the first factor promotes flame acceleration only on the early stages. As flame accelerates the role of products expansion is reduced to maintenance of certain characteristic speed of flame propagation. Since the compression of combustible mixture is provided by sequence of compression waves the mixture state is changing along Hugoniot curve while the flame accelerates. Tracking the reactive flow evolution along the Hugoniot curve from the initial state one can distinguish three basic criteria determining the evolution of fast flame. First of all a natural limit of flame acceleration exists determined by the sonic speed in the combustion products. As the flame accelerates up to sonic speed the compression waves irradiated from the energy release zone lag behind the flame front and influence the combustion only on the scales of the front. At such additional compression on the scales of reaction zone the additional flame acceleration up to supersonic speed becomes possible. This opportunity is defined by the peculiarities of combustion kinetics of studied mixture and can be realized only when achieving a certain state which determines the second criterion. As this second criterion is achieved the transition to detonation becomes possible. Third criterion is the mixture state at which an independent self-ignition of a mixture ahead of the flame front can occur. According to elaborated theory an estimation of probability of different fast combustion regimes can be obtained on the basis of initial conditions (mixture compound, temperature, pressure etc.).

5-13

ПРОТОННАЯ ЛУЧЕВАЯ ТЕРАПИЯ В РОССИИ И В МИРЕ (ОБЗОР)

В. О. Карпунин¹, В. И. Костюченко¹,
С. И. Самарин², А. С. Углов²

¹НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ ГНЦ РФ –
Институт экспериментальной и теоретической физики,
Москва, Россия

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

E-mail: kostjuch@itep.ru

В 2017 году исполняется ровно 50 лет со дня основания Службы медицинского протонного пучка при синхротроне Института Теоретической и Экспериментальной Физики (ИТЭФ), которая к настоящему времени выросла в Отдел Медицинской физики.

В докладе будет прослежена история протонной лучевой терапии в ИТЭФ и в России, показаны достижения отечественной медицины и медицинской физики в этой области, а также состояние дел к настоящему моменту. Будет представлена динамика развития протонной терапии в России и в мире, основные пути развития, технические и медико-технические проблемы этого развития.

Будет доложено о сотрудничестве ИТЭФ и ВНИИТФ в этой области и о перспективах этого сотрудничества в будущем.

OVERVIEW OF PROTON THERAPY IN RUSSIA AND IN THE WORLD

V. O. Karpunin¹, V. I. Kostjuchenko¹,
S. I. Samarin², A. S. Uglov²

¹NRC «Kurchatov Institute» FSBI SSC RF – Institute for
Theoretical and Experimental Physics (ITEP),
Proton Therapy, Moscow, Russia

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

In 2017 we will hold the fiftieth anniversary of the Therapeutic Proton Beam Office which exploits the synchrotron of the Institute for Theoretical and Experimental Physics (ITEP) and has grown into Medical Physics Department.

The paper follows the history of proton therapy at ITEP and in Russia, demonstrating achievements in Russian medicine and medical physics, as well as the state of the art. It discusses the dynamics of proton therapy development in Russia and throughout the world, main thrust areas and associated technological and medical problems.

We tell about cooperation between ITEP and RFNC–VNIITF in the area and discuss its prospects for the future.

5-14

50 ЛЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ТЕХНОЛОГИЯХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д. Кузмински¹, Р. Рейновски¹, М. Суинхоу¹, П. Сингх²

¹Лос-Аламосская национальная лаборатория, Лос Аламос,
штат Нью-Мексико, США

²Окриджская национальная лаборатория, Окридж,
штат Теннесси, США

Способность подтверждать присутствие или отсутствие специального ядерного материала внутри закрытого контейнера и верифицировать его массу является одной из наиболее важных и сложных задач в рамках международного режима обеспечения гарантий. Неразрушающий анализ (НРА) представляет собой одну из фундаментальных экспериментальных методологий, которая использует нейтроны, гамма-кванты или тепло, излучаемые или выделяемые учетной единицей, для определения ее массы и изотопного состава. Основанная на главных элементах прикладной ядерной физики, методология НРА достигла замечательных успехов за последние 50 лет в качестве рабочего инструмента для обеспечения международных гарантий, верификации ядерных материалов и учета материалов.

1-го декабря 1966 года в Лос-Аламосской национальной лаборатории (ЛАНЛ) была учреждена программа в поддержку выполнения ядерных гарантий. В течение последующих лет эта программа обеспечила беспрецедентный рост научных исследований и разработок (НИОКР), приведший к созданию детектирующей аппаратуры, методики измерений и технологии быстрой оценки специальных ядерных материалов. Эти и другие подобные разработки, осуществленные всемирным ядерно-физическим сообществом, привели к появлению новой области прикладной физики и технологии: неразрушающему анализу (НРА) специальных ядерных материалов. В течение 2016–2017 годов ЛАНЛ отмечает 50-ю годовщину своего участия в деятельности по обеспечению ядерных гарантий.

В настоящем докладе представлены примеры нескольких приборов НРА и методов измерений, которые были разработаны в ЛАНЛ и успешно внедрены на ядерных установках внутри страны и зарубежом, и используются многими организациями, включая Международное Агентство по атомной энергии (МАГАТЭ).

**50 YEARS APPLICATION
OF NON-DESTRUCTIVE ASSAY
IN SCIENCE AND TECHNOLOGY
OF NUCLEAR MATERIAL SECURITY**

J. Kuzminski¹, R. Reinovsky¹, M. Swinhoe¹, P. Singh²

¹Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA

²Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA

The capability of confirming the presence or absence of a special nuclear material inside a closed container and verifying its mass is one of the most important and challenging tasks under the international safeguard regime. Nondestructive assay (NDA) is one of the fundamental experimental methodologies that uses neutron, gamma or heat emissions from an item to determine its mass and isotopic composition. Based on the principal elements of applied nuclear physics, NDA methodology has achieved remarkable success in the past 50 years as a tool in international safeguards, nuclear material verifications and material accountancy.

On 1st December, 1966 a program to promote nuclear safeguards was established at Los Alamos National Laboratory (LANL). Over the years that program generated unprecedented R&D effort resulting in the development of detection instruments, measurement methodology and technology for rapid assessment of special nuclear materials. This and similar development by the world-wide nuclear physics community led to the new field of applied physics and technology: nondestructive assays (NDA) of special nuclear material. During 2016–2017, LANL is celebrating its 50th anniversary of nuclear safeguards at LANL.

In this paper we present examples of a few NDA instruments and measurement methods that were developed at LANL and successfully implemented at domestic and foreign nuclear facilities and used by many organizations including the International Atomic Energy Agency (IAEA).

ление до 0,5 МПа, температура до 200°C) проведены 16 экспериментов. Экспериментальная установка представляет собой две цилиндрические камеры высотой 5 м и диаметром 2 м, соединенные каналом, высота расположения которого может меняться. Стенки камеры теплоизолированы и снабжены системой нагрева и термостабилизации. В экспериментах измеряются следующие параметры: статическое и динамическое давление, температура газов и внутренних стенок камеры, относительная влажность. В ходе эксперимента осуществляется отбор газовых проб с последующим их анализом на хроматографе. Установка снабжена окнами для методик визуализации пламени и скоростной видеосъемки процессов конденсации и распространения пламени. Для определения скорости фронта пламени в недоступных для оптических методик областях используются датчики-отметчики.

В зависимости от начальной температуры внутри камеры можно получить различные режимы заполнения. В экспериментах с предварительно нагретой камерой распределение водяного пара по высоте камеры обусловлено влиянием силы тяжести и диссипативных процессов. Снижение начальной температуры внутри камеры приводит к конденсации водяного пара и дополнительному перемешиванию с воздухом. Микрокапли, образуемые в процессе конденсации, осаждаются в нижнюю часть камеры, где доля водяного пара меньше равновесной. Там происходит процесс испарения и увеличения доли водяного пара.

В экспериментах с иницированием горения получены данные о скорости распространения пламени в ингибированных водяным паром составах при различных начальных давлениях. Получены данные о распространении пламени вверх и вниз, о замедлении и остановке пламени под действием силы тяжести, о неинтенсивном горении в виде всплывающего термика. Степень выгорания контролируется с помощью измерения давления и отбора газовых проб в процессе остывания камеры.

**HYDROGEN-AIR-STEAM MIXTURES
STRATIFICATION AND DEFLAGRATION
EXPERIMENTAL RESEARCH**

I. V. Lavrenyuk, E. V. Bezgodov, V. A. Simonenko,
S. D. Pasyukov, M. V. Nikiforov, V. P. Bakaev,
V. N. Fedyushkin, I. A. Popov

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

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

There were 16 experiments for stratification and flame propagation processes in hydrogen-air-steam mixtures in conditions closed to severe accidents on NPP with PWR (static pressure up to 0,5 MPa, temperature up to 200°C). Facility corresponds two cylindrical vessels with height 5 m and diameter 2 m, connected by channel, which location height can be varied. Vessels walls are thermoinsulated and are equipped by heating and thermo-

5-15

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СТРАТИФИКАЦИИ И ГОРЕНИЯ ВПГС**

И. В. Лавренюк, Е. В. Безгодов, В. А. Симоненко,
С. Д. Пасюков, М. В. Никифоров, В. П. Бакаев,
В. Н. Федюшкин, И. А. Попов

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

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

В рамках исследования процессов стратификации водородосодержащих парогазовых смесей и распространения пламени в условиях, характерных для тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР (стационарное дав-

stabilization systems. Static and dynamic pressure, gases and walls inner surface temperature, relative humidity are measured in experiments. Gas probes sampling and subsequent chromatographic analysis are implemented in experiments. Facility is equipped by windows for flame propagation and condensation processes visualization and high-speed registration techniques. Special sensors are used for detecting flame propagation velocity in inaccessible for optical methods regions.

Variation of initial temperature inside vessel leads to various filling regimes. Steam molar fraction height allocation in heated vessel is caused by gravity and dissipative processes. Initial temperature decrease leads to steam condensation and additional mixing with air. Droplets of condensed water are descended to lower part of vessel in which steam molar fraction lower than saturated one. It leads to water evaporation and steam molar fraction increasing.

Flame propagation velocities in steam inhibited mixtures at various initial pressures are received. Upward and downward flame propagation with deceleration and stopping caused by gravity are registered. Burnout rate is controlled by pressure measuring and gas probes sampling during facility cooling down process.

5-16

ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ПЛАТФОРМА АТЭК

И. Р. Макеева, В. А. Симоненко, Н. Д. Дырда,
А. А. Рыкунова, С. В. Пчелинцева

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

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

Ядерный энергетический комплекс является сложной многоуровневой подсистемой экономики Российской Федерации. В настоящее время можно выделить две группы задач, стоящих перед ядерно-энергетической отраслью (ЯЭ) – переход на новую технологическую платформу, связанную с включением в систему ЯЭ реакторов на быстрых нейтронах, и решение отложенных проблем предыдущего этапа развития ЯЭ, в первую очередь, вопроса накопленного облученного ядерного топлива (ОЯТ) тепловых реакторов.

Выбор и реализация конкретного сценария развития ядерно-энергетической отрасли требует принятия большого количества стратегических, организационных, управленческих, технических и технологических решений с использованием многоплановых и часто противоречивых критериев. При этом необходимо ответить на целый ряд вопросов: потребность и возможность наращивания энерго мощностей, доступные ресурсы ядерных материалов, стоимость производимой на АЭС электроэнергетики с учетом всех тех-

нологических этапов обращения как со свежим, так и с отработавшим ядерным топливом. При этом принимаемые решения должны быть согласованы на всех этапах и уровнях ядерного топливного цикла (ЯТЦ): на стратегическом, системном и технологическом.

В РФЯЦ – ВНИИТФ с 2008 г. развивается математическая модель и программные комплексы [1], которые на единых принципах позволяют описывать объекты ядерного топливного цикла с различной степенью детализации.

В докладе рассматривается взаимосвязь между моделями развития ядерной энергетики в целом, вытекающими из стратегии потребностями в развитии инфраструктуры и производств ядерного энергетического комплекса, особенностями реализации существующих и перспективных технологий как реакторного блока, так и внешней части топливного цикла. Для моделирования используются программные комплексы АТЭК-ЯТЦ и ВИЗАРТ [2], реализованные на платформе АТЭК.

Литература

1. И.Р. Макеева, Вербицкая О.В., Дубосарский В.Г., Пугачев В.Ю., Пчелинцева С.В., Соколов В.П. Моделирование технологических процессов переработки ОЯТ и фабрикация топлива на платформе АТЭК. Тезисы доклада на VIII Российской конференции по радиохимии «Радиохимия-2015», г. Железногорск, 2015
2. Шмидт О.В., Макеева И.Р., Ливенцов С.Н. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств. // Радиохимия, 2016, т. 58, N 4, с. 316–323.

THE PROBLEMS OF MODELING THE TECHNOLOGIES OF NUCLEAR FUEL CYCLE PLATFORM ATEK

I. R. Makeyeva, V. A. Simonenko, N. D. Dyrda,
A. A. Rykunova, S. V. Pchelintseva

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

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

Nuclear energy complex is a compound multilevel subsystem of economy of Russian Federation. At present, Nuclear Power Engineering is facing two groups of tasks – switching to the new technological platform concerned with the inclusion into NPE structure of fast reactors and solving delayed problems of previous stage of NPE development, first of all the problem of cumulative spent fuel of thermal reactors.

The choice and realization of specific scenario of NPE development require the great amount of strategic, organizational, management, technical and technological decisions with the use of multipronged and often discrepant criteria. At the same time it is necessary to access the following parameters: the necessity and the possibility of increasing the energy capacity, available resources of fissile materials, the cost of electric power produced at

nuclear power stations with consideration of all technological stages of handling both fresh and spent fuel. Also, these decisions must be coordinated at every stage and level of nuclear fuel cycle (NFC): strategic, system and technological.

At RFNC-VNIITF the mathematical model and codes [1] have been developed since 2008, which describe the objects of NFC with different level of detailing on the basis of unified principles.

The paper regards the interaction between the models of NPE as a whole, the resulting from the strategy requirements in development of infrastructure and productions of nuclear energy complex, the peculiarities of realization of existing and advanced technologies for both reactor and exterior part of fuel cycle. The codes АТЕК-NFC and VIZART[2] implemented on the platform АТЕК are used for modeling.

References

1. I. R. Makeyeva, O. V. Verbitskaya, V. G. Dubosarskiy, V.Yu. Pugachev, S.V.Pchelintseva, V.P.Sokolov. Modeling technologies of spent nuclear cycle reprocessing and fuel fabrication on the platform АТЕК.

Abstracts of VIII Russian radiochemical conference «Radiochemistry 2015», Zheleznogorsk, 2015.

2. I. R. Makeyeva, O. V. Shmidt, S. N. Liventsov. Modeling technology stages of CNFC as a tool for creation and optimization of technology production. // Radiochemistry, 2016, v. 58, N 4, p. 316–323 [in Russian].

5-17

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ПО ПРОГРАММЕ ПРИЗМА ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕДИЦИНСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

Е. А. Кашаева¹, Г. Н. Малышкин¹,
С. И. Самарин¹, С. Ю. Таскаев²

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

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: taskaev@inp.nsk.su

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН ведутся работы по созданию медицинской установки для бор-нейтронозахватной терапии на базе компактного ускорителя-тандема. Поток нейтронов генерируется в пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ при облучении литиевого слоя мишени пучком протонов с энергией 2,3 МэВ. Для замедления генерируемых нейтронов до эпитепловых энергий, имеющих наибольший эффект в нейтронозахватной терапии, разработана система формирования пучка, состоящая из замедлителя, отражателя и внешнего слоя

поглотителя. В качестве расчетного инструмента для выбора и обоснования конфигурации системы использовалась программа ПРИЗМА, разработанная в РФЯЦ – ВНИИТФ для решения линейных задач раздельного и совместного переноса нейтронов, фотонов, электронов, позитронов и ионов методом Монте-Карло. Расчетная модель включала описание нейтроногенерирующей мишени и системы формирования пучка медицинской установки, а также фантома головы человека (фантома Снайдера), расположенного вблизи установки. Моделировался перенос протонов в литиевом слое мишени, рождение в нем вторичных нейтронов и гамма-квантов, их распространение в системе формирования пучка и облучение фантома Снайдера выходящим пучком излучения. В расчетах по программе ПРИЗМА получены оценки спектра нейтронов и гамма-квантов на выходе установки и распределение компонент дозы по глубине фантома для различных вариантов конструкции и материалов системы формирования пучка. Результаты расчетов позволили оптимизировать параметры установки для формирования пучка эпитепловых нейтронов, удовлетворяющего требованиям бор-нейтронозахватной терапии.

PRIZMA CALCULATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF A BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY FACILITY

Е. А. Кашаева¹, Г. Н. Малышкин¹,
С. И. Самарин¹, С. Ю. Таскаев²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin Institute
of Applied Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: g.n.malyshkin@vniitf.ru

²Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

E-mail: taskaev@inp.nsk.su

The Budker Institute of Nuclear Physics is developing a boron neutron capture therapy (BNCT) facility based on a compact tandem accelerator. Neutrons are generated in the threshold reaction ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ which occurs when lithium in the target is irradiated by protons of energy 2.3 MeV. For their moderation to epithermal energies which are of highest effect in boron neutron capture therapy, a beam shaping system of a moderator, a reflector, and an outer absorber is developed. Its configuration was chosen and justified through calculations by a code PRIZMA developed at RFNC – VNIITF for solving individual and coupled transport of neutrons, photons, electrons, positrons and ions by the Monte Carlo method. The calculation model included a neutron generating target, a beam shaping system, and a human head phantom (Snider phantom). Modeling included proton transport and production of secondary neutrons and gammas in the target and their propagation in the beam shaping system and Snider phantom. PRIZMA calculations gave estimates for the spectra of produced neutrons and gammas and dose distributions through the phantom depth for different system configu-

rations and materials. They helped optimize parameters of the beam shaping system so as to meet BNCT requirements.

5-18

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ УЧЕТА ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА ВВЭР-1000

Д. Г. Модестов, М. В. Никульшин, И. Ю. Силантьева

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

При расчете кампании ядерного реактора наиболее общим и точным подходом к решению задачи теплогидравлики, результаты которой применяются для учета влияния теплофизических параметров на нейтронно-физические характеристики, является использование CFD-методов. Но расчет активной зоны реактора ВВЭР-1000 затруднен недостаточностью вычислительных ресурсов для размещения конечно-разностной модели. Поэтому вынужденной мерой является представление активной зоны в виде набора независимых ТВС. Учет влияния сборок друг на друга может быть решен согласованием граничных условий. Эти условия можно разделить на два класса. К первому относится задание теплопереноса через боковую границу, а ко второму – условия на входе в активную зону. Соответственно, при построении расчётной схемы возникает ряд приближений. Чтобы оценить влияние этих приближений, было проведено несколько серий методических расчетов.

Первая серия расчетов была сделана для оценки влияния течения до входа в активную зону на характеристики потока внутри последней.

Вторая серия расчетов была направлена на определение влияния на рассеивающие характеристики теплоносителя граничных условий и перетечек от соседних ТВС. Рассматривались комбинации с различной интегральной мощностью соседей и с заполнением направляющих каналов.

Третья серия делалась для сравнения эффективности схем расчета стационарного состояния реактора. Рассматривались способы построения и скорости сходимости схем.

И наконец, в четвертой серии проводились расчеты кампании реактора. Кроме того было рассмотрено решение задачи без изменения теплогидравлических характеристик.

По результатам представленных методических расчетов можно сделать следующие выводы:

Использование перепада давления в качестве граничного условия позволяет пренебрегать течением теплоносителя перед входом в активную зону. Также данный подход позволяет корректно учесть различие

гидродинамических сопротивлений элементов активной зоны.

Учет теплопереноса между ТВС влияет на нейтронные характеристики значительно меньше, чем граничные условия на входе в активную зону. Причем оценить это влияние сверху, можно по сравнению результатов расчетов с различными граничными условиями.

Использование в качестве граничного условия давления теплоносителя не приводит к заметному увеличению трудоемкости расчетов по сравнению с условием равномерного распределения скорости течения.

Проведение расчетов без учета изменения теплогидравлических характеристик может привести к заметным ошибкам в концентрациях значимых ядер.

COMPARISON BETWEEN THERMAL HYDRAULICS TREATMENTS AND THEIR EFFECT ON VVER FUEL CHARACTERISTICS

D. G. Modestov, M. V. Nikulshin, I. Yu. Silantjeva

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

In reactor campaign calculations, the use of CFD methods is the most general and accurate approach to treating thermal hydraulics which give data for the effect of thermophysical parameters on neutronics characteristics. It however remains difficult to do calculations for the VVER-1000 core because of insufficient computer resources for a finite-difference model. That is why we have to represent the core as a set of independent fuel assemblies. Their interaction can be described with appropriate boundary conditions which fall into two classes. The first involves lateral heat-and-mass transfer and the second defines inlet conditions. This leads to approximations and their effect is investigated in several series of methodical calculations.

A first series focuses on the effect of inlet flow on in-core flux characteristics.

A second series investigates the effect of boundary conditions on coolant scattering characteristics and on inflows from neighbor assemblies. Combinations with different neighbor powers and fillings between guide rods were considered.

A third series compares the efficiency of steady-state calculation schemes. The ways of constructing the schemes and their convergence are investigated.

Finally a fourth series is devoted to reactor campaign calculations including calculations with no account for changes in thermal hydraulics characteristics.

Results of the methodical calculations show the following:

The use of pressure gradient as boundary condition allows neglecting the inlet flow of coolant. With this approach it is also possible to correctly account for difference in the hydrodynamic resistance of core elements.

The effect of heat-and-mass transfer between fuel assemblies is much smaller than that of inlet conditions. Its upper bound can be estimated from calculations with different boundary conditions.

When used as boundary condition, the coolant pressure is not as computationally demanding as a uniform flow rate distribution.

Calculations with no account for thermal hydraulics may lead to marked errors in the concentration of important nuclides.

в них изотопа ^{244}Cm с периодом полураспада 18,1 лет. Это обстоятельство позволяет определять содержание изотопов плутония в ОЯТ, которые лежат в главной цепочке превращений ядер ^{238}U в ^{244}Cm в реакторе, что приводит к корреляции между концентрациями указанных изотопов. Целью работы является определение корреляционных зависимостей между содержанием ^{244}Cm и, соответственно интенсивностью нейтронного излучения, и содержанием изотопов $^{238-242}\text{Pu}$, ^{235}U , а также анализ возможности использования этих зависимостей для дистанционного определения раздельного содержания этих изотопов в ОТВС нейтронно-активационным методом.

5-19

ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫМ МЕТОДОМ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Д. Г. Модестов, В. А. Симоненко, Ю. И. Чернухин

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

Определение состава отработанного ядерного топлива (ОЯТ) энергетических реакторов является важной задачей при построении технологических схем его переработки в рамках работ по замыканию топливного цикла. Методика решения этой задачи должна быть пригодна для использования в промышленности, в частности должна позволять проводить оперативный анализ. В этом качестве предлагается применять нейтронно-активационный метод.

Данный метод основан на зависимости интенсивности нейтронного излучения от глубины выгорания топлива. Измерительное устройство представляет собой диагностический контейнер с центральной полостью для размещения тестируемых ОТВС, который позволяет проводить измерения непосредственно в бассейнах выдержки. В боковой стенке этого контейнера, находится кольцевая полость, куда заливается водный раствор сульфата марганца, образующий индикаторный слой с высотой, соответствующей высоте активной зоны. Активация этого слоя происходит в результате реакции радиационного захвата нейтрона ядром ^{55}Mn с образованием радиоактивного изотопа ^{56}Mn , имеющего удобные для регистрации период полураспада 2,58 ч. и энергии фотонов 0,847, 1,811 и 2,11 МэВ. Определение средней активности раствора осуществляется путем забора пробы и последующего ее гамма-спектрометрического анализа в лабораторных, т.е. практически бесфоновых, условиях. Ожидаемая погрешность измерения активности проб при временах облучения 10 мин оценивается величиной 1÷2%.

При глубине выгорания топлива в ОТВС более 20 МВт-сут/кгU и времени их выдержки после извлечения из активной зоны реактора порядка нескольких лет нейтронное излучение ОЯТ определяется, в основном, спонтанным делением нарабатываемого

FEASIBILITY OF SPENT FUEL CHARACTERIZATION WITH NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS

D. G. Modestov, V. A. Simonenko, Yu. I. Chernukhin

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

The determination of spent fuel compositions is important for developing reprocessing technologies to close the fuel cycle. The determination procedure should be such as to allow its industrial use by providing, in particular, means for fast analyses. Neutron activation analysis is proposed as a means.

The method is based on the dependence of neutron intensity on burnup. The measuring unit is a lidded cask with a hollow in the center for spent fuel to be tested. The cask can be used to take measurements right in the cooling pond. In its wall, there is an annular capsule with manganese sulfate solution which forms an indicator layer whose height is equal to that of the core. The layer is activated through neutron capture by ^{55}Mn , producing radioactive ^{56}Mn with suitable for measurement half-life 2.58 h and photon energies 0.847, 1.811 and 2.11 MeV. The average activity of the solution is measured through gamma-spectrometry of its sample in laboratory (i.e., almost background free) conditions. The error of measurement at exposure 10 min is expected to not exceed 1÷2%.

At burnups above 20 MWd/kgU and cooling times about several years, neutron emissions of spent fuel are mainly defined by the spontaneous fission of ^{244}Cm with half-life 18.1y. This can be used to analyze spent fuel for the concentrations of plutonium isotopes from the principal chain of $^{238}\text{U} \rightarrow ^{244}\text{Cm}$ transformations because of correlation between the concentrations. Our goal is to identify correlations between the concentration of ^{244}Cm , and hence the neutron emission rate, and the concentrations of $^{238-242}\text{Pu}$ and ^{235}U , and to decide whether it is possible or not to use them for the remote determination of these concentrations in spent fuel by neutron activation analysis.

5-20

**АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РОССИИ
И В МИРЕ. СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ**

Б. И. Нигматулин

Институт проблем энергетики, Москва, Россия

Доклад состоит из трех разделов.

В первом разделе рассматривается развитие мировой атомной энергетики в период 1954–2015 гг. Анализируется динамика строительства и подключения к сети энергоблоков АЭС. Рассматривается влияние тяжелых аварий на АЭС (Три-Майл-Айленд, Чернобыльская, Фукусима-1) на динамику установленных мощностей энергоблоков АЭС, ежегодно подключаемых к сети в мире и ежегодные темпы производства электроэнергии на них. Показано, что тяжелая авария на АЭС, в первую очередь на Чернобыльской, чрезвычайно негативно повлияла на развитие атомной энергетики в мире, вызвав резкое снижение темпов ввода в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС и соответствующие снижение темпов роста электропроизводства на них.

Анализируются разведанные запасы и объемы добычи природного урана, а также его потребность для АЭС в мире, по годам в период 1949–2015 гг. Показывается, что при нынешнем уровне производства электроэнергии на АЭС, извлекаемых запасов природного урана хватит на 95 лет (при себестоимости добычи менее 130 долл./кг U_3O_8) и 127 лет (при себестоимости добычи менее 260 долл./кг U_3O_8).

Дается сопоставление цен природного урана и газа (по долговременным контрактам и спотовым) по годам в период 1971–2015 гг. и приводится оценка стоимости природного урана в долях от стоимости электроэнергии АЭС. В случае не амортизированных АЭС доля затрат на природный уран в стоимости 1 кВт.ч. составит: 0,03–0,05 при цене \$ 71–104 за 1 кг природного урана и 0,06–0,1 при цене \$ 140–200. Анализируется стоимость обогащения природного урана по изотопу ^{235}U .

Во втором разделе дается анализ ядерных топливных циклов (ЯТЦ) в атомной энергетике: открытый ЯТЦ с легководными реакторами (ЛВР); модифицированный открытый цикл с использованием МОХ-топлива и технологии ЛВР; замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами (ЗЯТЦ с БР); открытый ЯТЦ с высокотемпературными реакторами. Рассматриваются критерии выбора ЯТЦ (ресурсы природного урана, нераспространение, обращение с ОЯТ, экономические критерии). Отмечается, что открытый ЯТЦ с ЛВР является наиболее технологически разработанным и самым экономичным. Обсуждаются причины, по которым ЗЯТЦ с БН не был доведен до широкой коммерческой реализации. Приводятся данные по реакторам на быстрых нейтронах, находящихся в эксплуатации, в стадии проектирования или на стадии решения о проектировании в 2016–2026 гг.

Анализируется ограничение по использованию МОКС-топлива в ЛВР. Обсуждается ЗЯТЦ с реактором на быстрых нейтронах, со свинцовым теплоносителем (Проект Росатома «Прорыв»). Показано, что многие принципиальные вопросы, необходимые для разработки технического проекта энергоблока, еще далеки от решения: физика реактора, топливо, теплогидравлика, стойкость конструкционных материалов, поддержание кислородного режима во всех зонах реактора, фабрикация топлива, пристанционная переработка облученного топлива и многие другие. То есть без достаточных оснований два проекта БРЕСТА на 300 и 1200 МВт(эл) были включены в государственную инновационную программу с очень большими затратами, но без всяких гарантий успеха.

Приводится аналогия проекта «Прорыв» с другим провальным отечественным проектом в отечественной электроэнергетике МГД-генератором. Анализируется перспективы разработок БР с ЗЯТЦ в других странах. Обсуждается ограничения распространения АЭС с БР в мире.

В третьем разделе представлены прогнозы мирового электропроизводства на АЭС, установленной мощности энергоблоков АЭС, объем потребления природного урана на период 2015–2050 гг.

Прогноз мирового электропроизводства на АЭС на долгосрочный период 2015–2050 гг. является составной частью прогноза общего мирового электропроизводства на всех типах энергоустановок. В свою очередь, собственно прогноз общего мирового электропроизводства определяется прогнозами мирового электропотребления и электрическими потерями.

Прогноз мирового электропотребления является производной от прогноза развития мировой экономики, т. е. прогнозов темпов роста мирового ВВП и его структуры. В свою очередь они определяются темпами роста численности населения Земли, ростом его благосостояния, развитием технологий, эффективностью производства и многим другим. Показано, что в период 2015–2050 гг. производство электроэнергии в мире увеличится с 24,5 до 40,7 тыс. ТВт.ч.

Приводятся сопоставления прогнозов мирового электропроизводства на период до 2035–2050 гг. данные настоящей работы и World and China Energy Outlook 2050., CNPC ETRI 2016., а также МАГАТЭ (низкий и высокий сценарий) и Enerdate (низкий и высокий сценарий). Дается прогноз роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире в период 2015–2050 гг., на основании прогнозов роста этой мощности в Китае и в остальном мире, а также количество энергоблоков АЭС выводимых из эксплуатации в этот период.

По базовому прогнозу рост суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире сохраняет примерно тот же темп, который имел место в период 1987–2015 гг., при этом в 2050 г. она будет равняться 456 ГВт и по сравнению с 2015 г. вырастет всего на 16%.

По оптимистическому прогнозу темп роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС

в мире увеличится приблизительно в 3 раза по отношению к базовому и в 2050 г. эта мощность будет равняться 600 ГВт и по сравнению с 2015 г. вырастет на 53%.

Дается сопоставление прогнозов роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире в период 2016–2050 гг., полученных в настоящей работе, с аналогичными прогнозами, Enerdata и OECD NEA & IAEA. В соответствии с прогнозами роста суммарно установленной мощности АЭС в мире, приводятся прогнозы роста мирового электропроизводства на АЭС в период 2015–2050 гг. По базовому прогнозу мировое электропроизводство на АЭС увеличится с 2,63 (2016 г.) до 3,35 трлн. кВт ч. (2050 г.) или на 27%, а по оптимистичному прогнозу с 2,63 (2016 г.) до 4,4 трлн кВт ч. (2050 г.) или на 67%. При этом доля мирового электропроизводства на АЭС от общего объема электропроизводства в мире по базовому прогнозу настоящей работы, падает с 10,5% (2015 г.) до 8,2% (2050 г.), а по оптимистичному – практически остается на постоянном уровне – 10,5–10,8% весь прогнозный период. Прогнозы настоящей работы заметно ниже базового прогноза CNPC ETRI 2016, где доля мирового электропроизводства на АЭС возрастает с 10,5% (2015 г.) до 14,6% (2050 г.).

Анализируются прогнозы роста мирового потребления урана и его разведанных запасов в период 2015–2050 гг. Получено, что при оптимистическом (максимальном) прогнозе роста электропроизводства на АЭС в период 2016–2050 гг. и сохранение достигнутого уровня на последующий период, извлекаемых запасов природного урана (по данным 01.01.2015 г.) хватит минимум на 63 года (при себестоимости добычи менее \$130/кгU) и минимум на 82 года (при себестоимости добычи менее \$ 260/кгU).

NUCLEAR POWER ENGINEERING IN RUSSIA AND AROUND THE WORLD. CURRENT STATUS AND PROSPECTS

Bulat I. Nigmatulin

Presentation includes three sections.

Section one overviews development of nuclear power engineering in a global scale in 1954–2015. Dynamics of construction and grid connection of NPP generating units is analyzed. Influence of NPP heavy accidents (Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima-I) on dynamics of NPP generating units installed power annually connected to the grid in the global scale as well as their annual power production rate. It has been demonstrated that heavy accidents, especially Chernobyl, have rendered extremely negative influence on global nuclear power engineering development, resulting in downswing of the rate of new generating units commissioning and respective power production at these.

Proven resources and production rates of natural uranium are analyzed as well as global demand for uranium by NPP split by years in 1949–2015. It has

been demonstrated that at current rate of NPP electricity production extracted resources of natural uranium will be sufficient for 95 years (at primary extraction cost less than 130 \$/kg for U₃O₈) and for 127 years (at primary extraction cost less than 260 \$/kg for U₃O₈).

Prices of natural uranium and gas (long-term and spot contracts) are compared in terms of years for 1971–2015 and assessment of natural uranium is given as share of NPP electricity cost. If NPP value is not depreciated, the share of natural uranium cost in the cost of 1 kWh is 0.03÷0.05 at natural uranium price \$71÷104 per 1 kg and 0.06÷0.1 at natural uranium price \$140÷200. Costs of natural uranium enrichment in terms of ²³⁵U isotope is analyzed.

The second section deals with analysis of nuclear fuel cycles (NFC) in nuclear power engineering: open NFC with light water reactors (LWR), modified open cycle using MOX-fuel and LWR reactor; closed NFC with fast reactors (CNFC with FR); open NFC with high-temperature reactors. Criteria of NFC choice such as resources of natural uranium, non-proliferation, handling SNF, economical criteria are considered. It is noted that open NFC with LWR is the most technologically well-developed and cost efficient. Reasons why CNFC with FR did not achieve broad commercial implementation are discussed. Data on reactors with fast neutrons in operation, currently designed and in the process of decision-making about designing in 2016–2026 are given.

Limitation of MOX-fuel use in LWR is analyzed. CNFC with fast neutron reactor with lead coolant (Rosatom Project “Proryv”/Breakthrough) is discussed. Presentation demonstrates that many crucial issues necessary for development of generating unit design are far from solution. These include physics of reactor, fuel, heat and fluids transfer, durability of structural materials, maintenance of oxygen regime in all reactor zones, fuel fabrication, power plant in-house reprocessing of irradiated fuel and many other. This means that two projects of fast neutron reactors with lead coolant (BREST) were included in federal program of innovations at very high costs but without any warranty of success.

“Proryv” (Breakthrough) project is analyzed as similar to another failed project in domestic power engineering, that is MHD-generator. Prospects of FR with CNFC development in other states are analyzed. Limitations of NPP with FR propagation on a global scale are discussed.

The third section deals with the predictions of global electricity production at NPP, installed power of NPP generating units, consumption of natural uranium in 2015–2050.

Prediction of global electricity production at NPP for the long term of 2015–2050 is a part of prediction of global electricity production in all types of power plants. Consequently the prediction of global power production is defined by predictions of global electricity consumption and losses.

Prediction of global electricity consumption is derivative of prediction of global economy development, i.e. predictions of global gross product growth and its structure. These are in turn determined by the rate of

the Earth population growth, growth in its prosperity, efficiency of production and other factors. Demonstrated that in 2015–2050 global production of electricity will grow from 24.5 to 40.7 thousand TWh.

Predictions of global electricity production by World and China Energy Outlook 2050., CNPC ETRI 2016., by IAEA (low and high scenario) and by Enerdate (low and high scenario) are compared with data of present paper. Prediction of growth of overall installed power of NPP generating units in 2015–2050 is given on the basis of predictions of the power growth in China and globally as well as the number of generating units decommissioned during this time.

According to the basic prediction growth of overall installed power of NPP generating units in the world will keep the same pace as it had in 1987–2015, thus in 2050 it will be 456 GW and with respect to 2015 it will grow by 16% only.

According to optimistic prediction the rate of growth of overall installed power of NPP generating units will increase by about 3 times compare with basic one and in 2050 this power will be 600 GW and compared to 2015 will grow by 53%.

Predictions of growth of overall installed power of NPP generating units globally in 2016–2050 in this paper and similar predictions by Enerdata and by OECD NEA & IAEA are compared. In accordance with predictions of growth of overall installed power of NPP generating units globally we provide predictions of global electricity production at NPP in 2015–2050. According to basic prediction it will grow from 2.63 (2016) to 3.35 trillion kWh (2050) or by 27%, and by optimistic prediction 2.63 (2016) to 4.4 trillion kWh (2050) or by 67%. Thus the share of global NPP electricity production within the total global electricity production in basic prediction of this paper goes down from 10.5% (2015) to 8.2% (2050), and in optimistic prediction it remains virtually the same 10.5 to 10.8% for the whole term of prediction. Predictions of this paper are noticeably lower than basic prediction of CNPC ETRI 2016, where the share of global electricity production in NPP grows from 10.5% (2015) to 14.6% (2050).

Predictions of global uranium consumption growth are analyzed as well as its proven resources in 2015–2050. It is found that in optimistic (maximum) prediction of NPP electricity production growth in 2016–2050 and keeping the achieved level in the future the extracted resources of natural uranium (as by data of January 1, 2015) will be enough minimum for 63 years (at primary extraction cost less than \$ 130/kgU) and minimum for 82 years (at primary extraction cost less than \$ 260/ kgU).

5-21

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ФАБРИКАЦИИ НИТРИДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

И. В. Пешкичев, О. В. Шульц, А. А. Бочкарева

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

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

Программа внедрения в ядерную энергетику реакторов на быстрых нейтронах предусматривает применение новых видов ядерного топлива, в частности, нитридного. С целью математического обеспечения разработки и внедрения технологии фабрикация смешанного нитридного уран-плутониевого ядерного топлива (СНУП-топлива) РФЯЦ – ВНИИТФ в сотрудничестве с АО «ВНИИИМ» разрабатывает модели и коды для моделирования физико-химических процессов технологии получения СНУП-топлива. Основной задачей является создание программного обеспечения, позволяющего рассчитывать основные характеристики продуктов в зависимости от характеристик исходных веществ и условий проведения процессов и на основе анализа результатов расчета выбирать и оптимизировать технологические режимы.

К настоящему времени разработаны и реализованы математические модели основных процессов фабрикация топлива:

- измельчения порошков;
- карботермического синтеза;
- гранулирования;
- прессования;
- спекания таблеток.

Модель процесса измельчения порошков предназначена для расчета изменения гранулометрического состава порошка в течение процесса с учетом и без учета агломерации частиц, распределения частиц.

Модель карботермического синтеза предназначена для определения оптимальных температурно-временных параметров процесса, состава брикета и реакционных газов, геометрических параметров частиц исходной смеси, необходимых для получения продукта требуемого состава.

Модель гранулирования предназначена для определения оптимальных характеристик процесса и конструкции аппарата, необходимых для получения гранул с требуемой плотностью и размерами.

Модель процесса прессования предназначена для определения оптимальных параметров процесса (распределение частиц по размерам, количество связующего, динамика нагружения), необходимых для получения таблеток с требуемыми характеристиками. Модель позволяет рассчитывать распределение вертикальных и радиальных смещений, распределение объемного давления, распределение контактных

давлений по сечению таблетки, распределение плотности в таблетке, усилие на пуансоне.

Модель процесса спекания предназначена для определения оптимальных параметров процесса (температурно-временного режима и свойств порошка), необходимых для получения таблеток с требуемыми характеристиками. Модель позволяет рассчитывать линейную усадку, плотность, удельную поверхность.

Для верификации моделей необходима реализация разработанной программы экспериментов.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF NITRIDE NUCLEAR FUEL PRODUCTION PROCESSES

I. V. Peshkichev, O. V. Shults, A. A. Bochkareva

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

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

Implementation program of fast reactors in nuclear power engineering provides for the use of new types of nuclear fuel, in particular nitride. For the purpose of mathematical support of development and commissioning of production technology of mixed uranium-plutonium nitride fuel RFNC–VNIITF in cooperation with VNIINM is developing models and codes for modeling of physicochemical processes of this technology. The main objective is to create software that allows you to select and optimize the operating practices, and improve the production processes. To date, developed and implemented as program modules the mathematical models of the basic processes of fuel production technology:

- milling of powders;
- carbothermic synthesis;
- granulation;
- pressing;
- sintering.

Powder milling process model is used to calculate the distribution of particles and the change of the granulometric composition of the powder during the process with and without taking into account agglomeration of particles.

Carbothermic synthesis model is designed to determine the optimum working temperature and time parameters of the process, the composition of the preform and the reaction gas, the geometric parameters of the initial mixture of particles that needed to obtain the desired composition of the product.

Granulating model is designed to determine the optimum process performance and design of the apparatus required to obtain granules with the desired density and size.

Pressing process model is designed to determine the optimum process variables (particle size distribution, the amount of binder, dynamics of loading) that needed to obtain pellets with the desired characteristics. The model allows the calculation of the distribution of vertical and radial displacement, contact pressure distribution over the cross section of pellet, density distribution in the pellet, the force on the punch.

Sintering process model is designed to determine the optimum parameters of the process (temperature-time regime and powder properties) needed to obtain pellets with the desired characteristics. The model allows the calculation of linear shrinkage, density, specific surface area.

To verifying the models is necessary to carry out experimental program which is designed in this work.

5-22

МЕСТО НЕЙТРОННОЙ ТЕРАПИИ В КОМПЛЕКСНОМ ЛЕЧЕНИИ РЕЦИДИВОВ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ГЛИОМ ГОЛОВНОГО МОЗГА

М. М. Пименова, О. Н. Давыдова, А. В. Важенин, Т. М. Шарабура, К. Н. Сыролева, А. А. Ложков

ГБУЗ «Челябинский областной клинический онкологический диспансер», Челябинск, Россия
ГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный медицинский университет», Челябинск, Россия

E-mail: Pimenovamm@mail.ru

Цель исследования. Цель настоящего исследования заключалась в изучении места нейтронной терапии в комплексном лечении рецидивов злокачественных глиом головного мозга.

Материалы и методы. В исследование включено 66 пациентов с рецидивами злокачественных глиом, получавших комплексное лечение на базе Челябинского Областного Клинического Онкологического Диспансера и Центра Нейтронной Терапии в г. Снежинске за период с 2000 по 2014 г. Все пациенты получили лечение по поводу первичной опухоли в соответствии со стандартами. 51,5% (34 человека) исследуемых составили мужчины, 48,5% (32 человек) – женщины. Средний возраст составил 45,5 лет (от 21 до 72 лет). У 27 пациентов был рецидив глиобластомы; у 26 – анапластической астроцитомы; у 7 – анапластической олигодендроглиомы. Отдельно была выделена подгруппа больных в количестве 6 человек с трансформацией доброкачественной астроцитомы в злокачественную глиому. Медиана выживаемости до рецидива составила 15,5 месяцев. Срок рецидива соответствовал дате МРТ, на которой был впервые зафиксирован рецидив опухоли. Повторно оперированы 33 больных. Всем пациентам проведено повторное облучение. В 34 случаях проведена фотонная лучевая терапия. Нейтронная терапия проводилась 15 пациентам, в том числе в 6 случаях в самостоятельном варианте и 9 – в сочетании с фотонным облучением. Суммарная доза повторного облучения составила от 14 до 56 Гр до суммарной кумулятивной дозы, не превышающей 100 Гр. Суммарная доза нейтронного облучения составила 14,4 изоГр. 17 пациентам проведено стереотаксическое облучение с дозой от 15 до 27 Гр за 3–7 сеансов на аппарате

Cyber Knife. 32 пациента получили циклы химиотерапии темодалом или бевализумабом.

Результаты. Медиана общей выживаемости составила 35,5 месяцев. Из 66 включенных в исследование пациентов 42 умерло, 14 – живы. Медиана выживаемости после выявления рецидива составила 14 месяцев. Наименьшая продолжительность жизни отмечена у пациентов с рецидивом глиобластомы, тогда как наибольшая – в группе пациентов с рецидивом олигодендроглиомы. Анализ выживаемости в зависимости от методики лучевого лечения показал наилучшие результаты в группе пациентов с сочетанной фотонно-нейтронной терапией, медиана выживаемости составил 116 мес. против 37,5 мес. в группе фотонного облучения. В то же время наименьшая продолжительность жизни отмечена у пациентов, получавших нейтронную терапию как самостоятельный вариант при лечении рецидива (20,5 мес.). Однако различия оказались статистически недостоверными. Показатели выживаемости в группе больных, оперированных повторно, оказались несколько выше, чем в группе без реоперации (38 мес. против 26 мес.). Пациенты, получавшие химиотерапию в различных вариантах по поводу рецидива, так же имели более высокие показатели выживаемости (медиана выживаемости 38 мес. против 30 мес.).

Заключение. Нейтронная терапия как компонент комплексного лечения рецидивов злокачественных глиом головного мозга в сочетании с фотонной лучевой терапией позволяет увеличить показатели выживаемости больных. Многокомпонентное лечение (повторная лучевая терапия, включая сочетанную фотонно-нейтронную терапию, химиотерапия) позволяет улучшить результаты лечения данной категории пациентов.

NEUTRON THERAPY IN INTEGRATED THERAPY OF RELAPSES OF MALIGNANT BRAIN GLIOMAS

M. M. Pimenova, O. N. Davydova, A. V. Vazhenin,
T. M. Shaburova, K. N. Syroleva, A. A. Lozhkov

Chelyabinsk Regional Clinical Oncologic Dispensary,
Chelyabinsk, Russia
Southern Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia
E-mail: Pimenovamm@mail.ru

Research objective. Research of neutron therapy place within the integrated therapy of malignant brain gliomas relapses was objective of this study.

Materials and approaches. The study surveyed 66 patients with relapses of malignant gliomas who got integrated therapy in Chelyabinsk Regional Clinical Oncologic Dispensary and Snezhinsk Center for Neutron Therapy in 2000–2014. All patient got the treatment of primary tumor according to standard protocols. 51.5% (34 persons) were male, 48.5% (32 persons) were female. Average age was 45.5 years (21 to 72 years). 27 patients had relapse of glioblastoma; 26 had relapse of anaplastic astrocytoma; and 7 of anaplastic oligodendroglioma. Subgroup of 6 patients with transformation of benign astrocytoma into was indi-

vidually considered. Median survival to relapse was 15.5 months. Date of relapse corresponded to the date of MRI when relapse of tumor was first observed. 33 patients repeatedly underwent surgery. All patients were repeatedly irradiated. Photon beam therapy was performed in 34 cases. Neutron therapy was performed for 15 patients, in 6 cases this was only neutron therapy and in 9 cases it was combined with photon radiation. Total dose of repeated irradiation was 14 to 56 Gy to total cumulative dose not exceeding 100 Gy. Total dose of neutron radiation was 14,4 isoGy. 17 patient were subjected to stereotactic irradiation with a dose from 15 to 27 Gy in 3–7 sessions with the help of CyberKnife machine. 32 patients got cycles of chemotherapy with Temozolomide or Bevacizumabum.

Results. General median survival was 35.5 months. 42 patients from 66 in the survey died, 14 are alive. Median survival after finding of relapse was 14 months. Minimum life duration was observed for the patients with relapse of glioblastoma and the highest in the group of patients with relapse of oligodendroglioma. Analysis of survivability depending on technique of radiation therapy has shown best results for the group of patients who got combined photon-neutron therapy, median survival in this group was 116 months compared to 37.5 months in the group that got photon irradiation. At the same time the least duration of life was observed in the group that got only neutron therapy in case of relapse (20.5 months). However these differences were statistically unreliable. Parameters of survivability in the group of patients who repeatedly underwent surgery were somewhat higher than in the group without repeated surgery (38 months vs. 26 months). Patients who got various versions of chemotherapy in view of relapse also had higher parameters of survivability (median survival was 38 months vs. 30 months).

Conclusion. Neutron therapy as a component of integrated therapy in the case of malignant brain glioma relapse combined with photon beam therapy increases patients' survivability parameters. Multi-component therapy (repeated beam therapy, including combined photon-neutron therapy and chemotherapy) allows improvement of results of this patients' category treatment.

5-23

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖИДКО-СОЛЕВЫХ РЕАКТОРОВ В МИРЕ

Л. И. Пономарёв

Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов
им. академика А.А. Бочвара
E-mail leonidp2008@mail.ru

Исследования жидко-солевых реакторов (ЖСР) как возможных кандидатов для преодоления проблем современной ядерной энергетики, существенно оживились в последние годы во всем мире. Преимущества

ЖСР хорошо известны: внутренняя безопасность, отсутствие необходимости изготавливать и перерабатывать твэлы, отсутствие ограничений на глубину выгорания топлива, упрощение замыкания топливного цикла, естественный способ сжигания минорных актинидов и т. д. Практически все ЖСР рассматривали до сих пор с Th-U топливом, поскольку растворимость солей плутония в используемых несущих солях очень мала (1–3 моль.%). В последние 3 года, однако, в России было экспериментально установлено, что в эвтектике LiF-NaF-KF растворимость UF_4 , PuF_3 и AmF_3 при 700°C составляет 45, 33 и 43 мол.% соответственно. Это наблюдение открывает путь для разработки Быстрого Жидко-Солевого Реактора с U-Pu топливом (U-Pu БЖСР) и эффективного реактора-сжигателя Am.

На совещании МАГАТЭ «Состояние исследований по технологии жидко-солевых реакторов», (30.10–03.11. 2016 г.), Вена, Австрия) было представлено приблизительно 20 докладов из 16 стран с результатами исследований по технологии ЖСР во всем мире. В докладе представлены результаты этого совещания и обсуждаются пути дальнейших исследований в этой области.

STATE OF THE ART OF THE MOLTEN SALT REACTOR STUDIES

L. I. Ponomaryov

A.A. Bochvar High Technology Research Institute of Inorganic Materials

E-mail leonidp2008@mail.ru

In the last three years the research activity in the study of molten salt reactors (MSR) as possible candidates to overcome the existing problems of the contemporary nuclear power become essential. The preferences of MSR is well known: inherent safety, no necessity to fabricate solid fuel elements, no limits for the fuel burning, simplification of the closing nuclear fuel cycle, natural way for the actinide burning etc. Due to the small solubility (1–3 mole %) actinide fluorides in the used carrier salts the almost all MSR works propose to use Th-U fuel and thermal neutron spectrum. In the last 3 years in Russia it was established that in the eutectic LiF-NaF-KF the solubility of UF_4 , PuF_3 and AmF_3 are equal 45, 35 and 43 mole% correspondingly. This observation opens the way for the development of the Fast Molten Salt Reactor with U-Pu fuel (U-Pu FMSR), which have the definite preferences in comparison with MSR using Th-U fuel. The first meeting “Status of Molten Salt Reactor Technology” was organized by IAEA (Vienna, 30.10.–03.11., 2016). At this meeting more than 20 talks from 16 countries were presented. In the present talk the main result of this meeting will be presented, as well as the prospects of the MSR research.

5-24

РАСТВОРЕНИЕ UN В РАСПЛАВЛЕННОЙ ЭВТЕКТИКЕ LiCl-KCl

А. М. Потапов, В. Ю. Шишкин, Ю. П. Зайков

Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: A.Potapov_50@mail.ru

В настоящее время монокририд урана (UN) рассматривается как перспективная форма высокотемпературного топлива. Одновременно разрабатываются новые безводные методы переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). К настоящему времени пирохимическая переработка нитридного топлива изучена недостаточно.

Целью настоящей работы является изучение химического и электрохимического растворения монокририда урана в расплавленной эвтектике LiCl-KCl.

Химическое растворение UN в расплав $(LiCl-KCl)_{эвт} + CdCl_2$ протекает согласно реакции:



$$\Delta G = -59 \text{ кДж/моль at } 500^\circ\text{C.} \quad (1)$$

Было найдено, что количество UCl_3 , перешедшее в расплав непропорционально меньше, чем количество $CdCl_2$, потребляемого по реакции (1). Более того, реакция (1) никогда не проходила до конца. Несмотря на избыток UN, небольшое количество $CdCl_2$ всякий раз оставалось в расплаве.

Поскольку UN обладает электронной проводимостью, удобно переводить его в расплав анодным растворением. Однако и в этом случае оказалось, что количество UCl_3 , переходимое в расплав, всякий было меньше, чем должно было бы быть по уравнению Фарадея.

Анализ донного осадка и отложений на аноде показал, что в обоих случаях образуется нерастворимый UNCl, который пассивирует поверхность UN вплоть до полного прекращения анодного растворения или взаимодействия с $CdCl_2$.

В работе излагаются пути снижения выхода UNCl, а также способы организации пирометаллургической переработки нитридного ОЯТ, исключая образование UNCl.

UN DISSOLUTION IN THE MOLTEN LiCl-KCl EUTECTIC

A. M. Potapov, V. Yu. Shishkin, Yu. P. Zaikov

Institute of High Temperature Electrochemistry UB RAS, Ekaterinburg, Russia

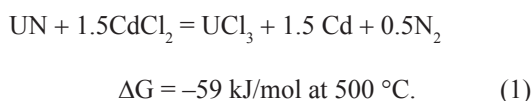
E-mail: A.Potapov_50@mail.ru

Currently, uranium mononitride (UN) is regarded as a promising form of high temperature fuel. At the same time new methods of waterless reprocessing of spent

nuclear fuel (SNF) are developing. By now pyrochemical reprocessing of nitride fuel has been poorly studied.

The aim of this work is to study the chemical and electrochemical dissolution of uranium mononitride in the molten LiCl-KCl eutectic.

The chemical dissolution of the UN in $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut}}$ + CdCl_2 melt proceeds according to the reaction:



It has been found that amount of UCl_3 , which passed into the melt is disproportionately smaller than the amount of CdCl_2 , consumed by reaction (1). Moreover, the reaction (1) never goes to completion. In spite of UN excess small amount of unreacted CdCl_2 each time remained in the melt.

Because UN is an electronic conductor, it is convenient to transfer it into the melt by anodic dissolution. But even in this case it was found that the amount of UCl_3 , passed into the melt, each time less than it should be expected according to the Faraday equation.

Analysis of bottom sediment and deposits on the anode showed that in both cases, formed insoluble UNCl , which passivates the UN surface up to the complete termination of anodic dissolution or reaction with CdCl_2 .

In the present work sets out the ways to reduce the UNCl output, as well as ways of organizing the pyrometallurgical reprocessing of nitride spent nuclear fuel, excluding formation of UNCl .

щью моста переменного тока в широких интервалах концентраций и температур (350–920°C). Постоянная ячейек была 85–91 cm^{-1} .

Нами измерена электропроводность большого количества квазибинарных и многокомпонентных расплавленных смесей $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт}}$ с хлоридами одно-, двух- и трехвалентных металлов из числа присутствующих в ОЯТ (CsCl , CdCl_2 , LnCl_3 , UCl_3). Так, например, удельная электропроводность (κ) расплавленной смеси $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт}}$ + 2,81 мол.% CeCl_3 + 4,29 мол.% NdCl_3 + 4,29 мол.% UCl_3 выражается уравнением:

$$\kappa = -4,2787 + 9,1668 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,0481 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \text{ См/см}$$

$$T = 689 - 893 \text{ К}$$

Эти экспериментальные данные должны стать основой для создания модели, позволяющей рассчитывать электропроводность многокомпонентных расплавов на основе $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт}}$ произвольного состава. Предполагается, что модель будет ориентирована на расплавы, образующиеся при растворении нитридно-го ОЯТ.

Помимо электропроводности в ряде случаев сделаны оценки плотности и построены линии ликвидуса смесей.

Результаты интерпретированы с точки зрения сосуществования и взаимного влияния комплексных хлоридных группировок, образуемых в расплавленных сложных смесях ионами Li^+ и многовалентными катионами соответствующих металлов.

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF MOLTEN COMPLEX MIXTURES BASED ON LiCl-KCl

A. B. Salyulev, A. M. Potapov, V. Yu. Shishkin

Institute of High Temperature Electrochemistry UB RAS,
Ekaterinburg, Russia

E-mail: A.Potapov_50@mail.ru

5-25

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАСПЛАВЛЕННЫХ СЛОЖНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ LiCl-KCl

А. Б. Салюлев, А. М. Потапов, В. Ю. Шишкин

Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: A.Potapov_50@mail.ru

В настоящее время в ряде стран, включая Россию, разрабатывается новое нитридное ядерное топливо и, соответственно, последующие методы его переработки. Наиболее перспективным способом его переработки является пироэлектрохимия. Таблетки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) химически или электрохимически растворяют в расплаве $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт}}$ с последующим электрохимическим отделением U и Pu от лантанидов и других продуктов деления.

Целью настоящей работы является изучение электропроводности расплавов, аналогичных тем, которые образуются при растворении реального нитридного ОЯТ в LiCl-KCl.

Измерения проводились в кварцевых ячейках капиллярного типа с платиновыми электродами с помо-

Currently, in a number of countries, including Russia, a new nitride nuclear fuel and, therefore, the following methods of its reprocessing are under development. The most promising way of its reprocessing is pyroelectrochemistry. Tablets of spent nuclear fuel (SNF) are chemically or electrochemically dissolved in the $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut}}$ melt followed by electrochemical separating of U and Pu from lanthanides and other fission products.

The aim of this work is to study the electrical conductivity of the melts, similar to those formed by dissolving of real nitride spent nuclear fuel in LiCl-KCl.

Measurements were carried out in quartz capillary type cell with platinum electrodes using an AC bridge over a wide concentration and temperature ranges (350–920°C). Cell constant ranged from 85 to 91 cm^{-1} .

We measured the electrical conductivity of a large number of quasi-binary and multi-component molten mixtures of $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut}}$ with chlorides of mono-, di- and trivalent metal from among those present in the SNF (CsCl , CdCl_2 , LnCl_3 , UCl_3). For example, the conductivity

(κ) of molten $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut}} + 2.81 \text{ mol\% CeCl}_3 + 4.29 \text{ mol\% NdCl}_3 + 4.29 \text{ mol\% UCl}_3$ mixture expressed by the equation:

$$\kappa = -4.2787 + 9.1668 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3.0481 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \text{ См/см}$$

$$T = 689 - 893 \text{ К}$$

These experimental data should provide the basis for creating a model to calculate the conductivity of multicomponent melts on the basis of $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut}}$ of arbitrary composition. It is expected that the model will be focused on the melts formed by dissolving of the nitride SNF.

In addition to electrical conductivity, in some cases, density estimates are made and liquidus lines of mixtures are built.

The results are interpreted in terms of coexistence and mutual influence of chloride complexes formed in molten complex mixtures by Li+ ions and corresponding polyvalent metal cations.

5-26

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЗЯТЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПК ВИЗАРТ

А. А. Рыкунова, И. Р. Макеева, В. Ю. Пугачёв,
В. Г. Дубосарский, О. В. Вербицкая,
К. В. Чайко, Е. А. Белоногова

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

E-mail: a.a.rykunova@vniitf.ru

Современный уровень разработки и оптимизации сложных технических систем, к которым относятся технологии ядерной энергетики в области замыкания ядерного топливного цикла, предполагает разработку программно-информационных имитационных моделей технологических процессов и систем производств вне реакторной части ЗЯТЦ. В результате моделирования должны быть решены следующие задачи:

- обоснована реализуемость технологических решений;
- подготовлены исходные данные для разработки конструкторской и проектной документации;
- выполнена оценка и оптимизация решений по компоновке технологических линий с точки зрения предъявляемых требований по производительности, согласованности работы переделов, динамике переработки промежуточных и конечных продуктов;
- выполнена оценка накопления делящихся и ядерных материалов на различных технологических переделах, в промежуточных хранилищах и емкостях
- исходная информация для оценки безопасности и соответствия критериям нераспространения;
- выполнена оценка объемов и типов образующихся радиоактивных отходов;

– произведен выбор и оптимизация режимов технологических процессов;

– выполнена оценка влияния технологических режимов на состав и качество промежуточных и конечных продуктов.

Для решения данных задач в рамках проектного направления «Прорыв» в РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина разрабатывается ПК ВИЗАРТ. ПК ВИЗАРТ представляет собой интегрированную среду для разработки моделей технологических процессов ЗЯТЦ и разработан на основе программной платформы АТЕК [1]. ПК ВИЗАРТ используется при разработке и проектировании технологических линий производств вне реакторной части ЗЯТЦ как для проведения расчетов материального баланса, так и для проведения динамических расчетов и построения циклограмм работы оборудования модулей переработки и фабрикации топлива [2].

Результатами проведения стационарного расчета в ПК ВИЗАРТ являются массовые и концентрационные характеристики реагирующих сред, составы и относительные массы потоков РАО. Полученные данные можно применять при подготовке конструкторской и проектной документации.

По результатам проведения динамических расчетов в программном комплексе экспертами анализируется производительность работы оборудования технологических линий и потребность в тиражировании отдельных узлов и аппаратов. Циклограммы работы оборудования, которые получают при расчетах с помощью программных средств комплекса, являются удобным инструментом для оценки единичной мощности оборудования.

ПК ВИЗАРТ обеспечивает возможность динамического построения расчетной схемы технологической линии с любой степенью детализации на основе пополняемой библиотеки моделей технологических узлов. Таким образом, возможности ПК ВИЗАРТ делают комплекс универсальным инструментом для проведения расчетов технологий ЗЯТЦ с возможностью выбора модели технологического процесса в зависимости от решаемой задачи.

В докладе представлены результаты проведения балансовых и динамических расчетов для различных технологических решений производств вне реакторной части ЗЯТЦ.

Литература

1. И.Р. Макеева, Вербицкая О.В., Дубосарский В.Г., Пугачев В.Ю., Пчелинцева С.В., Соколов В.П. Моделирование технологических процессов переработки ОЯТ и фабрикации топлива на платформе АТЭК. Тезисы доклада на VIII Российской конференции по радиохимии «Радиохимия-2015», г. Железногорск, 2015.
2. Шмидт О.В., Макеева И.Р., Ливенцов С.Н. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств. // Радиохимия, 2016, т. 58, N 4, с. 316–323.

CLOSED FUEL CYCLE TECHNOLOGIES MODELLING WITH SOFTWARE PACKAGE VIZART

A. A. Rykunova, I. R. Makeeva, V. Yu. Pugachev,
V. G. Dubosarskiy, O. V. Verbitzkaya,
K. V. Chaiko, E. A. Belonogova

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

E-mail: a.a.rykunova@vniitf.ru

Modern development and optimization level of complex engineering systems, to which technologies of nuclear power engineering in the field of nuclear fuel cycle closing belong, is supposed to provide information- and software-based simulation models of out-of-pile technological processes and closed fuel cycle production systems. As a result of computer simulation the following goals should be challenged:

- performability of technological solutions should be substantiated;
- primary data for development of design and project documentation should be prepared;
- decision estimation and optimization of technological lines arrangement from the standpoint of qualifying standards on productivity, coherent functioning, dynamics of intermediate and ultimate products output should be performed;
- accumulation estimation of fissile and nuclear materials on different technological stages, in intermediate storages and capacities, i.e. primary information for safety evaluation and nuclear nonproliferation safety criteria, should be performed;
- amount and type estimation of produced radioactive waste should be carried out;
- selection and optimization of technological processes should be planned;
- impact estimation of operating practices on composition and quality of intermediate and ultimate products output should be performed;

In order to solve these problems within the bounds of «Proryv» project design area, in RFNC – VNIITF a software package VIZART is being developed. VIZART represents an integrated model development environment of closed fuel cycle technological processes and based on software platform (framework) ATEK [1]. VIZART is used in development and planning technological lines of out-of-pile closed fuel cycle production systems both for material balance calculation as well as for dynamic calculation and building cyclograms of radiochemical reprocessing and fuel fabrication [2].

Results of stationary calculation in VIZART contain mass and concentration characteristics of reaction mediums, compositions and relative masses of radioactive waste flows. Observed data can be used in preparation of engineering and project documentation.

The results of simulation can be used by experts to analyze the hardware work productivity of technological lines and necessity for replication of specific hard-

ware nodes and apparatus. Hardware work cyclograms, which are produced by the software means of VIZART, can be used to comfortably estimate one-unit hardware power.

VIZART provides capabilities for dynamic construction of technological line calculation diagram with any specification level, based on replenished library of technological process models. Therefore, performance capabilities make this software package a multipurpose tool for closed fuel cycle technologies simulation with possibility of process model selection depending on the problem type.

The results of balance and dynamic calculations for different technological solutions of out-of-pile closed fuel cycle production systems are presented in the report.

References

1. Makeeva I.R., Verbitzkaya O.V., Dubosarskiy V.G., Pugachev V.Yu., Pchelintzeva S.V., Sokolov V.P. Modellings of technological processes of radioactive waste reprocessing and fuel fabrication of software platform ATEK. Report thesis on VIII Russian conference on radiochemistry «Radiochemistry-2015», Zheleznogorsk, 2015 [in Russian].
2. Shmidt O.V., Makeeva I.R., Liventsov S.N. Modelling of technological stages of closed fuel cycle, as a tool in development and optimization of technological productions. // Radiochemistry, 2016, t. 58, N4, p. 316–323 [in Russian].

5-27

РАЗВИТИЕ ПО ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ РАСЧЕТОВ ДОЗОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ЛЕЧЕНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ БОЛЬНЫХ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИЕЙ

В. О. Карпунин¹, В. И. Костюченко¹,
С. И. Самарин², А. С. Углов²

¹НИИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ ГНЦ РФ – Институт
Экспериментальной и Теоретической Физики, Москва,
Россия

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

E-mail: samarine@mail.ru

В работе приводится обзор специализированной программы IThMC для расчета дозовых полей при планировании лечения онкологических больных протонной терапией. Приводится мотивация создания этой программы, ее отличительные особенности по сравнению с другими известными кодами. Так же приводятся результаты верификации программы IThMC и некоторые примеры ее практического применения.

Кроме того, в работе обосновывается необходимость развития программы и расширение ее возможностей с учетом доступных современных вычислительных ресурсов. Формулируются требования

к новому программному обеспечению (ПО), предлагается реализация на базе программы IThMC, описывается текущее состояние работ по созданию нового ПО.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR PRECISION DOSE CALCULATIONS IN RADIOTHERAPY PLANNING

V. O. Karpunin¹, V. I. Kostjuchenko¹,
S. I. Samarin², A. S. Uglov²

¹NRC «Kurchatov Institute» FSBI SSC RF – Institute for Theoretical and Experimental Physics (ITEP), Proton Therapy, Moscow, Russia

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

The paper briefly describes the IThMC code which was developed specially for dose calculations in proton therapy planning. The description includes reasons for its development and its comparison with other known codes. We also provide results of IThMC verification and some examples of its application in actual practice.

The code needs further development to extend its capabilities through the use of state-of-the-art computing technologies. We formulate requirements to a new software package to be implemented on the basis of the IThMC code and report progress.

путем преобразования долгоживущих изотопов в изотопы с малым периодом полураспада.

В [2] экспериментально показано, что лазерное облучение наночастиц металлов в водных растворах солей урана приводит к существенному отклонению активности радионуклидов этого семейства от равновесных значений. Изменение активности радионуклидов происходит также в процессе лазерного облучения металлических мишеней в водных растворах солей урана. При этом наблюдается ускорение спонтанных α - и β -распадов нуклидов, входящих в семейство урана-238. Этот эффект был исследован в широком диапазоне длин волн и длительностей импульсов лазерного излучения, как это экспериментально показано в [3].

В [4] приводятся экспериментальные результаты по лазерно-индуцированному ускоренному распаду цезия-137. В отличие от нуклидов семейства урана-238, у него существует единственный канал распада, а именно: β -распад в барий-137m с периодом полураспада 30 лет. В свою очередь барий-137m через 2,5 минуты распадается в барий-137 с испусканием γ -кванта. Поэтому интенсивность потока γ -квантов исследуемого образца позволяет количественно определять содержание цезия-137 в нем и судить о скорости лазерно-индуцированного распада.

Следует отметить, что в [4] использовался промышленный лазер на парах меди со средней мощностью излучения до 10 Вт и длительностью импульсов 15 нс, генерирующий на длинах волн 510,6 нм и 578,2 нм видимого диапазона с частотой следования 15 кГц [5, 6], а мишенью служила золотая (99,9%) пластина.

При этом лазерная абляция мишеней в водных растворах солей нуклидов сопровождается образованием в растворе наночастиц материала и, по всей вероятности, как и при лазерном облучении наночастиц металлов [2], является необходимым условием изменения активности нуклидов, что также следует из наблюдения роста активности тория-234 в течение длительного (до 100 дней) времени после облучения [7].

В настоящее время рассматривается возможность дезактивации радионуклидов при воздействии электрического разряда, а именно: в зоне формирования различных типов коронного разряда. Для этого разработаны источники питания объемного коронного наносекундного разряда [8] и лавинно-стримерного коронного разряда [9].

Заключение

1. Эффект дезактивации жидких радиоактивных отходов (ЖРО) исследован в широком диапазоне длин волн и длительностей импульсов лазерного излучения.

2. При выполнении экспериментальных исследований по дезактивации радионуклидов, входящих в состав ЖРО получен ускоренный распад типичных радионуклидов (^{232}Th , ^{238}U , ^3H) в ядра стабильных элементов, а также показана возможность дезактивации цезия-137.

5-28

ЛАЗЕРНАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Н. М. Лепёхин¹, В. Г. Филиппов¹, Е. В. Бармина²,
А. В. Симакин², Г. А. Шафеев²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Высоковольтный научно-исследовательский центр 900, Истра, Россия

²Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: lnm940@yandex.ru, gashafeev@gmail.com

Одним из направлений исследований, связанных с возможностью радикального улучшения параметров ядерной энергетики, является решение вопроса резкого сокращения радиоактивных отходов. Возможность осуществления термоядерных реакций в электрическом разряде впервые сформулирована в [1], где исследовалось электромагнитное воздействие электрического разряда на вещество. Лазерное облучение является одной из форм электромагнитного воздействия на вещество, что может оказаться недорогим и эффективным методом утилизации ядерных отходов

3. Механизмы ускорения спонтанных распадов радионуклидов, входящих в состав ЖРО под действием лазерного излучения или коронного разряда, остаются невыясненными и требуют дальнейшего продолжения исследований.

Литература

1. И. В. Курчатov. О возможности создания термоядерных реакций в газовом разряде. – М.: Атомная энергия, 1956. – вып. 3, с. 65–75.
2. А. В. Симакин, Г. А. Шафеев // Квантовая Электроника. – 2011. – Т. 41, № 7, с. 614–618.
3. Е. В. Бармина, И. А., Сухов Н. М. Лепехин, Ю. С. Присеко, В. Г. Филиппов, А. В. Симакин, Г. А. Шафеев // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 6. – с. 591–596.
4. Е. В. Бармина, А. В. Симакин, Г. А. Шафеев // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 8, с. 791–792.
5. Н. М. Лепехин, Ю. С. Присеко, В. Г. Филиппов и др. // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 37, № 8, с. 765–769.
6. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. – М.: Физматлит, 2005. – 312 с.
7. Kirichenko, N. A., Simakin, A. V., Shafeev, G. A. Physics of Wave Phenomena. – 2014, 22(2), 81.
8. Н. М. Лепехин, Ю. С. Присеко, Н. И. Пуресев, В. Г. Филиппов // Письма в ЖТФ. – 2014. – том 40, вып. 12, с. 59–65.
9. Н. М. Лепехин, Ю. С. Присеко, В. Г. Филиппов, М. У. Булатов, Д. И. Сухаревский, В. С. Сысоев // Письма в ЖТФ. – 2015. – том 41, вып. 7, с. 96–102.

LASER DECONTAMINATION OF RADIOACTIVE WASTE

N. M. Lepikhin¹, V. G. Filippov¹, E. V. Barmina²,
A. V. Simakin², G. A. Shafeev²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, VNITZ 900, Istra, Russia

²Scientific center of wave researches of Institute of General physics named after A. M. Prokhorov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: lnm940@yandex.ru, gashafeev@gmail.com

One of the areas of research related to the possibility of radical improvement of parameters of nuclear power is the solution to the issue of the sharp reduction in radioactive waste. The possibility of thermonuclear reactions in an electrical discharge was first formulated in [1], which investigated the electromagnetic effects of the electrical discharge of the substance. Laser irradiation is a form of electromagnetic influence on the substance, which can be an inexpensive and effective method of disposing of nuclear waste by converting long-lived isotopes are isotopes with short half-life.

In [2] it is experimentally shown that laser irradiation of nanoparticles of metals in aqueous solutions of salts of uranium leads to a significant deviation of the radionuclide activity of this family from the equilibrium values. Change of activity of radionuclides is also in the process of laser irradiation of metal targets in aqueous

solutions of salts of uranium. There is an acceleration of the spontaneous α - and β -decay nuclides belonging to the family of uranium-238. This effect was investigated in a wide range of wavelengths and durations of laser pulses, as experimentally shown in [3].

In [4] some experimental results on laser-induced accelerated decay of cesium-137. In contrast to the family of nuclides of uranium-238, it is the only channel of decay, namely β -decay to barium-137m with a half-life of 30 years. In turn, the barium-137m in 2.5 minutes decays into barium-137 with the emission of γ -quantum. Therefore, the intensity of the flow of γ -quanta of the studied sample allows to quantify the content of cesium-137 in it, and to judge the speed of laser-induced decay.

It should be noted that in [4] used industrial copper-vapor laser with an average radiation power up to 10 W and a pulse duration of 15 NS, generating at wavelengths 510,6 nm and 578,2 nm in the visible range with a repetition rate of 15 kHz [5, 6], and target served as the gold (99,9%) plate.

When this laser ablation target in water solutions of salts of nuclides accompanied by the formation in solution of nanoparticles of the material and, in all probability, as in laser irradiation of metal nanoparticles [2], is a necessary condition for changes in the activity of nuclides, which also follows from observations of the growth and activity of thorium-234 during the long (up to 100 days) time after irradiation [7].

At the present time, the possibility of decontamination of radionuclides when exposed to electric discharge, namely in the area of formation of various types of corona discharge. For this purpose the power sources volume nanosecond corona discharge [8] and avalanche-streamer corona discharge [9].

Conclusion

1. The effect of decontamination of liquid radioactive waste (LRW) is investigated in a wide range of wavelengths and the pulse durations of the laser radiation.

2. When performing experimental studies on decontamination of radionuclides included in the LRW received the accelerated decay of typical radionuclides (²³²Th, ²³⁸U, ³H) in the nucleus of stable elements and the possibility of decontamination of cesium-137.

3. Acceleration mechanisms of spontaneous decay of radionuclides that are members of the Gro under the action of laser radiation or corona discharge, remain unclear and require further research.

References

1. I. V. Kurchatov. About possibility of creation of thermonuclear reactions in gas discharge. – М.: Atomic energy, 1956, vol.3, pp. 65–75.
2. Simakin A. V., Shafeev G. A. // Quantum electronics. – 2011, vol. 41, No. 7, pp. 614–618.
3. Barmina, E. In., I. A., Sukhov N. M. Lepikhin, Yu. S. Priseko, V. G. Filippov, A. V. Simakin, G. A. Shafeev, // Quantum electronics, the 2013. – Vol. 43, No. 6. – p. 591–596.
4. E. V. Barmina, A. V. Simakin, G. A. Shafeev // Quantum electronics. – 2014, Vol. 44, No. 8, pp. 791–792.

5. N. M. Lepekhin, Yu. S., PRISCO, V. G. Filippov et al. // Quantum electronics. – 2014, Vol 37, No. 8, pp. 765–769.
6. A. G. Grigor'yants, M. A. Kazaryan, N. A. Liabin. The copper vapor lasers: design, characteristics and applications. – M.: Fizmatlit, 2005. 312.
7. Kirichenko N. A., Simakin A. V., Shafeev G. A. Physics of Wave Phenomena, 2014, 22(2), 81.
8. N. M. Lepekhin, Yu. S. Priseko, N. I. Paresev, V. G. Filippov // technical physics Letters, 2014, volume 40, issue. 12, p. 59–65.
9. N. M. Lepekhin, Yu. S. Priseko, V. G. Filippov, M. U. Bulatov, D. I. Sukharev, S. V. Sysoev // technical physics Letters, 2015, vol. 41, issue. 7, pp. 96–102.

5-29

**ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ АЭС
С ЛЕГКОВОДНЫМИ РЕАКТОРАМИ**

В. А. Симоненко

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ
технической физики имени академика Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.a.simonenko@vniitf.ru

Основная часть энергии в ядерной энергетике производится на реакторах, у которых теплоносителем является легкая вода. Самой большой опасностью для таких реакторов является осушение и сопутствующая ему деградация активной зоны (АЗ). Это обуславливает развитие пароциркониевой реакции, которая приводит к выходу больших количеств водорода (около 1 т/ГВт эл.) в помещениях защитной оболочки (ЗО) реакторной установки (РУ). В силу больших геометрических масштабов системы и большого диапазона значений физических параметров протекающих процессов полномасштабное изучение их невозможно. Используется расчетно-экспериментальный подход. Он предполагает проведение модельных экспериментов, создание широкого класса теоретических моделей, охватывающих большой перечень физико-механических и химико-физических процессов, создание на их основе программных кодов, последующее проведение ресурсоемких расчетов на мощных вычислительных комплексах. В силу сложности моделируемых систем и моделей процессов, большого диапазона длительности протекания процессов (от микросекунд до десятков часов) сквозное моделирование их нецелесообразно и фактически невозможно.

По этим причинам создаются иерархически организованные модели. Адекватно им должны быть организованы и коды. В моделях и кодах первого поколения рассматривались укрупненно большие области (часто целые помещения), в которых среда характеризовалась однородными параметрами. В частности, при этом принимались значения концентрации водорода, усредненные по большим объемам. В действи-

тельности во многих случаях истечение водородосодержащего состава происходит в шлейфовом режиме, что приводит к образованию стратифицированных слоев с повышенным содержанием водорода в верхних частях помещений. В случае воспламенения при таком неоднородном заполнении происходит интенсивное горение водородосодержащих парогазовых составов (ВПГС), которое может привести к разгерметизации ЗО и будет сопровождаться выходом накопленных в АЗ радиоактивных продуктов за пределы АЭС. Именно это и составляет основную опасность тяжелых аварий.

Описание образования стратифицированных областей требует использования более совершенных кодов, в которых следует параллельно учитывать ряд важных процессов – различные режимы заполнения помещений ЗО парогазовыми составами, отток тепла в стенки, конденсацию паров воды, воздействие используемых средств предотвращения опасного развития процессов (спринклеров, рекомбинаторов, систем пассивного отвода тепла и др.). Наиболее сложными являются процессы воспламенения, развития и распространения пламени, турбулизации возникающих течений, возможный переход горения в детонацию. Заметим, что для некоторых из них, в частности, для воспламенения и развития пламени с учетом различных механизмов неустойчивости, еще нет достаточно полных теоретических моделей. Тем не менее, для практических применений необходимо иметь коды, позволяющие описывать такие процессы. Для калибровки теоретических моделей необходимо привлечение экспериментальных данных, полученных, в частности, во ВНИИТФ.

Обсуждается методология создания таких кодов. Она заключается в выделении особых областей, в частности, фронта горения, областей (зон) конденсации пара; в создании методов достаточно полного описания физико-механических и химико-физических процессов, примыкающих к таким областям. Особого внимания заслуживают процессы, протекающие в областях, примыкающих к фронту горения на этапе развития неустойчивостей, а также при повышении интенсивности горения и влиянии неоднородностей заполнения, что ведет к турбулизации среды. В конечном итоге такие процессы ведут к взрывному протеканию горения, к переходу в режим детонационной волны. Эти особенности с необходимостью приводят к развитию и использованию более сложных теоретических моделей, алгоритмов и программных комплексов. Обосновывать применимость таких сложных систем с неизбежностью приходится с привлечением результатов соответствующих экспериментов, подобие которых с процессами, характерными для ТА, обеспечивается близостью соответствующих безразмерных параметров.

**MODELING AND SIMULATIONS
IN THE INTEREST OF HYDROGEN SAFETY
AT NPP WITH LIGHT-WATER REACTORS**

V. A. Simonenko

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

E-mail: v.a.simonenko@vniitf.ru

Major part of energy produced by nuclear power comes from reactors using light water as a coolant. The largest hazard for such reactors is loss of a coolant accompanied with core degradation. It launches steam-zirconium reaction, which generates significant amount of hydrogen (ca. 1t/GW el.) within the reactor containment vessel. It is not feasible to perform a full-scale experimental study into the processes going on there due to huge dimensions of the system and wide range of physical parameters of the processes. Therefore, approach used for the study combines simulations and experiments. It includes conduct of model experiments, development of a wide class of mathematical models capturing a large list of physicochemical and physicochemical processes, creation of computer codes based on the models, and application of the codes to simulate the processes on high-performance computers. Since the systems modeled and resulting models are very complex and processes vary a lot in durations (from microseconds to tens of hours), it is in fact impossible to do end-to-end modeling.

These are the reasons to develop hierarchic models and similarly organized codes. The first-generation models and codes addressed large areas (often entire halls) at a high level, assuming parameters be uniform over the area. In particular, hydrogen concentrations used were averaged over large volumes. In reality many cases show that hydrogenous-steam-air stream flows in a plume-like mode, thus forming stratified layers with higher hydrogen concentration in the upper parts of the premises. In the case of inflammation such nonhomogeneous medium shows high-intensive burning of hydrogen-containing steam-air mixtures which can cause failure of the containment shell and leakage of the accumulated radioactive products beyond the reactor core and NPP. This is a basic hazard of severe accidents.

To simulate formation of the stratified areas requires much more advanced codes, capable of capturing a number of important processes in parallel, such as different modes of filling the containment vessel with steam-gas mixtures, heat loss in the walls, water vapor condensation, effect of instruments preventing dangerous scenarios (sprinklers, recombiners, systems for passive heat transfer, etc.). The most complex are the processes of inflammation, flame growth and propagation, flame-generated turbulence, possible transition to detonation. For some of the above processes, there are no complete mathematical models yet, for instance, for inflammation and flame growth. However, for practical applications it is necessary to have computer codes simulating them. To calibrate mathematical models, experimental data are needed, in-

cluding those obtained by VNIITF.

The talk discusses methodology for development of such codes. It consists in identifying special areas, in particular, flame front and vapor condensation and in developing techniques for complete modeling of physical, mechanical and chemical processes running in adjacent areas. Special attention should be given to the processes in the areas adjacent to the flame front when turbulence is initiated and burning intensity grows and non-homogeneity of the medium enhances its turbulization. Such processes finally change the burning mode to an explosive one forming a detonation wave. These specifics require much more complex mathematical models, algorithms and computer codes. Applicability of such complex systems can be justified and verified only with the use of the results obtained in the experiments, which similarity with the processes typical of severe accidents is ensured through the closeness of the appropriate dimensionless parameters.

5-30

**ПРИБЛИЖЕННЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ РАСЧЕТА СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ
РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА**

А. С. Соловьев, С. Ю. Игашов

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

E-mail: alexander.solovyev@mail.ru, igashov@theor.mephi.ru

При решении многих ядерно-физических задач возникает необходимость в сечениях ядерных реакций, которые либо характеризуются большими погрешностями экспериментальных измерений, либо вовсе оказываются недоступными для надежных измерений в интересующем диапазоне энергий. Чисто математические экстраполяции также зачастую являются недостоверными. Все это актуализирует построение приближенных теоретических методов расчета сечений ядерных реакций. При этом особый интерес представляют методы, в которых учитывается микроскопичность ядерной системы.

В настоящей работе предлагаются микроскопические методы расчета сечений реакций радиационного захвата. В основе этих методов лежат кластерные представления о ядерной структуре и динамике и математический аппарат разложений по базису осцилляторных функций. Применимость и эффективность методов демонстрируется на конкретных реакциях.

APPROXIMATE THEORETICAL METHODS OF CALCULATING CROSS SECTIONS FOR RADIATIVE CAPTURE REACTIONS

A. S. Solovyev, S. Yu. Igashov

Dukhov Research Institute of Automatics,
Moscow, Russia

E-mail: alexander.solovyev@mail.ru, igashov@theor.mephi.ru

Solution of a number of nuclear problems requires knowledge of nuclear reactions cross sections which either have large errors of experimental measurements or turn out to be inaccessible for the reliable measurements in energy range representing interest for the investigations. Pure mathematical extrapolations are often and often unreliable too. As a result construction of approximate theoretical methods for calculating the cross sections of the reactions becomes rather important goal. The methods taking into account microscopicality of the nuclear system are of special interest.

In the present work the microscopic methods of calculating the cross sections for the radiative capture reactions are proposed. These methods are based on the cluster conceptions of nuclear structure and dynamics and mathematical formalism of expansions over basis of the oscillator functions. Applicability and efficiency of the methods is demonstrated by consideration of the particular reactions.

5-31

АКТИВНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА

М. Т. Суинхоу, Х. Треллуэ, А. Фавалли

Отдел ядерной инженерии и нераспространения, Лос-Аламосская национальная лаборатория, Лос Аламос, Нью-Мексико 87544, США

E-mail: swinhoe@lanl.gov

Во всем мире имеется много плутония, содержащегося в отработанных топливных сборках, и сегодня нет способа, с помощью которого можно было бы осуществить количественный неразрушающий анализ делящегося материала. Результаты расчетов методом Монте-Карло показывают, что высокой точности (1–2%) в определении содержания делящегося материала в топливных сборках можно добиться при использовании методов активного облучения нейтронами (активной подсветки нейтронами), что позволило бы применять эти методы для учета ядерных материалов независимо от заявленной оператором информации.

В настоящем докладе представлена разработка методики дифференциальной регистрации затухания нейтронов (DDA) для отработанного ядерного топлива. Методика может применяться для решения следующих задач: (1) восстановления после потери на-

копленных в организации знаний, (2) проверки учетной входной массы плутония на перерабатывающей установке, (3) количественного определения массы Pu, отправляемого с одного объекта на другой, с точки зрения оценки расхождений в данных отправителя и получателя, и (4) прекращения обеспечения гарантий ядерных материалов в хранилище отработанного топлива. Измерения плутония в отработанном топливе являются трудной задачей в связи с тем, что такое топливо содержит в себе сложную комбинацию делящихся, размножающихся, излучающих нейтронов и гамма-кванты, излучающие нуклиды. Системы на основе нейтронных генераторов используются для измерений отходов (растворенной «шелухи») на перерабатывающих заводах, а также при проведении общего анализа контейнеров с отходами. Такие системы DDA применялись на протяжении десятилетий, но никогда для анализа полностью отработанных топливных сборок, которые представляют собой гораздо более активно размножающуюся систему, чем отходы, и, соответственно, с гораздо более сложным поведением. Целью настоящей работы была дальнейшая разработка методики DDA путем экспериментальной демонстрации ее технической осуществимости и повышения ее эффективности. Результаты данной работы уже учтены в проекте конструкции реальной системы DDA, использование которой запланировано на 2017 год.

ACTIVE INTERROGATION OF SPENT FUEL

M. T. Swinhoe, H. Trelle and A. Favalli

Nuclear Engineering and Nonproliferation Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87544, USA

E-mail: swinhoe@lanl.gov

There are large amounts of plutonium that are contained in spent fuel assemblies around the world and currently there is no way to make quantitative non-destructive assay of the amount of fissile material. Monte Carlo results show that high accuracy (1–2%) for the fissile content in spent fuel assemblies can be obtained with active neutron interrogation techniques and this would allow their use for nuclear material accountancy independently of any information from the operator.

This paper presents the development of the Differential DieAway (DDA) technique for spent nuclear fuel. The technique can address the following applications: (1) Recovery from a loss of the Continuity-of-Knowledge. (2) Verification of the plutonium input accountability mass at a (re)processing facility, (3) Quantification of the Pu mass shipped from one facility to another in the context of resolving shipper/receiver differences. And (4) enabling the termination of safeguards at a spent fuel repository. The measurement of plutonium in spent fuel is not an easy problem because of the complex combination of fissile, fertile, neutron emitting and gamma emitting nuclides of which it is composed. Neutron generator based systems are used for waste measurement (dissolved hulls) in re-

processing plants as well as in general waste drum analysis. Such DDA systems have been used for decades but have never been applied to the assay of complete spent fuel assemblies, which represent a much more highly multiplying system than waste with correspondingly more complex behavior. The objective of this work was to advance the development of the DDA by experimentally demonstrating its feasibility and improving performance. The results of this work have already been incorporated into the design of a practical DDA system, which is planned to be used in 2017.

5-32

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

Д. А. Касатов, А. Н. Макаров, И. Н. Сорокин,
С. Ю. Таскаев, И. М. Щудло

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: taskaev@inp.nsk.su

Перспективным методом лечения злокачественных опухолей рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ), обеспечивающая избирательное уничтожение клеток опухоли путем предварительного накопления стабильного изотопа бор-10 и последующего облучения эпитепловыми нейтронами. В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция с большим выделением энергии в клетке, что приводит к ее гибели. Ожидается, что в ближайшее время для широкого внедрения методики БНЗТ в клиническую практику будут производиться ускорительные источники эпитепловых нейтронов. Одним из таких источников может стать оригинальный источник эпитепловых нейтронов, созданный в ИЯФ СО РАН. Генерация нейтронов осуществляется в результате реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ при энергии протонов 2,3 МэВ. Для получения пучка протонов с током 5 мА использован новый тип ускорителя заряженных частиц – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. Полученный пучок нейтронов удовлетворяет требованиям БНЗТ: облучение клеточных культур приводит к разрушению клеток с бором при сохранении клеток без бора; облучение иммунодефицитных мышей с привитой глиобластомой ведет к их исцелению. В докладе описываются результаты проведенной модернизации ускорителя, представляются и обсуждаются результаты экспериментов по получению протонного пучка, по формированию терапевтического пучка нейтронов с применением литиевой мишени и системы формирования пучка, *in vitro* и *in vivo* исследований и декларируются планы.

ACCELERATOR BASED NEUTRON SOURCE FOR BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY

D. A. Kasatov, A. N. Makarov, I. M. Shchudlo,
I. N. Sorokin, S. Yu. Taskaev

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk,
Russia

E-mail: taskaev@inp.nsk.su

A promising method of treatment of many malignant tumors, especially incurable brain tumors, is the boron neutron capture therapy (BNCT). It provides a selective destruction of tumor cells by prior accumulation of a stable boron-10 isotope inside them and subsequent irradiation with epithermal neutrons. As a result of boron absorption, the nuclear reaction takes place with a large energy release in the cell, leading to its death. It is expected that soon a number of accelerator sources of epithermal neutrons for BNCT will be created for the widespread introduction of this technique in clinical practice. One such source could be an original accelerator based source of epithermal neutrons, created in BINP. Generation of neutrons is carried out as a result of the threshold reaction ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ at 2.3 MeV protons. To obtain 5 mA proton beam a new type of particle accelerator is used – tandem accelerator with vacuum insulation. The obtained neutron beam meets the requirements of BNCT: the irradiation of cell cultures the destruction of cells with boron and preservation of cells without boron is provided. Irradiation of immunodeficient mice with vaccinated glioblastoma results in their recovery. The report describes in detail the modernization of the accelerator, presents and discusses the results of experiments on obtaining the proton beam and the formation of neutron flux using lithium target and beam shaping assembly, on *in vitro* and *in vivo* investigations, and declares our prospective plans.

5-33

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА О ЗАПОЛНЕНИИ ГАЗАМИ ПОЛИКАРБОНАТНОЙ КОНСТРУКЦИИ, ИМИТИРУЮЩЕЙ ПОМЕЩЕНИЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА НА АЭС С ВВЭР

Ю. А. Томилов, Е. М. Щенникова, Е. В. Безгодов

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

E-mail: tomilovua@VNIITF.ru

При тяжелой аварии на атомной электрической станции (АЭС) с ВВЭР последним барьером на пути распространения радиоактивности является защитная оболочка (ЗО). Наличие взрывоопасной водородовоздушной смеси в помещениях ЗО создает серьезную угрозу его целостности. Поэтому недопущение

образования взрывоопасной смеси и всестороннее изучение процессов, происходящих во время тяжелой аварии (ТА), является актуальной задачей. Такие исследования позволят улучшить конструкцию АЭС и выработать меры по управлению аварией, что повысит безопасность станции [1].

В 2015–2016 гг. в РФЯЦ – ВНИИТФ были проведены эксперименты, направленные на исследование процессов стратификации и горения водородосодержащих парогазовых смесей (ВПГС) в разрушаемых макетах [2]. В экспериментах имитируется заполнение газами помещения парогенератора (ПГ) на АЭС с ВВЭР при сценарии ТА с разрывом главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ). Макет помещения представляет собой параллелепипед с круглым отверстием снизу. Его стенки выполнены из поликарбоната. В течение определенного времени через небольшую трубку последовательно подают водяной пар и водород. После подачи газов смесь выдерживают, затем производится отбор проб и определяется состав смеси по высоте помещения. Поликарбонат деформируется при высокой температуре, что обуславливает возникновение щелей. В части экспериментов наблюдалась утечка газов, что ухудшало интерпретацию результатов, а также их расчетный анализ.

С помощью CFD-методики проведено численное моделирование процесса заполнения газами модели поликарбонатной установки. Были получены распределения газов по высоте модели, зависимости температуры и относительной влажности в точках расположения экспериментальных измерительных методик. Целью проведения численного моделирования на первом этапе был поиск наиболее подходящей модели турбулентности и выбор граничного условия для максимального соответствия результатов расчета с данными экспериментов в отсутствие утечек. На втором этапе с найденными оптимальными параметрами осуществлялся поиск эффективной площади щелей, при которой результаты эксперимента с дефектами в конструкции совпадали с расчетными.

Полученные результаты позволяют оценить размеры образованных в установке щелей во время эксперимента. В дальнейшем, это позволит включить эксперименты с утечкой газов в матрицу валидации CFD-кодов.

Литература

1. С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, В.Ф. Украинцев. АЭС с реактором типа ВВЭР–1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. / – М.: Логос, 2010.
2. Е.В. Безгодков, И.В. Лавренюк, И.А. Доровских и др., Результаты экспериментальных исследований процессов стратификации и горения ВПГС в разрушаемых макетах, Научная сессия НИЯУ-МИФИ-2016. Сборник научных трудов. Заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии. Технология замыканий ядерного топливного цикла и водородная безопасность». 5–6 мая 2016 г., Снежинск. М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2016.

NUMERICAL SIMULATION OF EXPERIMENT OF GAS FILLING OF POLYCARBONATE CONSTRUCTION THAT SIMULATES ROOM OF THE STEAM GENERATOR AT THE NPP WITH WWER

U. A. Tomilov, E. M. Shchennikova, E. V. Bezgodov

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

tomilovua@VNIITF.ru

In severe accident (SA) at the nuclear power plants (NPP) with WWER the last barrier to the spread of radioactivity is a containment shell. The explosive hydrogen-air mixture creates danger to integrity of containment rooms. Therefore, the appearance of an explosive mixture should not be allowed. Comprehensively research of this processes that occur in the SA is an urgent task. Such research will be allowed to improve the design of NPP and develop measures for management of accident. This should be advance the safety of NPP [1].

In the years 2015–2016 in the RFNC–VNIITF was carried out experimental research of stratification and combustion processes of hydrogen-containing vapor-gas mixture in destroyed prototypes [2]. The experiments simulated gas filling of the steam generator room at the NPP with WWER in SA with rupture of the main circulation piping. Prototype is parallelepiped with a round hole at the bottom. Its walls are made from polycarbonate. For some time water vapor and hydrogen is sequentially supplied through the small tube. After that the gas mixture is kept. Then it sampled, and the mixture composition is determined by the height of the room. Polycarbonate is deformed because of high temperature heating. It causes crevices. Some part of the experiments had a gas leak. This deteriorated interpretation of the results and their calculation analysis.

The numerical simulation of gas filling of the polycarbonate installation model was carrying out with the CFD-method. In the experimental points there were gases distribution at the height model, temperature dependences and relative humidity dependences. At the first stage the purpose of the numerical simulation was to find a suitable turbulence model and choice the boundary conditions for optimal accordance between the calculation results and the experimental data without leaks. There was the search of effective area of the crevices at the second stage with the found optimum parameters in which the experimental results with defects in the construction agreed with calculations.

Finding results allow us to estimate the size of the crevices in the prototype. Further, these experiments with the gas leak can be included in a validation matrix of CFD-codes.

References

1. S. A. Andrushechko, A. M. Afrov, B. U. Vasilev, V. N. Generalov, K. B. Kosourov, U. M. Semcenkov, V. F. Ukrainev. NPP with WWER–1000. From the basic physics of operation to the evolution of project / – М.: Logos, 2010.

2. E. V. Bezgodov, I. V. Lavrenyuk, I. A. Dorovskih et al., Experimental results of stratification and combustion processes of hydrogen-containing vapor-gas mixtures in destroyed prototypes. Scientific session NRNU MEPhI-2016. Collection of scientific papers. Meeting of thematic sections in the direction of «Innovative nuclear technology. Technology for closing nuclear fuel cycle, and hydrogen safety». May 5–6, 2016, Snezhinsk [in Russian].

5-34

**СИСТЕМА IThMC МК-МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ:
ВЕРИФИКАЦИЯ УЧЕТА ЯДЕРНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ
ОБ ОБЛАСТИ ГАЛО ПУЧКА**

В. О. Карпунин¹, В. И. Костюченко¹,
С. И. Самарин², А. С. Углов²

¹НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ ГНЦ РФ – Институт
Экспериментальной и Теоретической Физики (ИТЭФ),
Москва, Россия

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

E-mail: a.s.uglov@vniitf.ru

Работа посвящена исследованию вклада заряженных вторичных частиц, возникающих при торможении узкого протонного пучка в воде, в величину поглощенной дозы в пространственной области гало пучка – области малых доз, окружающей центральное ядро пучка, которое формируется за счет ядерных взаимодействий. Для этих целей используется программа моделирования Монте Карло (МК) IThMC, разработанная специально для целей протонной терапии. Результаты сравниваются как с экспериментальными данными, так и с расчетами, произведенными с помощью программы МК TOPAS, использующей физические модели пакета GEANT 4.

Результаты верификации программы IThMC с помощью экспериментальных данных показывают, что данная программа может с успехом использоваться для дозиметрических расчетов на протонных пучках, использующих активное сканирование.

**PROTON THERAPY ORIENTED IThMC SYSTEM
FOR MC CALCULATIONS: VERIFICATION
OF NUCLEAR INTERACTION
AGAINST HALO DATA**

V. O. Karpunin¹, V. I. Kostjuchenko¹,
S. I. Samarin², A. S. Uglov²

¹NRC «Kurchatov Institute» FSBI SSC RF – Institute for
Theoretical and Experimental Physics (ITEP), Proton Therapy,
Moscow, Russia

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

E-mail: a.s.uglov@vniitf.ru

The paper investigates how the secondary charged particles, which are produced when a pencil proton beam is being stopped in water, contribute to absorbed doses in the halo region – the region of small doses around the beam core formed due to nuclear interaction. Calculations are done with the Monte Carlo code IThMC developed specially for proton therapy purposes. Results are compared both with experimental data and with calculations by the MC code TOPAS which uses the GEANT-4 physical models.

IThMC verification against experimental data suggests that the code can successfully be used for dose calculations in proton therapy with pencil beam active scanning.

5-35

**НЕКОТОРЫЕ ВАРИАНТЫ ОРГАНИЗАЦИИ
ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ЯДЕРНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ**

У. Ф. Шереметьева, Н. Д. Дырда, Д. Г. Модестов,
И. Р. Макеева, В. А. Симоненко

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

E-mail: u.f.sheremetyeva@vniitf.ru

В настоящее время в России рассматриваются различные программы развития ядерной энергетики. Существуют стратегии, основанные на многолетнем опыте эксплуатации реакторов на тепловых нейтронах и перспективных проектах реакторах на быстрых нейтронах. Такая двухкомпонентная ядерная энергетика позволяет использовать избыточный плутоний, нарабатываемый в реакторах на быстрых нейтронах, в качестве топлива для реакторов на тепловых нейтронах. При этом появляется возможность частично уменьшить, а в перспективе и полностью отказаться от технологии обогащения урана.

Целью данной работы была оценка оптимального соотношения тепловых и быстрых реакторов в двухкомпонентной системе ядерной энергетики, в условиях

замыкания (частичного замыкания) ядерного топливного цикла, а также решение проблемы эффективного использования ресурсов.

Рассмотрена модельная система из тепловых реакторов под давлением типа ВВЭР-1000 и быстрых реакторов с натриевым теплоносителем типа БН-1200. В качестве топлива реакторов на тепловых и быстрых нейтронах использовались смеси оксидов урана и плутония. Массовая доля и изотопный состав плутония варьировался в зависимости от типа реакторной установки.

Расчет нейтронно-физических характеристик быстрых и тепловых реакторов проводится с помощью методов Монте-Карло с использованием программного комплекса ПРИЗМА [1], разработанного в РФЯЦ – ВНИИТФ. Исследование эволюции нуклидного состава проводилось с помощью программного комплекса РИСК [2], разработанного в РФЯЦ – ВНИИТФ. Для рассмотрения задач, связанных с моделированием сценариев развития ядерной энергетики, использовался математический моделирующий комплекс АТЭК [3], созданный в РФЯЦ – ВНИИТФ.

Литература

1. Зацепин, О.В. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000. / О.В. Зацепин, Я.З. Кандиев, Е.А. Кашаева и др. // ВАНТ, сер. «Физика ядерных реакторов». – 2011. – Вып. 4. – С. 64–74.
2. Модестов, Д.Г. Программа решения задач ядерной кинетики РИСК-2014/ Д.Г. Модестов. – Препринт РФЯЦ – ВНИИТФ. – № 243. – Снежинск, 2014. – 70 с.
3. Комплекс АТЭК для моделирования технологий ядерного энергетического комплекса / И.Р. Макеева, В.А. Симоненко, В. П. Соколов // Радиохимические технологии: тезисы 7-ой Российской конференции по радиохимии «Радиохимия 2012». – М.: 2012. – С. 160.

SOME OPTIONS OF TWO-COMPONENT NUCLEAR POWER SYSTEM ORGANIZATION

U. F. Sheremetyeva, N. D. Dyrda, D. G. Modestov,
I. R. Makeeva, V. A. Simonenko

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

E-mail: u.f.sheremetyeva@vniitf.ru

Various development programs are considered in the Russian nuclear power industry at present. There are strategies based on experience in the long-term operation of thermal reactors and perspective projects of fast reactors. This two-component nuclear power system allows excess plutonium produced in fast breeder reactors to be used as fuel for thermal reactors. In this case it is possible to partially reduce or completely abandon uranium enrichment technology necessary for production of modern thermal reactors fuel, thereby additionally reducing the risk of proliferation.

The aim of this study is to assess the optimum ratio of thermal and fast reactors in a two-component nuclear

power system, under a condition of closure (partial closure) of nuclear fuel cycle, as well as to solve the problem of resource efficiency.

The modeling system of thermal pressurized water reactors similar to VVER-1000 and fast reactors with sodium coolant similar to BN-1200 is considered. A mixture of uranium and plutonium oxides was used as a fuel for thermal and fast reactors. The mass fraction and isotopic composition of plutonium varied depending on the type of the reactor facility.

Neutron-physical characteristics of the fast and thermal reactors were calculated applying the software package PRIZMA [1] developed at VNIITF, which uses the Monte Carlo method. A study of the evolution of the nuclide composition was conducted using the software package RISK [2] developed at VNIITF. The mathematical modeling complex ATEK developed at VNIITF [3] was used for the consideration of problems connected with modeling of nuclear power development.

References

1. Zatsepin O.V., Kandiev Ya.Z., Kashaeva E.A., Malyshkin G. N. and Modestov D.G. 2011 «VANT. Serya: Physics of nuclear reactors» Calculations for the VVER-1000 Core by the Monte Carlo Method Implemented in the PRIZMA Code 4 pp. 64–74 [in Russian].
2. Modestov D.G. 2014 The program to solve problems of nuclear kinetics RISK-2014 Preprint №243 (Snezhinsk: RFNC–VNIITF) [in Russian].
3. Makeeva I.R., Dorovskikh I.A. et al 2012 Zababakhin scientific talks: proceedings of XI International conference April 16–20 2012 Study of expanded development of nuclear power engineering using ATEK code (Snezhinsk: RFNC–VNIITF), pp. 248–249 [in Russian].

5-36

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

О. В. Шульц

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

E-mail: O.V.Shults@VNIITF.ru

Расчет пределов воспламенения горючих смесей является актуальной задачей обеспечения пожаровзрывобезопасности. Задача расчета пределов воспламенения водородовоздушных смесей актуальна с одной стороны применительно к проблеме обеспечения водородной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами, с другой стороны – как методическая задача моделирования основных процессов, определяющих явление воспламенения.

В представленной работе построена модель процесса самовоспламенения водородо-воздушных смесей в приближении сосредоточенных параметров. Для

выяснения основных стадий процесса самовоспламенения, режимов его протекания и для определения основных химических реакций, вносящих наибольший вклад в скорость процесса, были выполнены серии расчетов. Результаты расчетов были проанализированы и предложена упрощенная модель, описывающая состояние системы перед воспламенением. Предложенная модель позволяет рассчитать концентрации активных частиц (радикалов) в системе и производимую тепловую мощность. По соотношению производимой тепловой мощности и теплоемкости системы рассчитывается скорость адиабатического разогрева. В рамках предложенной модели принято, что условием самовоспламенения является достижение определенного уровня скорости адиабатического разогрева.

С помощью предложенной модели были рассчитаны пределы самовоспламенения стехиометрической водород-кислородной смеси в зависимости от давления и температуры. Результаты расчетов были сопоставлены с доступными экспериментальными данными. В диапазоне давлений от 1 до 100 кПа было получено хорошее согласие расчёта с экспериментом.

CALCULATION OF HYDROGEN-AIR MIXTURES SELF IGNITION LIMITS

O. V. Shults

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

E-mail: O.V.Shults@VNIITF.ru

Calculation of combustible mixtures flammability limits is the topical problem of fire and explosion protection. Calculation of hydrogen-air mixtures flammability limits is a topical issue of NPP's with water-water reactors hydrogen accident prevention on the one hand and the methodical task of combustion phenomenon dominant processes modeling on the other hand.

The lumped parameter model of hydrogen-air mixtures self ignition process was developed in contributed paper. Series of calculations was made to find out main stages and modes of self ignition process and to determine dominant chemical reactions. Calculations results were analyzed and the simplified model describing a pre-combustion system state was suggested. Suggested model provides calculation of active particles concentrations and producing heat in a system. Adiabatic warm-up rate is calculated as the ratio of producing heat and system specific heat capacity. Achieving certain adiabatic warm-up rate was assumed within suggested model framework as the condition of self ignition.

Self ignition limits of stoichiometric hydrogen-oxygen mixture depending on initial temperature and pressure were calculated using suggested model. Calculation results were compared with available experimental data. In the range from 1 to 100 kPa was observed good consistency.

5-37

УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ПАРОВО-ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

О. В. Шульц, А. В. Ушков, В. Н. Федюшкин,
О. В. Валеева, Ю. Ф. Давлетчин, И. А. Доровских,
И. В. Лавренюк, М. В. Никульшин

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

E-mail: O.V.Shults@VNIITF.ru

В настоящее время для оценок возможности воспламенения водородсодержащих парогазовых смесей (ВПГС) используется диаграмма Шапиро–Моффетти, приведенная в работе 1957 г. [1] и построенная по данным работ [2, 3]. Кривая построена для атмосферного давления и соответствует температурам и составам на линии насыщения водяного пара в диапазоне 20–86°C. Для проектных расчетов данную кривую применяют во всем диапазоне давлений и температур, характерных для ТА. В то же время, опубликовано большое количество работ (например [1, 4, 5]), в которых приводятся зависимости пределов воспламенения ВПГС от давления и температуры.

С целью уточнения диаграммы Шапиро–Моффетти в области повышенных давлений и температур, характерных для ТА на АЭС с водо-водяным реактором, были выполнены экспериментальные исследования пределов воспламенения ВПГС. В рамках экспериментов исследовались составы водород-воздух и водород-воздух-водяной пар, при температурах от комнатной до +200°C и давлениях от атмосферного до 5 атм были получены экспериментальные точки, соответствующие значениям концентрационных пределов.

В результате сопоставления полученных экспериментальных данных с данными диаграммы Шапиро–Моффетти было показано хорошее согласие в области бедных водородом составов. В области богатых паром и богатых водородом составов наблюдается систематическое расхождение полученных экспериментальных данных и данных диаграммы Шапиро–Моффетти. В этих областях полученные пределы лежат внутри области горючих составов по диаграмме Шапиро–Моффетти. Такое расхождение может быть объяснено влиянием конфигурации испытательной камеры на получаемые значения пределов.

В экспериментах получены зависимости концентрационных пределов воспламенения смесей водород-воздух от давления и температуры. Характер зависимостей немонотонный. С учетом полученных экспериментальных данных, а также зависимостей, приведенных в литературе [1, 4], сделан вывод о том, что целесообразно вместо применения во всем диапазоне давлений и температур единственной кривой концентрационных пределов использовать поверхность концентрационных пределов, учитывающую зависимость пределов воспламенения от этих параметров.

Литература

1. Shapiro Z. M., Moffette R. T. Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident. WAPD-SC-545, Westinghouse Electric Corp., 1957.
2. Jesse S. Yeaw and Louis Shnidman – The Extinction of Gas Flames by Steam 1938
3. M. G. Zabetakis. Research on the combustion and explosion hazards of hydrogen-water vapor-air mixtures. Final report.
4. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. – Пер. с англ., М.: ИЛ, 1948.
5. H. Cheikhavat, N. Chaumeix, A. Bentaib, and C.E. Pillard – Flammability limits of hydrogen-air mixtures.

CONDITIONS OF HYDROGEN CONTAINING VAPOR-GAS MIXTURES COMBUSTION

O. V. Shults, A. V. Ushkov, V. N. Fedyushkin,
O. V. Valeyeva, Y. F. Davletchin, I. A. Dorovskikh,
I. V. Lavrenyuk, M. V. Nikulshin

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

E-mail: O.V.Shults@VNIITF.ru

Currently the Shapiro-Moffette diagram posted in a paper [1] published in 1957 and plotted using data from papers [2, 3] is used to estimate combustion possibility of hydrogen containing vapor-gas mixtures. The curve is plotted for normal atmosphere pressure and corresponds to temperatures in range 20–86°C and compositions on the water vapor saturation line. This curve is used for design study in a full range of pressures and temperatures corresponding to severe accident. At the same time there are many published papers [1, 4, 5] describing dependencies of flammability limits from pressure and temperature.

Series of combustion limits experimental researches were carried out with the purpose of Shapiro-Moffette diagram extension to the range of increased temperatures and pressures corresponding to severe accident on a NPP with water-water reactor. Hydrogen-air and hydrogen-air-water vapor compositions had been researched during experiments. Experimental points corresponding values of flammability limits were obtained in the temperature range from room to +200°C and in the pressure range from 1 to 5 atm.

Comparing obtained results and Shapiro-Moffette diagram data in the range of poor in hydrogen mixtures was shown good agreement. In the range of rich in hydrogen and rich in water vapor compositions was obtained systematical divergence between obtained experimental data and Shapiro-Moffette diagram data. Obtained flammability limits in this composition ranges are inside the flammability region according to Shapiro-Moffette diagram. This divergence can be explained by the test chamber configuration influence on obtaining limits values.

Hydrogen-air mixtures flammability limits dependencies on pressure and temperature was obtained during experiments. Obtained dependencies are nonmonotonic. Taking into account obtained data and

dependencies described in papers [1, 4, 5] was drawn a conclusion: using surface of flammability limits taking into account influences of pressure and temperature is appropriate instead of the application the only curve in a full range of pressures and temperatures.

References

1. Shapiro Z. M., Moffette R. T. Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident. WAPD-SC-545, Westinghouse Electric Corp., 1957.
2. Jesse S. Yeaw and Louis Shnidman – The Extinction of Gas Flames by Steam 1938
3. M. G. Zabetakis. Research on the combustion and explosion hazards of hydrogen-water vapor-air mixtures. Final report.
4. B. Lewis, G. von Elbe. Combustion, flames and explosions of gases. – second edition. Academic press inc. New York and London, 1961.
5. H. Cheikhavat, N. Chaumeix, A. Bentaib, and C.E. Pillard - Flammability limits of hydrogen-air mixtures.

5-38

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ИСТОЧНИКЕ НАКАЛИВАНИЯ

Е. М. Щенникова, Ю. А. Томилов

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

E-mail: u.f.sheremetyeva@vniitf.ru

При проектировании атомных электростанций вопросы безопасности являются приоритетными. Один из аспектов – это водородная безопасность. Так, изучение условий воспламенения водородосодержащей парогазовой смеси (ВПГС), которое может возникнуть при тяжелой аварии, является актуальной задачей.

На основании экспериментальных исследований [1] пределов воспламенения ВПГС на установке комплекса для экспериментальных исследований пожаровзрывоопасности газовых сред (КЭИП) было проведено численное моделирование воспламенения при стационарном источнике накаливания, в качестве которого использовалась нихромовая проволока, намотанная в виде спирали на цилиндр из керамического диоксида циркония, внутри которого расположен латунный стержень. Воспламенение от стационарного источника представляет интерес ввиду низкой скорости процесса нагрева.

В эксперименте происходил разогрев предварительно перемешанной смеси водорода, пара и воздуха при атмосферном давлении. При моделировании воспламенения от нити накаливания рассматривались распределения температур, концентраций компонентов и продуктов реакции, скоростей газа в процессе

разогрева и после воспламенения для выявления предпосылок возгорания в камерах с подобной геометрией.

При моделировании был воссоздан внутренний объем камеры КЭИП, заполненной газовой смесью, а также нагревательный элемент. Сетка модели состоит из 6 миллионов шестигранных ячеек. Задача нестационарная. Тепловая энергия, выделяемая спиралью, уносится с излучением, конвекцией газа, теплопроводностью, диффузией и рассеивается с вязким трением, что учитывалось при создании модели. Для моделирования турбулентного течения была использована $k-\epsilon$ модель турбулентности. Горение водорода в воздухе задавалось с помощью 19 обратимых реакций.

Нагреваясь вблизи источника, газ будет подниматься вверх и, охлаждаясь у крышки, опускаться вниз. Таким образом, в камере установится естественная циркуляция. Вблизи цилиндра температуры и скорости будут максимальны, в результате чего установится характерное распределение, которое определит дальнейшее распространение пламени.

Для подтверждения правильности расчетов в докладе представлено сравнение с результатами экспериментов. Они показывают хорошее соответствие. Так, расчетный характер изменения температуры и давления в камере оказался схож с экспериментальным, и время воспламенения также хорошо соотносится с измеренным значением времени возгорания. Наличие погрешности в расчете обусловлено сложностью полного детального моделирования процессов воспламенения и горения и связанных с этим ограниченных возможностей расчетного кода.

Исследования по воспламенению ВПГС могут быть использованы для развития теоретических моделей воспламенения и горения, что, в конечном счете, позволит повысить безопасность АЭС.

Литература

1. Шульц О.В., Ушаков А.В., Федюшкин В.Н. и др., Расчетно-экспериментальное исследование критериев воспламенения водородосодержащих паро-газовых смесей. Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2016. Сборник научных трудов. Заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии. Технологии замыкания ядерного топливного цикла и водородная безопасность». 5-6 мая 2016 г., Снежинск. М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2016.

SIMULATION OF THE IGNITION OF HYDROGEN CONTAINING VAPOR-GAS MIXTURES BY A STATIONARY SOURCE OF HEATING

E. M. Shchennikova, Yu. A. Tomilov

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

E-mail: u.f.sheremetyeva@vniitf.ru

In the design of nuclear power plants (NPP) the safety issues has been a priority. One of aspects is hydrogen safety. So research the conditions of ignition the hydrogen-containing vapor-gas mixture (HVGМ), which can appear in a severe accident, is an urgent task.

On the basis of experimental researches of ignition limits [1] at the installation of complex for experimental researches of the fire-explosion hazard of gas environments (CERF) was carry out numerical simulation of ignition with a stationary source of heating. The source is a nichrome wire, which was coiled in the form of a spiral on an asbestos cylinder, inside of it locate a brass rod. The ignition by a stationary source is of interest because of the low rate of the heating process.

In the experiment the premixed mixture of hydrogen, steam and air was heated at the atmospheric pressure. In simulation of the ignition by a stationary source were considered the temperature distribution, components and products of the reaction concentrations, the gas velocity in the heating and after ignition to detect the preconditions of the ignition in a similar geometry chambers.

There was simulating of the internal volume of the CERF chamber, which was filled the gaseous mixture, and the heat element. The mesh of the model consists of a 6 million of hexahedral cells. This problem is unsteady. The thermal energy is released by the spiral, carried out by radiation, a gas convection, a heat conduction, a diffusion and scattered with a viscous friction that was taken into calculation. For modeling of turbulent flows was used $k-\epsilon$ turbulence model. The combustion of hydrogen in the air was set by a 19 reversible chemical reactions.

Heating near the source the gas will going up and cooling will going down. Thus, the gravity circulation is established in the chamber. The temperature and speed near the cylinder will be maximized, what established a typical distribution, which will be determining the further spread of flame.

The comparison with the results of the experiment confirms the correctness of the calculations in the report. It's show a good compatibility. So, the calculating behavior of thermal and pressure variations in the chamber were similar the experimental behavior, and the time of ignition is good conform with the measured value of ignition time too. Errors in calculation are caused by complication of the full and detailed modeling of an ignition and burning processes and also by limited possibilities of the CFD-code.

The research of the ignition of HVGМ may be used for the development of theoretical models of ignition and burning, ultimately that will enable to improving the safety of NPP.

References

1. Shults O.V., Ushakov A.V., Fedushkin V.N. at el., The experiment-calculated research of ignition limits the hydrogen-containing vapor-gas mixture. Scientific session NRNU MEPhI-2016. Collection of scientific papers. Meeting of thematic sections in the direction of «Innovative nuclear technology. Technology for closing nuclear fuel cycle, and hydrogen safety.» May 5–6, 2016, Snezhinsk [in Russian].

5-39

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРА ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ НА РАСПЫЛЕНИЕ УРАНОВЫХ СЛОЕВ

Г. В. Влох¹, С. В. Фролова¹, Д. А. Юнин²¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия²Саровский физико-технический институт –
филиал НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

E-mail: otd4@expd.vniief.ru

Для определения способов борьбы с распылением урановых слоев собственными осколками деления (ОД) во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) была разработана физическая модель эжекции урана [1], объясняющая основные механизмы эжекции и позволяющая проводить оценки интегральных и дифференциальных характеристик распыления в зависимости от толщины и дисперсности поверхности урана. Необходимо отметить, однако, что при расчетах использовался максимально упрощенный модельный спектр ОД на поверхности урана, полученный в предположении, что начальная энергия всех рождающихся ОД равна $E_0=100$ МэВ (однотипное приближение) [2].

Уточнение результатов может быть достигнуто, в частности, при использовании модельного спектра ОД, приближенного к реальности. В настоящей работе получен расчетный спектр ОД на поверхности уранового слоя в двухгрупповом приближении (рождающиеся в слое легкие и тяжелые ОД имеют начальные энергии соответственно: $E_{0л}=100$ МэВ и $E_{0т}=68$ МэВ) и проведен расчет интенсивности распыления урана по модели [1]. Сравнение интенсивностей распыления урана с использованием однотипного и двухгруппового спектров ОД показало, что во втором случае коэффициенты распыления для разных толщин уранового слоя уменьшаются по величине на ~20%.

Литература

1. Г. В. Влох, С. В. Фролова. Модельный вид функций, описывающих эжекцию при неупругом распылении урана собственными осколками деления. Труды IV международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». Обнинск, 2007. – т. 1, с. 375.
2. Г. В. Влох, С. В. Фролова. Влияние действующего спектра осколков и дисперсности поверхности на первичный коэффициент распыления урана. Расчет и эксперимент. Труды IV международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». Обнинск, 2007. – т. 1, с. 383.

EFFECT OF FISSION FRAGMENT SPECTRUM ON URANIUM LAYERS SPUTTERING

G. V. Vlokh¹, S. V. Frolova¹, D. A. Yunin²¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia²Sarov Physic and Technology Institute – NRNU MEPhi
branch, Sarov, Russia

E-mail: otd4@expd.vniief.ru

To determine the methods to control the sputtering of uranium layers by intrinsic fission fragments (FF) in All-Russia Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF) there was developed a physical model of uranium ejection [1] explaining basic ejection mechanisms and making it possible to estimate integral and differential characteristics of sputtering depending on thickness and dispersivity of uranium surface. It should be mentioned, however, that in the calculations there was used the maximum simplified model spectrum of fission fragments on the uranium surface obtained with the assumption that the initial energy of all occurring FF is $E_0=100$ MeV (one-group approximation) [2].

The results can be ascertained specifically when the model of FF spectrum close to the real one is used. The given paper presents the obtained calculated spectrum of FF on the surface of uranium layer in a two-group approximation (the initial energies of light and heavy FF occurred in the layer are correspondingly the following: $E_{0L} = 100$ MeV and $E_{0H} = 68$ MeV). The calculation of uranium sputtering intensity is performed basing on model [1]. The comparison of the values of uranium sputtering intensity performed using of one-group and two-group spectra of FF demonstrated that in the second case the sputtering ratios for different thicknesses of uranium layer decrease by ~20%.

References

1. G. V. Vlokh, S. V. Frolova. Model view of functions describing ejection at inelastic sputtering of uranium by intrinsic fission fragment. Proc. IV Int. Conf. «Physics of nuclear pumped lasers and pulsed reactors». Obninsk, 2007. – v. 1, p. 375.
2. G. V. Vlokh, S. V. Frolova. Effect of active spectrum of fragments and surface dispersion on primary ratio of uranium sputtering. Calculation and experiment. Proc. IV Int. Conf. «Physics of nuclear pumped lasers and pulsed reactors». Obninsk, 2007. – v. 1, p. 383 [in Russian].

5-40

РАЗРАБОТКА ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА С УЗКОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА В ДИСПЕРСИОННОМ РЕАКТОРНОМ ТОПЛИВЕ

Г. В. Влох¹, С. В. Фролова¹, Д. А. Юнин²

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

²Саровский физико-технический институт –
филиал НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

E-mail: otd4@expd.vniief.ru

Для измерения распределения урана-235 (U^{235}) вдоль тонких уран-алюминиевых дисперсионных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) [1] во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) была создана информационно-измерительная система (ИИС) «Диагноз-3» [2]. Распределение урана в объеме ТВЭЛ определяется по интенсивности собственного γ -излучения U -235.

Геометрия измерений на ИИС «Диагноз-3» оптимизирована таким образом, чтобы получить минимальную погрешность измерений при исследовании тонких объектов. Однако возникла задача исследования более толстых дисперсионных уран-графитовых ТВЭЛов при измерении которых ИИС не обеспечивает достаточной точности.

Целью работы является разработка γ -спектрометра для измерения распределения урана в дисперсионных уран-графитовых ТВЭЛлах.

Актуальность работы заключается в том, что экспериментальная информация о распределении урана в реакторном топливе необходима для исследования и расчета активной зоны реактора.

Цель работы достигнута путем модернизации геометрии измерений ИИС, с использованием узконаправленного коллиматора Соллера. В ходе работы разработана расчетная модель измерений методом сдвоенного γ -спектрометра, определяющая эффективность регистрации γ -квантов в зависимости от геометрии измерений и позволяющая оценить методическую погрешность измерений. В частности, с помощью данной расчетной модели были оптимизированы параметры коллиматора Соллера для измерения толстых образцов. Данный коллиматор был изготовлен и смонтирован на ИИС. Экспериментально определены основные параметры γ -спектрометра. Проведены контрольные измерения распределения урана в модельных образцах дисперсионных ТВЭЛов на разработанном сдвоенном γ -спектрометре с узкой диаграммой направленности.

Результаты работы:

– создана расчетная модель измерений дисперсионных ТВЭЛов методом сдвоенного гамма-спектрометра, позволяющая оптимизировать геометрию измерений для достижения максимальной эффективности регистрации и точности измерений;

– разработан гамма-спектрометр с узкой диаграммой направленности для измерения распределения урана в дисперсионном реакторном топливе.

Литература

1. Воинов А. М., Влох Г. В., Воронцов С. В. и др. Труды конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». Обнинск. 2007. Т. 2. С. 488
2. Влох Г. В., Сельченков В. Л. Измерительная система «Диагноз-3» для определения характеристик энергосвободных элементов лазера с ядерной накачкой (ЛЯН). Труды II международной конференции «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой» – Арзамас-16, 1994. С. 69.

DEVELOPMENT OF GAMMA-SPECTROMETER WITH NARROW DIRECTIVITY DIAGRAM TO MEASURE URANIUM DISTRIBUTION IN DISPERSION REACTOR FUEL

G. V. Vlokh¹, S. V. Frolova¹, D. A. Yunin²

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

²Sarov Physic and Technology Institute – NRNU MEPhi
branch, Sarov, Russia

E-mail: otd4@expd.vniief.ru

To measure distribution of uranium-235 (U^{235}) along the thin uranium-aluminum dispersion fuel elements [1] in All-Russia Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF) there was created an information-measurement system «Diagnosis-3» [2]. The distribution of uranium in the fuel element bulk is determined via the intensity of intrinsic U^{235} γ -radiation.

The geometry of measurements on IMS «Diagnosis-3» is optimized in order to minimize measurement error is obtained at investigating thin objects. However, there appeared the task of investigating thicker dispersion of uranium-graphite fuel elements at which IMS measurements do not provide sufficient accuracy.

The goal is to develop a γ -spectrometer to measure uranium distribution in dispersion uranium-graphite fuel elements.

The urgency of the activity consists in the fact that the experimental information on uranium distribution in reactor fuel is required to investigate and to compute the reactor core.

The goal is achieved through the modification of IMS geometry of measurements using narrowly directed Soller collimator. In the course of activities there was developed a calculation model of measurements with the use coupled γ -spectrometer which determines the efficiency of γ -quanta registration depending on the geometry of measurements and makes it possible to estimate the method accuracy. Specifically aiding of this calculation model there were optimized the parameters of Soller collimator to measure thick samples. The collimator was produced and assembled on IMS. The basic parameters of the γ -spectrometer were determined experimentally. Control

measurements of uranium distribution in model specimens of dispersion fuel elements were performed using coupled γ -spectrometer with narrow directivity diagram.

The Results include:

- the calculation model for measuring dispersion fuel elements using a method of coupled gamma-spectrometer is created; it makes it possible to optimize the geometry of measurements to achieve maximal registration efficiency and accuracy of measurements;
- the gamma-spectrometer with narrow directivity diagram is developed to measure distribution of uranium in dispersion reactor fuel .

References

1. A. M. Voinov, G.V. Vlokh, S. V. Vorontsov et al. Proc Conf. «Physics of nuclear-pumped lasers and pulsed reactors». Obninsk. 2007. V. 2. P. 488 [in Russian].
 2. G. V. Vlokh, V.L. Sel'chenkov. Measurement system «Diagnosis-3» to determine characteristics of energy-release elements of nuclear pumped lasers (NPL). Proc. II Int. Conf. «Physics of nuclear-excited plasma and problems of nuclear-pumped lasers» – Arzamas-16, 1994. P. 69 [in Russian].
-

Секция 6

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ,
ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ**

Section 6

**NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS,
CODES AND ACCURATE SOLUTIONS**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРАТЕГИИ
ВЕРИФИКАЦИИ И ВАЛИДАЦИИ LAD2D
ДЛЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ
ЖИДКОСТИ**

Ван Жуйли, Юй Хун, Линь Чжун, Линь Вэньжоу

Институт прикладной физики и вычислительной
математики, Пекин, КНР

E-mail: Wang_ruili@iapcm.ac.cn

В течение последних трех-четырех десятков лет начинает приобретать все большее значение численное моделирование физических процессов в плане научного исследования, а также анализа и проектирования технических систем. Особенно это относится к научной проблеме, когда ее трудно объяснить с помощью математических моделей; физический эксперимент невозможно воспроизвести либо слишком велики затраты, необходимые для проверки технических и промышленных изделий. Численное моделирование способствует пониманию и решению подобной сложной проблемы в условиях реальной ситуации, всего процесса, полного времени и пространства и воспроизводимости. Но надежность программных средств численного моделирования, а также корректная работоспособность результата моделирования представляют серьезное препятствие для расширения, применения и самовосстановления программных средств моделирования, ограничивая возможность независимого обновления. Поэтому разработка программных средств моделирования высокой надежности является конечной целью научного исследования. Верификация и валидация, а также оценка неопределенностей (V&V&UQ) представляет собой важный или единственный подход в разработке программных средств моделирования высокой надежности. С помощью рациональной и эффективной стратегии V&V можно достичь удвоенного результата, затратив в два раза меньше усилий. В данной работе представлен лагранжев адаптированный код гидродинамики в 2D пространстве (LAD2D), представляющий самостоятельное исследование и разработку. Представлена V&V стратегия LAD2D для детонационной динамики жидкости, в том числе базовая основа LAD2D, методы верификации на основе математической теории и программной функции, а также методы решений для промышленного изготовления и контрольные методы на основе иерархической валидации физической модели. Наконец, предложены перспективы в области программных средств численного моделирования для детонационной динамики жидкости с учетом научной проблемы и области исследования V&V&UQ.

Ключевые слова: детонационная динамика жидкости, LAD2D, стратегия верификация и валидация (V&V), стратегия

**RESEARCH ON VERIFICATION
AND VALIDATION STRATEGY OF LAD2D
FOR DETONATION FLUID DYNAMICS**

Wang Ruili, Yu Hong, Lin Zhong and Lin Wenzhou

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics,
Beijing 100094, P.R. China

E-mail: Wang_ruili@iapcm.ac.cn

During the last three or four decades, numerical simulations of physical processes is playing increasingly important in scientific research and in the analysis and design of engineered systems. Especially for the scientific problem which is difficult to explain by the mathematical models, the physical experiment is not repeatable, or the cost required to accredit the reliability of the engineering and industrial products is very expensive. Numerical simulation can understand and solve this complex problem in the real situation, whole process, whole time and space, and repeatability. But the reliability of numerical simulation software and the serviceability of the simulation result seriously hinder the extension, application and the self-restoration of the simulation software, restrict the independent innovational ability. So developing the higher credibility simulation software is the ultimate goal of scientific research. Verification and validation and uncertainty quantification (V&V&UQ) is an important or the solely approach in developing the higher credibility simulation software. Reasonable and efficient V&V strategy can achieve twice the result with half the effort. This article introduces the Lagrangian adaptive hydrodynamics code in 2D space (LAD2D), which is independent research and development. The V&V strategy of LAD2D for detonation fluid dynamics was presents. Including the basic framework of LAD2D, the verification methods based on the mathematical theory and the software function as well as the methods of manufactured solutions, and the validation methods based on the hierarchal validation of physical model. At last, we propose the future prospect of numerical simulation software for detonation fluid dynamics also pay attention to the scientific problem and the research area of V&V&UQ.

Keywords: detonation fluid dynamics, LAD2D, verification and validation (V&V), strategy

6-2

**МЕТОДИКА ИЗМЕНЕНИЯ СВЯЗНОСТИ
ДЛЯ СЕТКИ С БОЛЬШОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ
ДЛЯ ЛАГРАНЖЕВА МЕТОДА
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

Юй Хун, Ван Жуйли, Линь Чжун, Линь Вэньчжоу

Институт прикладной физики и вычислительной
математики, Пекин, КНР

E-mail: Yu_hong@iapcm.ac.cn, yuhong9s@sina.com

Задачи большой деформации в дифференциальных уравнениях нелинейной механики жидкостей при взаимодействии нескольких материалов и сильно связанных физических процессов обычно решаются методом лагранжева численного моделирования. Лагранжевы гидрокоды представляют собой главный инструмент моделирования в детонационном упруго-пластическом течении с участием нескольких материалов в условиях высокой температуры и высокого давления, перемещения расчетной сетки с текучей средой, преимуществом чего является динамическая система простой формы и возможность ясного задания границы раздела различных текучих сред, что представляет трудности в случае Эйлера метода. Но при условии высокой температуры и высокого давления текучие среды претерпевают сильные изменения; когда это происходит, лагранжева сетка деформируется, спутывается и даже перекрещивается, что снижает точность дискретной схемы на основе сетки, препятствует отражению реального перемещения текучих сред, и вычисление прекращается. Следовательно, анализ большой деформации представляет собой сложность, а также проблема состоит в том, чтобы сфокусироваться в лагранжевом методе и в переднем поле в вычислительной гидродинамике. В данной работе представлен новый подход интерпретации сетки с большой деформацией с помощью лагранжевых методов в рамках метода конечных объемов. Доказано, что с помощью классического лагранжева метода оказалось трудно справиться с большой деформацией при отслеживании частиц материала вследствие значительного искажения сетки; и изменение связности сетки представляется особенно перспективным для решения подобных проблем. Сетка с большой деформацией на основе вычислительной геометрии оптимизируется путем использования нового метода. В работе представлена разработка системы обработки для произвольной многоугольной неструктурированной сетки, для улучшения качества сетки в процессе вычислений используется методика изменения связности для сетки с большой деформацией. Новый метод применяется для моделирования таких задач большой деформации в условиях детонационной динамики жидкости, как пространство между сборкой материала, сегментация или разрушение области материала, образование вихря в поле течения и так далее. Рабочие характе-

ристики нового метода продемонстрированы на ряде численных примеров, а возможность моделирования эффективно представлена на примере обработки систем с большими деформациями.

Ключевые слова: лагранжевы методы, большие деформации, методика изменения связности сетки, метод конечных объемов

**THE TECHNIQUE OF CHANGING
CONNECTIVITY WITH LARGE DEFORMATION
MESH FOR LAGRANGIAN METHOD
AND ITS APPLICATION**

Yu Hong, Wang Ruili, Lin Zhong and Lin Wenzhou

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics,
Beijing 100094, P.R. China

E-mail: Yu_hong@iapcm.ac.cn or yuhong9s@sina.com

The problems of large deformation in nonlinear fluid mechanics differential equations with multi-material interaction and strongly coupled physical processes are usually solved by the Lagrangian numerical simulation method. Lagrangian Hydrocodes is the main simulation tool in detonation-elastic-plastic multi-material flow of high temperature and high pressure, its computational grid move with the fluids, the advantage is that it has simple form for the dynamic system, and can prescribe the interface of different fluid clearly, this is difficult for Eulerian method. But with the presentation of high temperature and high pressure, the fluids evolve violently, when this happens, the Lagrangian grid will deform, tangle and even cross, this will reduce the accuracy of the discrete scheme based on the grid, makes the result can not reflect the reality of the movement of fluids, and the computation will run termination. Therefore, to resolve the large deformation is one difficulty and the focus in Lagrangian methods, and also the front field in CFD at present. In this paper, A new approach for treating the large deformation mesh with Lagrangian methods of finite volume method is presented. It has been proved that classical Lagrangian method was difficult to cope with large deformation in tracking material particles due to severe distortion of meshes, and the changing connectivity of the mesh seems especially attractive for solving such issues. The mesh with large deformation based on computational geometry is optimized by using new method. The paper have developed a processing system for arbitrary polygonal unstructured grid, the technique of changing connectivity with large deformation mesh is utilized to improve the quality of mesh in calculation process. The new method is applied to the simulation of the large deformation problem of the detonation fluid dynamics, such as the gap between material assembly, the segmentation or fracture with material area, the formation of vortex in the flow field and so on. The performance of the new method is demonstrated through series of numerical examples, and the simulation capability is efficiently presented in coping with the systems with large deformations.

Key words: Lagrangian methods, large deformations, the technique of changing connectivity of mesh, finite volume method

6-3

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК
ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА
ОТ СКОРОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОДУВА**

Л. В. Абдубакова, Р. Е. Волков, А. Г. Обухов

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

E-mail: ablili@mail.ru, email@romanvolkov.ru,
aobukhov@tsogu.ru

Способ инициирования восходящего закрученного потока воздуха с помощью вертикального продува в трубе был предложен в работах [1, 2], в которых было математически и численно смоделировано возникновение, и развитие восходящего закрученного потока именно с использованием вертикального продува воздуха. Предложенный способ инициирования восходящего закрученного потока воздуха был успешно реализован в лабораторных условиях [3, 4]. В последних работах были описаны эксперименты по получению восходящих закрученных потоков воздуха при продуве через трубу малого и большого диаметров. В данной работе приводится способ распараллеливания вычислительного алгоритма для численного решения полной системы уравнений Навье–Стокса и проведения численных расчетов по детальному исследованию зависимости всех газодинамических характеристик восходящего закрученного потока от скорости вертикального продува воздуха в вертикальной трубе при проведении упомянутого масштабного натурального эксперимента.

Численное построение решений полной системы уравнений Навье–Стокса, описывающей трехмерные течения сжимаемого вязкого теплопроводного газа в условиях действия сил тяжести и Кориолиса накладывает существенные ограничения на проведение численных экспериментов по детальному изучению возникающих сложных течений газа. Необходимость учета диссипативных свойств вязкости и теплопроводности движущейся сплошной среды, даже при постоянных коэффициентах вязкости и теплопроводности, связано со значительным усложнением системы уравнений, ограничениями на величины расчетных шагов по пространству и времени, возрастанием общего времени счета.

Одним из возможных способов сокращения времени расчета может быть изменение алгоритма численного решения полной системы уравнений Навье–Стокса. В частности, распараллеливание вычислительной процедуры для более эффективного использования ресурсов вычислительной системы.

Благодаря предложенной методике распараллеливания алгоритма при численном решении полной системы уравнений Навье–Стокса в данной работе проведен обширный численный эксперимент по изучению зависимости газодинамических характеристик восходящего закрученного потока от скорости вертикального продува.

Из расчетов следует, что все термодинамические характеристики с ростом скорости продува нелинейно уменьшаются по степенной зависимости, а скоростные и энергетические характеристики нелинейно возрастают (кроме вертикальной составляющей скорости). Подобные зависимости имеют принципиальное значение для формулирования конкретных предложений для проведения масштабного натурального эксперимента по созданию восходящего закрученного потока, инициированного вертикальным продувом газа.

Исследования поддержаны Министерством образования и науки РФ (проект № 3023).

Литература

1. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. Численный расчет скоростных характеристик трехмерного восходящего закрученного потока газа // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. № 3. – С. 88–94.
2. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. Численный расчет термодинамических параметров закрученного потока газа, инициированного холодным вертикальным продувом // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. № 5. – С. 57–62.
3. Баутин С. П., Баутин К. В., Макаров В. Н. Экспериментальное подтверждение возможности создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса // Вестник УрГУПС. – 2013. № 2(18). – С. 27–33.
4. Баутин С.П., Макаров В.В. Создание потока воздуха, закрученного силой Кориолиса при использовании трубы двухметрового диаметра // Вестник УрГУПС. – 2016. № 4(32). – С. 39–45.

**NUMERICAL INVESTIGATION OF
DEPENDENCE RISING CHARACTERISTICS
SWIRLING FLOW VERTICAL SPEED BLOWING**

L. V. Abdubakova, R. E. Volkov, A. G. Obukhov

Tyumen State University, Tyumen, Russia
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

E-mail: ablili@mail.ru, email@romanvolkov.ru,
aobukhov@tsogu.ru

The process of initiating the upward swirling air flow with a vertical blowing in the pipe has been proposed in [1, 2], in which it was mathematically and numerically modeled the emergence and development of the rising swirling stream it using the vertical blowing air. The proposed method of initiation of the upward swirling air flow has been successfully implemented in the laboratory [3, 4]. In recent studies, experiments were described to obtain the rising swirling air flow through the tube when blown into the potash small and large diameters. In this

paperwe present a method of parallelization of computational algorithm for the numerical solution of the full Navier–Stokes equations and numerical calculations for a detailed study of the dependence of all gas-dynamic characteristics of the ascending swirling flow from the speed of the vertical air blowing in a vertical tube during the said large-scale natural experiment.

Numerical construction of complete system solutions of the Navier–Stokes equations describing the three-dimensional flow of a compressible viscous heat-conducting gas under the action of gravity and Coriolis imposes substantial restrictions on the numerical experiments on a detailed study of a complicated gas flows. The need to consider the dissipative properties of viscosity and thermal conductivity of the moving continuum, even with constant coefficients of viscosity and thermal conductivity, associated with a significant complication of the system, constraints on the magnitude of the calculated steps in space and time, an increase in the total calculation time.

One of the possible ways to reduce the calculation time can be a change in the algorithm of numerical solution of the full Navier–Stokes equations. In particular, the parallelizing computational procedure to more efficiently use resources of the computing system. Due to the proposed method of parallelization of the algorithm for the numerical solution of the full Navier–Stokes equations in this work carried out extensive numerical experiment on the dependence of gas-dynamic characteristics of the ascending swirling flow from the speed of the vertical blow.

From calculations that all the thermodynamic characteristics with increasing blow-speed nonlinear decrease in the power dependence, and the speed and power characteristics of the nonlinear increase (except for the vertical component of velocity). Such dependence is crucial for the formulation of concrete proposals for large-scale field experiment to create the upward swirling flow initiated by a vertical gas-blowing.

Research supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project number 3023).

References

1. Abdubakova L. V., Obukhov A. G. Numerical calculation of three-dimensional velocity characteristics of the rising swirling flow of gas // Proceedings of the higher educational institutions. Oil and gas. – 2014. – № 3. – S. 88–94.
2. Abdubakova L. V., Obukhov A. G. The numerical calculation of the thermodynamic parameters of swirling gas flow initiated by blowing cold vertical // Proceedings of the universities. Oil and gas. – 2014. – № 5 – P. 57–62.
3. Bautin S. P., Bautin K. V., Makarov V. N. Experimental confirmation of the possibility of creating an air flow swirling Coriolis force // Herald USURT. – 2013. № 2 (18). – S. 27–33.
4. Bautin S. P., Makarov V. V. Creating a stream of air, swirling Coriolis force when using the two-meter diameter pipe // Herald USURT. – 2016. № 4 (32). – S. 39–45.

6-4

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОЛЬНЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗОВАННОГО АЛГОРИТМА ПОИСКА СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ И СОБСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА

Н. В. Юдина, А. В. Апороски, Н. Р. Садыков

Снежинский Физико-Технический Институт
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
«МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: n.r.sadykov@rambler.ru

При аппроксимации нестационарного уравнения Шрёдингера двухслойной разностной схемой с весами σ при $\sigma = 1$ реализован метод поиска собственных значений энергии и собственных волновых функций стационарных состояний в одномерных квантовых системах (планарный случай). Планарная структура в случае наноструктур в маффин-тин (muffin-tin) приближении реализуется в графене или нанолентах. Приводится сравнение результатов численного решения с аналитическими результатами решения уравнения Шрёдингера. Показано, что реализованный алгоритм представляет собой модифицированный метод обратных итераций со сдвигом (модифицированный метод Виландта). Этот алгоритм позволяет рассчитать параметры мод в случае двух и более потенциальных ям. Например, в случае двух ям процесс перекачка электрона из одной ямы в другую, который определяется интегралом перескока и интегралом перекрытия, можно рассмотреть как результат интерференции симметричной и антисимметричной мод (при проведении расчетов не нужно вычислять эти интегралы). Данная задача представляет интерес в периодических гетероструктурах, например, в каскадных лазерах.

В работе численно реализованный алгоритм поиска собственных значений и собственных функций на основе нестационарного уравнения Шрёдингера в наноструктурах с планарной геометрией может быть обобщен на цилиндрическую и сферическую геометрии. Цилиндрическая и сферическая геометрии реализуются в маффин-тин приближении в наноструктурах, как нанотрубки или карбиновые цепочки, фуллерены. Реализованную программу можно использовать для моделирования процессов в наноструктурах: применительно к гетероструктурам (например, в каскадных лазерах) и периодическим потенциальным полям данный алгоритм можно использовать для определения собственных значений и собственных функций симметричной и антисимметричной мод для системы из двух потенциальных ям; применительно к квантовым точкам рассмотреть задачу поиска собственных функций и собственных значений энергии для потенциальных полей с произвольным профилем (за счет взаимодействия электронов реализуется потенциальное поле с произвольным профилем, кото-

рые заведомо не имеют аналитических решений для мод) и т. д.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, математическое моделирование, уравнение Шрёдингера, собственных значения и собственные функции, двухслойная разностная схема, квантовая яма, гетероструктуры, маффин-тин, нанотрубки, карбиновые цепочки, фуллерены.

**CALCULATION OF PARAMETERS
OF ARBITRARY QUANTUM SYSTEMS BASED
ON THE SEARCHING EIGENVALUES
AND EIGENFUNCTIONS FOR THE
SCHRÖDINGER EQUATION ALGORITHM**

N. V. Yudina, A. V. Aporoski, N. R. Sadykov

Snezhinsk Physics and technology Institute National Research
Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia

E-mail: n.r.sadykov@rambler.ru

At the approximation of non-stationary Schrödinger equation by the two-level difference scheme with σ coefficients, at $\sigma = 1$, the method of searching eigenfunctions and eigenvalues of stationary states in one-dimensional systems (planar case) is realized. The planar structure in the case of muffin-tin approximation realizes in the graphene or nanoribbons. The comparison of numeric solution with the analytical results was shown. Also, we show that realized algorithm is the modified method of inverse iterations with the shift (modified Vilandt method). The algorithm let us calculate the modes parameters in the case of two or more potential wells. For example, in the case of two potential wells, the process of moving electron from one well to another, defined by hopping integral and overlap integral, one can review as result of symmetrical and anti-symmetrical modes interferences (there is no need to numerically calculate these integrals). The problem is of interest in periodical structures, for example, in cascade lasers.

The searching eigenvalues and eigenfunctions numeric algorithm can be generalized to the cylindrical and spherical geometry basing on the non-stationary Schrödinger equation in nanostructures. The cylindrical and spherical geometries realize in the muffin-tin approximation in such nanostructures as nanotubes or carbine chains, fullerenes. Realized program can be used for modeling the processes in nanostructures: for heterostructures (for example, in the cascade lasers), for the periodical potential wells the algorithm can be used for definition the eigenvalues and eigenfunctions of symmetrical and anti-symmetrical modes for the system of two potential wells; associated with quantum dots we can review the search problem of the eigenfunctions and eigenvalues of energies for the potential fields with an arbitrary profile (due to the electrons interaction, the potential field with arbitrary profiles is realized, which do not have the analytical solutions for mode) etc.

Key words: terahertz radiation, mathematical modeling, Schrödinger equation, eigenfunctions and

eigenvalues, two-level difference scheme, quantum well, heterostructures, muffin-tin, nanotubes, carbine chains, fullerenes.

6-5

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ
ЗАКРУЧЕННЫХ ВИХРЕЙ ПРИ УЧЕТЕ СИЛ
ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА**

Д. Д. Баранникова, А. Г. Обухов

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

E-mail: lusy_and_jam@mail.ru, aobukhov@tsogu.ru

В работе [1] по численному моделированию тепловых восходящих закрученных потоков была обнаружена одна особенность поведения движущегося потока газа, в начальные моменты формирования восходящего закрученного потока при локальном нагреве нижней плоскости расчетной области: на границе области нагрева возникают встречные потоки, имеющие противоположное направление закрутки. Это неизбежно приводит к возникновению в этой области нескольких локальных вихревых образований с противоположной направленностью вращения.

Наряду с торнадо и тропическими циклонами в природе наблюдаются [2] и так называемые огненные вихри, закрутка которых имеет противоположное указанному природным явлениям направлению: отрицательное в Северном полушарии и положительное в Южном полушарии. В работе [3] строго математически описано решение системы уравнений газовой динамики, передающее следующее свойство течений идеального газа: если в первоначально покоящемся в поле тяжести газе начиная с некоторого момента времени плавно нагревается поверхность находящегося в газе вертикального цилиндра ненулевого радиуса, то наряду с радиальным движением газа под действием силы Кориолиса возникает и закрутка газа, которой в исходном течении не было. Направление этой закрутки отрицательное в Северном полушарии и положительное в Южном – то есть противоположное направлению закрутки торнадо и тропических циклонов.

В экспериментах [4] удалось создать течения, близкие к наблюдаемым в природе огненным вихрям, причем без использования принудительной закрутки. В этой работе продемонстрирована принципиальная возможность физического моделирования свободных концентрированных огненных вихрей в лабораторных условиях без использования закручивающих устройств.

В настоящей работе численно смоделировано закрученное течение воздуха, возникающее при постепенном нагреве центральной, вертикально расположенной области газа в условиях действия сил тяжести и Кориолиса. Представляется, что такое численно

построенное течение в определенном смысле моделирует реальное течение, возникающее в соответствующем физическом эксперименте [4].

Численно строятся решения полной системы уравнений Навье–Стокса при постоянных коэффициентах вязкости и теплопроводности, которые с предложенными начальными и граничными условиями описывают сложные нестационарные трехмерные течения сжимаемого вязкого теплопроводного газа. С помощью явной разностной схемы выполнены расчеты всех газодинамических параметров – плотности, температуры, давления и трех компонент скорости частиц газа для различных моментов времени начальной стадии формирования потока воздуха. Построены мгновенные линии тока, соответствующие траекториям движения частиц в возникающем течении. Установлено отрицательное направление закрутки течения воздуха, возникающего при нагревании вертикальной цилиндрической области.

Литература

1. Обухов А. Г., Баранникова Д. Д. Особенности течения газа в начальной стадии формирования теплового восходящего закрученного потока // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. № 6. – С. 65.
2. Наливкин Д. В. Смерчи. М.: Наука, 1984. 112 с.
3. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. Закрутка огненного вихря при учете сил тяжести и Кориолиса // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 6. – С.961.
4. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н., Горбачев М. А. О возможной генерации огненных вихрей без использования принудительной закрутки // ДАН. – 2014. – Т. 456, № 2. – С.159.

NUMERICAL MODELING OF HEAT SWIRLING VORTICES IN ACCOUNTING GRAVITY AND CORIOLIS

D. D. Barannikova, A. G. Obukhov

Tyumen State University, Tyumen, Russia
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: lusy_and_jam@mail.ru , aobukhov@tsogu.ru

In [1] on the numerical modeling of heat rising swirling flows is one feature of the behavior of a moving stream of gas was detected in the initial stages of formation of the ascending swirling flow during the local heating the underside of the computational domain: on the border of the heating area having opposing streams having the opposite direction of the spin. This inevitably leads to the emergence in this area several local eddies with opposite directions of rotation.

Along with tornadoes and tropical cyclones occur in nature [2] and the so-called fire vortices, which spin is opposite to the direction of natural phenomena: negative in the northern hemisphere and positive in the Southern Hemisphere. In [3] they are mathematically described by the solution of the equations of gas dynamics, transmitting the following property of ideal gas: if originally

at rest in a gas gravity field from a certain moment of time gradually heated surface is in gas vertical cylinder non-zero radius, then along with the radial movement gas under the action of Coriolis force arises twist gas that was not in the original flow. The direction of this negative twist in the Northern Hemisphere and the Southern Hemisphere – that is, the opposite direction of the swirling tornadoes and tropical cyclones.

In experiments [4] managed to create a flow close to that observed in the nature of a fiery whirlwind, and without the use of a forced twist. This work demonstrated the fundamental possibility of free physical modeling of concentrated fire vortices in the laboratory without the use of swirl devices.

In this paper numerically simulated swirling air flow, which occurs when the gradual heating of the center, a vertical field of gas under the action of gravity and Coriolis. It seems that such a numerically built for, in a sense simulates real flow that occurs in the corresponding physical experiment [4].

Numerical solutions built a complete system of Navier–Stokes equations with constant coefficients of viscosity and thermal conductivity that the proposed initial and boundary conditions describe the complex unsteady three-dimensional flows of a compressible viscous heat-conducting gas. With the explicit difference scheme, calculations of gas-dynamic parameters – density, temperature, pressure, and the three components of the gas velocity of the particles at different times the initial stage of the formation of the air flow. Built instantaneous current lines corresponding to the trajectories of particle motion in the emerging flow. A negative spin direction of air flow, which occurs when heated vertical cylindrical domain.

Research supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project number 3023).

References

1. Obukhov A. G., Barannikova D. D. Features of gas flow in the initial stage of the heat of the rising swirling stream // Proceedings of the higher educational institutions. Oil and gas. – 2014. № 6. – S. 65.
2. Nalivkin D. V. Tornadoes. M.: Nauka, 1984. 112 p.
3. Bautin S. P., Krutova I. Y., Obukhov A. G. Twist fiery whirlwind, taking into account the forces of gravity and Coriolis // High Temperature. – 2015. – Т. 53, number 6. – S.961.
4. Varaksin A. Y., Romash M. E., Kopeytsev V. N. Gorbachev M. A. On the possible generation of fire without the use of forced vortex spins // DAN. – 2014. – Т. 456, number 2. – p. 159.

6-6

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СНАРЯДОВ
И АВИАДВИГАТЕЛЯ С БЕТОННЫМИ
ЗАЩИТНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ**

С. П. Батуев, П. А. Радченко, А. В. Радченко

Томский государственный архитектурно-строительный
университет, Томск, Россия
E-mail: spbatuev@gmail.com

Численно, методом конечных элементов исследуется разрушение бетонных конструкций при взаимодействии с различными типами снарядов и авиадвигателем. Моделирование проводится на основе авторского вычислительного комплекса EFES. В качестве бетонных конструкций рассматриваются защитные оболочки атомных станций и бетонные перекрытия подземных сооружений. В расчетах учитываются реальные схемы армирования, наличие взрывчатых веществ в снарядах. Исследованы схемы трещинообразования в бетонных конструкциях в зависимости от геометрических и кинематических условий взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-31-00125, проект № 16-38-00256) и гранта Президента РФ № МК-413.2017.1.

**NUMERICAL MODELLING INTERACTION OF
SHELLS AND THE AIRCRAFT ENGINE WITH
CONCRETE PROTECTIVE DESIGNS**

S. P. Batuev, P. A. Radchenko, A. V. Radchenko

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk,
Russia
E-mail: spbatuev@gmail.com

The numerical research destruction of concrete designs at interaction with various types of shells and an aircraft engine is conducted. Modeling is carried out on the basis of the author's computing code EFES. As concrete designs protective covers of nuclear power plants and concrete overlappings of underground constructions are considered. In calculations real schemes of reinforcing, availability of explosives in shells are considered. Schemes of development of destruction in concrete designs depending on geometrical and kinematic conditions of interaction are investigated.

The work has been conducted with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (project No.16-31-00125, project No.16-38-00256), and of the grant of the President of the Russian Federation No.МК-413.2017.1.

6-7

**ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОГО
ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ
ТЕРМОРЕЗИСТОРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ,
СВЯЗАННЫХ ПОСРЕДСТВОМ
КОНДЕНСАТОРНОЙ СВЯЗИ**

Р. Ю. Берегов, А. В. Мелких

Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
E-mail: sprutnew@gmail.com, melkikh2008@rambler.ru

Зададимся следующей задачей, пусть имеется система терморезисторных автогенераторов, связанных посредством конденсаторной связи, которая управляется некоторым источником тепла:

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= I_1 U_1 - T_1 + 1 + u \\ z_1 \frac{dI_1}{dt} &= U_1 - I_1 \exp\left(\frac{E_{g01}}{T_1}\right) \\ y_1 \frac{dU_1}{dt} + \alpha \frac{dU_2}{dt} &= I_{in1} - I_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{dt} &= I_2 U_2 - T_2 + 1 \\ z_2 \frac{dI_2}{dt} &= U_2 - I_2 \exp\left(\frac{E_{g02}}{T_2}\right) \\ y_2 \frac{dU_2}{dt} + \alpha \frac{dU_1}{dt} &= I_{in2} - I_2 \end{aligned}$$

$$J \xrightarrow{\min_{u \in R}} \int_0^T u^2(t) + (U_1(t) - U_2(t))^2 dt$$

$$0 \leq u \leq 3$$

где α – коэффициент емкостной связи, $u \in [0, 3]$ – «си» управление с ограничением.

Возьмем диапазон значений $\alpha \in (0, 4.5)$ (диапазон «отталкивания») тогда, существует ли оптимальное, с точки зрения затрат на управление, значение силы связи при котором эти затраты в среднем будут минимальны.

Для численного исследования воспользуемся пакетом программ JModelica и Python. Моделирование (1) выполнено с помощью Modelica, а расчет оптимального управления пакетом Optimica базовым ядром которого является пакет IPOPT необходимый для решения НР задачи, возникающий при расчете оптимального управления. Анализ и визуализация результатов в Python.

Был произведен численный расчет на указанном диапазоне значений силы связи, путем его разбиения на дискретные интервалы и многократным просчетом, для набора статистики по значениям интеграла издержек J . Начальные условия были взяты случайно, но такие, чтобы расстояние до состояния полной синфазной синхронизации (в указанном диапазоне силы связи оно было рассчитано заранее) были не больше некоторого наперед заданного значения.

Установлено следующее, при слабом взаимодействии $\alpha \in (0, 1.5)$ средние издержки для перевода системы в состояние полной синфазной синхронизации самые большие $\langle J \rangle \approx 3$, чуть меньше они для значения силы $\alpha \in (3, 4)$ $\langle J \rangle \approx 1.5$, минимум расположен на интервале $\alpha \in (1.5, 3)$ $\langle J \rangle \approx 1$.

Таким образом, для системы (1) слабая связь $\alpha \in (0, 1.5)$ является менее предпочтительной, с точки зрения средних затрат $\langle J \rangle$, для перевода системы автогенераторов в состояние полной синфазной синхронизации.

NUMERICAL EVALUATION OF THE OPTIMAL VALUE OF THE COUPLING FORCE IN THE SYSTEM THERMO-RESISTOR AUTO-GENERATORS CONNECTED VIA A CAPACITOR CONNECTION

R. U. Beregov, A. V. Melkikh

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

E-mail: sprutnew@gmail.com, melkikh2008@rambler.ru

We pose the following problem, let a system of thermo-resistor auto-generators connected via a capacitor connection, which is controlled by some source of heat:

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= I_1 U_1 - T_1 + 1 + u \\ z_1 \frac{dI_1}{dt} &= U_1 - I_1 \exp\left(\frac{E_{g01}}{T_1}\right) \\ y_1 \frac{dU_1}{dt} + \alpha \frac{dU_2}{dt} &= I_{in1} - I_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{dt} &= I_2 U_2 - T_2 + 1 \\ z_2 \frac{dI_2}{dt} &= U_2 - I_2 \exp\left(\frac{E_{g02}}{T_2}\right) \\ y_2 \frac{dU_2}{dt} + \alpha \frac{dU_1}{dt} &= I_{in2} - I_2 \end{aligned}$$

$$J \xrightarrow{\min_{u \in R}} \int_0^T u^2(t) + (U_1(t) - U_2(t))^2 dt$$

$$0 \leq u \leq 3$$

where: α – capacitive coupling coefficient, $u \in [0, 3]$ limited control.

Consider the range of values $\alpha \in (0, 4.5)$ («repulsive» range) then, if there is an optimum in terms of cost control, the value of the coupling strength at which these costs will be low on average.

For numerical studies use package JModelica and Python programs. Numerical simulations (1) were performed using the Modelica package and optimal control calculation executed package Optimica, the base kernel is IPOPT packages that are necessary for solving NP problems arising in the calculation of the optimal control. Analysis and visualization of results in Python.

Numerical calculation was made on the specified range of the coupling strength values, by its division into discrete intervals and multiple calculation for the collection of statistics on the values of the integral costs. The initial conditions were taken at random, but such that the distance to the point of full phase synchronization (in the range of binding forces, it has been calculated in advance) were no more than a preassigned value.

Established the following, the case of weak interaction $\alpha \in (0, 1.5)$ the average cost to put the system in a state of complete phase synchronization greatest $\langle J \rangle \approx 3$, a little less than they are for a value of power is at least in the interval $\alpha \in (1.5, 3)$ $\langle J \rangle \approx 1$.

Thus, for (1) the weak link $\alpha \in (0, 1.5)$ is less preferable, from the point of view of the average cost $\langle J \rangle$ for the translation system of oscillators in a state of complete phase synchronization.

6-8

РАЗДЕЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВ ПРИ ИСПАРЕНИИ ИЗ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ И ЕГО ОПТИМИЗАЦИЯ

А. В. Мелких, А. О. Бокуняева

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

E-mail: melkikh2008@rambler.ru, alexsandra@list.ru

Рассмотрена задача разделения веществ при испарении двухкомпонентного раствора. Записана система уравнений баланса компонентов на поверхности плоского слоя раствора. Компоненты различаются как массами, так и энергетическими барьерами при испарении. Система уравнений решена аналитически для двухкомпонентного раствора в предположении изотермической среды и хорошего перемешивания смеси. Получена зависимость коэффициента разделения смеси от высоты слоя жидкости, остающейся в процессе испарения. Проведена оценка охлаждения поверхности за счет испарения смеси. Введена функция ценности для каждого вещества, для которой сформулирована оптимизационная задача. Найдены зависимости функции ценности от параметров системы. В частности, найдена высота слоя жидкости, для которой ценность смеси максимальна.

ISOTOPE FRACTIONATION DURING TWOCOMPONENT MIXTURE'S EVAPORATION AND ITS OPTIMIZATION

A. V. Melkikh, A. O. Bokunyaeva

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

E-mail: melkikh2008@rambler.ru, alexsandra@list.ru

The question of isotope separation during two component solution evaporation has been reviewed. The system of balance equations for both components on the flat surface of solution was written down. Components differ on masses and energy barriers during evaporation. The system of equations was solved analytically for two component solution with an assumption of isothermal environment and good solution of mixture. They received a law for fractionation coefficient in accordance with the liquid layer height, which keeps up during evaporation. The estimation of layer cooling on account of mix evaporation has been made up. We brought in a value function for each component, which an optimization task was formed for. They also found functions for values in dependence of system parameters. Particularly, the height of liquid layer was found, which mix value is maximum.

6-9

**ВОЗМОЖНОСТИ ТРЕХМЕРНОЙ МЕТОДИКИ
МАЛОРАКУРСНОГО ТОМОГРАФИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ ИМТОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
МЕТЕОРИТНЫХ ШАРОВ ДО И ПОСЛЕ
ИХ ВЗРЫВНОГО ОБЖАТИЯ**

Л. П. Брезгина

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

E-mail: l.p.brezgina@vniitf.ru

В докладе рассматриваются вопросы модернизации методики ИМТОМ [1] для восстановления внутренней структуры метеоритных шаров. Сферические взрывные эксперименты проводились в постановках, позволивших сохранить метеоритные шары, претерпевшие взрывное обжатие [2]. Рентгенографирование проводилось на базе рентгеновской установки фирмы Nikon Metrology XT H450 [3].

Для исследования внутренней структуры деформированных после взрывного обжатия метеоритных шаров разработаны программы PreprocessingSphere и GuiScore, позволяющие оперативно обрабатывать серию рентгенограмм и получать оценки для средних плотностей и средних значений радиусов. Для постобработки томограмм с целью выделения информативных областей применяются специальные методы трехмерной визуализации и фильмы

Представлены результаты сравнения средних плотностей и средних значений радиусов метеоритных шаров, полученных в расчетах по программе ИМТОМ и методами промышленной томографии.

Литература

1. Л. П. Брезгина Трехмерная методика малоракурсного томографического контроля над внутренней структурой стальных оболочек, подвергнутых квазисферическому взрывному обжатию – г. Снежинск, Россия, ЗНЧ, XII Меж-

дународная конференция 2–6 июня 2014 года: доклады и презентации – CD-ROM.

2. А. Ю. Николаев, Е. Ф. Козлов, Д. Т. Юсупов и др. Химический и минеральный состав хондрита «Челябинск», объемная плотность и предварительные результаты по его ударной сжимаемости – г. Снежинск, Россия, ЗНЧ, XII Международная конференция 2–6 июня 2014 года: доклады и презентации – CD-ROM.

3. Отчет по сканированию образцов на микрофокусной системе рентгенографического контроля с функцией компьютерной томографии на базе рентгеновской установки фирмы Nikon Metrology XT H450 – г. Москва, 2014, 38с.

**CAPABILITIES OF 3D SMALL-DIRECTION
TOMOGRAPHY IMTOM FOR INVESTIGATION
OF METEORITE SPHERES PRIOR
TO AND AFTER THEIR EXPLOSIVE
COMPACTION**

L. P. Brezgina

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

E-mail: l.p.brezgina@vniitf.ru

This paper considers issues of IMTOM technique [1] improvement to reconstruct the internal structure of meteorite spheres. Setups of our spherical explosive experiments were such that they made it possible to recover meteorite spheres after their explosive compaction [2]. Nikon Metrology XT H450 X-ray apparatus was used for X-ray radiography [3].

The PreprocessingSphere and GuiScope programs were developed to investigate the internal structure of meteorite spheres deformed after its explosive compaction. These programs make it possible to efficiently process a set of X-ray images and to estimate average densities and average radii. Special methods of 3D visualization and films are used for tomograms post processing to select formation regions.

Average densities and average radii of meteorite spheres calculated with the Imtom program are compared to those given by industrial tomography.

References

1. L. P. Brezgina. 3D Small-Direction Tomography of Internal Structure of Steel Shells after Their Quasi-Spherical Imploding. – Snezhinsk, Russia, ZST, XII International Conference, June 2–6, 2014: Papers and Presentations. – CD-ROM.

2. A. Yu. Nikolaev, E. A. Kozlov, D. T. Yusupov et al. Chemical and Mineral Composition of Chelyabinsk Chondrite, Volume Density and Preliminary Results on Shock Compression. – Snezhinsk, Russia, ZST, XII International Conference, June 2–6, 2014: Papers and Presentations. – CD-ROM.

3. Report on Sample Scanning with Microfocus X-Ray Inspection System enabling Computer Tomography based on Nikon Metrology XT H450. – Moscow, 2014, 38 pp.

6-10

**ОБОБЩЕННОЕ ТЕЧЕНИЯ ХИМЕНЦА
ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ
В БЕСКОНЕЧНОЙ ПОЛОСЕ,
ПОДОГРЕВАЕМЫЙ СНИЗУ,
ПРИ ЗАДАННОМ ТЕПЛООБМЕНЕ
НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ**

С. С. Власова¹, Е. Ю. Просвирыков^{1,2}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

²Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: sveta040790@yandex.ru, evgen_pros@mail.ru

Авторами приведено обобщение течение Хименца для тепловой конвекции вязкой несжимаемой жидкости. Конвекция в жидкости индуцируется квадратичным законом распределения температуры на нижней границе бесконечного слоя жидкости. На верхней границе учитываются фазовые превращения в жидкости, которые описываются законом Ньютона–Рихмана. Диссипативные процессы в жидкости описываются точным решением системы Обербека–Буссинеска. Поле скоростей является линейным по горизонтальной (продольной) координате. Давление и температуры описываются квадратичными формами по продольной координате. Коэффициенты линейных и квадратичных форм зависят от поперечной координаты. Точное решение краевой задачи было вычислено при использовании линеаризованных уравнений Навье–Стокса. Линеаризация уравнения осуществлялась с учетом геометрической анизотропии слоя. Иными словами, использовалось два масштаба для координатных переменных. В этом случае линеаризация возможна при числе Грасгофа обратно пропорциональному квадрату геометрической анизотропии. Таким образом, точные решения справедливы для описания жидкости при числах Рейнольдса порядка нескольких тысяч. Данная оценка для тонких слоев жидкости справедлива как для ламинарных, так и для турбулентных течений. Анализ точного решения показывает, что в жидкости возникают противотечения при определенных ограничениях, связывающих числа подобия и краевые условия. Течение жидкости является вихревым за исключением одной или двух потенциальных нитей. При совпадении знака кривизны изолиний температуры на нижней границе, поле скоростей не зависит от однородного слагаемого температуры. Изолинии температуры при любых граничных условиях всегда имеют бесконечно удаленную точку (локально гиперболические и локально параболические). Для давления существуют такие значения числа Био и отношения геометрических масштабов, что изолинии могут быть локально эллиптическими (замкнутыми).

**GENERALIZED HIMENTS'S FLOW
OF A VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID
IN THE ENDLESS STRIP, HEATEDFROM
BELOW, WITH THE HEAT EXCHANGE
ON THE UPPER BORDER**

S. S. Vlasova¹, E. Yu. Prosviryakov^{1,2}

¹Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev – KAI, Kazan, Russia

²Institute of Engineering Science, Ural Branch of The Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

E-mail: sveta040790@yandex.ru, evgen_pros@mail.ru

The authors gave the generalization of the Himents flow for thermal convection of a viscous incompressible fluid. Convection in the fluid is induced by the square distribution law of temperature on the lower bound of an infinite layer of fluid. On the upper bound, phase transformations into fluids, which are described by Newton–Rikhman law, are considered. Dissipative processes in the fluid are described by the exact solution of Oberbeck–Boussinesq system. The field of velocities is linear for the horizontal (axial) coordinate. The pressure and temperature parameters are described by square forms on the axial coordinate. The coefficients of linear and square forms depend on the transverse coordinate. The exact solution of a boundary value problem was calculated with the use of the linearized Navier–Stokes equations. The linearization of the equation was performed with being taken into consideration geometrical anisotropy of a layer. In other words, two scales for coordinate variables were used. In this case the linearization is possible if the Grashof number is inversely proportional to the square of geometric anisotropy. Thus, the exact solutions are fair for the description of the fluid in case Reynolds numbers are about several thousands. This assessed value for thin layers of the fluid is fair both for the laminar, and for turbulent flows. The analysis of the exact solution shows that in the fluid, under certain restrictions, there appear counter-current flows that connect numbers of similarity and regional conditions. The current of fluid is vortex except for one or two potential threads. In case of coincidence of a sign of curvature of isolines of the temperature on the lower bound, the field of velocities doesn't depend on the homogeneous composite of the temperature. Temperature isolines in any boundary conditions always have an infinitely far point (locally hyperbolic and locally parabolic). For the pressure there exist such values of Biot number and the relation of geometrical scales that provide certain conditions for isolines to be locally elliptic (closed isolines).

6-11

АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО МАЛОМУ ЧИСЛУ РАКУРСОВ С TV-РЕГУЛЯРИЗАЦИЕЙ И АДАПТИВНОЙ СЕГМЕНТАЦИЕЙ

В. В. Власов, А. Б. Коновалов, С. В. Кольчугин

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

E-mail: vitaly.vlasov.v@gmail.com

При томографическом исследовании взрывных быстропротекающих процессов [1] и обжатых взрывом металлических оболочек [2] число ракурсов съемки обычно не бывает больше 10-ти. В такой ситуации применение стандартных алгоритмов реконструкции, как интегральных, так и основанных на разложении в ряд, приводит к появлению на восстановленном изображении полосовых артефактов, которые затрудняют распознавание структур и существенно ухудшают пространственное разрешение. В докладе представлен оригинальный гибридный алгоритм, в основе которого известный алгебраический алгоритм реконструкции ART [3], регуляризация промежуточных результатов его работы посредством минимизации нормы полной вариации (TV-регуляризация) [4] и оригинальный метод адаптивной сегментации, являющийся модернизацией известного алгоритма «выращивания областей» [5]. Для апробации нового алгоритма, названного нами ART-TVS, поставлен численный эксперимент по реконструкции 2D фантома, моделирующего газодинамическую среду, и 2D фантома обжатой взрывом стальной оболочки. Показано, что алгоритм позволяет восстанавливать изображения без полосовых артефактов. Результаты реконструкции приводятся в сравнении с результатами, полученными с помощью алгоритма ART-TV (ART с TV-регуляризацией, но без адаптивной сегментации) и алгоритма дискретной томографии MART-AP, разработанного нами ранее [6]. Алгоритм ART-TVS быстрее сходится, позволяет получать томограммы более высокого качества, и более устойчив к аддитивному шуму, нежели два других вышеуказанных алгоритма.

Литература

1. Pang T. F. AWE multi-axis radiographic facility: A review of 3D-reconstructions from limited data // AIP Conference Proceedings. – 2001. – V. 568. – P. 521–530.
2. Коновалов А. Б., Могиленских Д. В., Козлов Е. А., Власов В. В., Киселев А. Н., Ковалев Е. В., Захаров М. Н., Пovyшев В. Н., Ставрицкий В. И. Контроль откольных и сдвиговых разрушений в обжатой взрывом сферической железной оболочке методом малоракурсной гамма-томографии // Дефектоскопия. – 2008. – № 1. – С. 19–31.
3. Gordon R., Bender R., Herman G. T. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy

and X-ray photography // J. Theor. Biol. – 1970. – V. 29. – P. 471–481.

4. Yu H., Wang G. Compressed sensing based interior tomography // Phys. Med. Biol. – 2009. – V. 54. – P. 2791–2805.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – Москва: Техносфера, 2005.
6. Konovalov A. B., Vlasov V. V. Spatial resolution analysis for few-views discrete tomography based on MART-AP algorithm // ISRN Sign. Process. 2013. – V. 2013. – P. 356291-1–356291-7.

FEW-VIEWS ALGEBRAIC RECONSTRUCTION OF IMAGES WITH TV-REGULARIZATION AND ADAPTIVE SEGMENTATION

V. V. Vlasov, A. B. Konovalov, S. V. Kolchugin

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

E-mail: vitaly.vlasov.v@gmail.com

In the tomographic investigation of fast detonation processes [1] and shock-compressed metal shells [2], the number of views is usually no larger than 10 and image reconstruction with standard techniques, either integral or based on expansion in series, gives stripe artifacts which impede the recognition of structures and make spatial resolution much worse. The paper presents an original hybrid algorithm, based on the known Algebraic Reconstruction Technique (ART) [3], regularization of interim results through minimization of the Total Variation norm (TV-regularization) [4], and an original method of adaptive segmentation which is a modernization of the known region growing algorithm [5]. The new algorithm we called ART-TVS was tested in numerical experiments aimed to reconstruct a 2D phantom of a hydrodynamic medium and a 2D phantom of a shocked steel shell. It is shown to be capable of reconstruction with no stripe artifacts. Reconstruction results are compared with those obtained with the ART-TV algorithm (ART with TV-regularization and without adaptive segmentation) and our earlier algorithm MART-AP [6]. The ART-TVS algorithm converges faster, gives higher quality tomograms, and more resistant to adaptive noise than the other two.

References

1. Pang T. F. AWE multi-axis radiographic facility: A review of 3D-reconstructions from limited data // AIP Conference Proceedings. – 2001. – V. 568. – P. 521–530.
2. Konovalov A. B., Mogilenskikh D. V., Kozlov E. A., Vlasov V. V., Kiselev A. N., Kovalev E. V., Zakharov M. N., Povyshch V. N., Stavrietskiy V. I. Few-view gamma tomography used to monitor scabbing and shear fracture in a spherical iron shell compressed by explosion // Rus. J. Nondestructive Testing. – 2008. – V. 44. – P. 15–25.
3. Gordon R., Bender R., Herman G. T. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography // J. Theor. Biol. – 1970. – V. 29. – P. 471–481.
4. Yu H., Wang G. Compressed sensing based interior tomography // Phys. Med. Biol. – 2009. – V. 54. – P. 2791–2805.

5. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. – New Jersey: Prentice-Hall, 2002.
6. Kononov A. B., Vlasov V. V. Spatial resolution analysis for few-views discrete tomography based on MART-AP algorithm // *ISRN Sign. Process.* 2013. – V. 2013. – P. 356291-1–356291-7.

6-12

**АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ
ВЫПУКЛЫХ МНОГОУГОЛЬНИКОВ
С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ ДЛЯ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ
ГАЗОДИНАМИКИ**

К. О. Власов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: konstmephi@gmail.com

На сегодняшний день решение такой вычислительной задачи как поиск пересечения плоских многоугольников, весьма востребовано. Это обусловлено тем, что в приложениях, использующих компьютерную графику, в автоматизированных системах различного типа (CAD, CAE, CAM), в геоинформационных системах (GIS), в векторных графических редакторах и многих других объекты описываются с помощью плоских многоугольников.

В ходе работы проведен обзор существующих алгоритмов для поиска пересечения многоугольников, проанализированы их особенности и область применения [1–4]. Разработан новый алгоритм для поиска пересечения выпуклых многоугольников, ориентированный на высокую точность поиска пересечений. Проведен обзор современных программных библиотек для поиска пересечений многоугольников, являющихся наиболее эффективными и востребованными [5–7].

Разработанный новый алгоритм реализован программно на языке Fortran (2003). Для сравнительного тестирования разработанного алгоритма по вычислительной точности и скорости работы были разработаны две тестовые задачи, представляющие из себя наборы выпуклых многоугольников с известными точными значениями площадей пересечения. Сравнительное тестирование было проведено с программной библиотекой Clipper (v6.13) [7], которое показало преимущество разработанного алгоритма в вычислительной точности. Кроме того, в ходе данного тестирования алгоритм показал преимущество над библиотекой Clipper в скорости расчета при однопроцессорном режиме работы. Отставание в скорости работы библиотеки Clipper объясняется тем, что использованные в ней алгоритмы ориентированы на многоугольники произвольного типа.

Вследствие высокой точности определения координат точек пересечения представленный алгоритм хорошо подходит для случаев с предельно малыми

сравнительными площадями многоугольников. Поэтому алгоритм рекомендуется к использованию в приложениях, моделирующих физические процессы, при перестроении расчетной сетки и на этапе построения межфазных границ.

Литература

1. Sutherland I. E., Hodgman G. W. Reentrant Polygon Clipping // *Communications of the ACM*. – 1974. 17, № 1. – P. 32–42.
2. Weiler K., Atherton P. Hidden surface removal using polygon area sorting // *Proc. of the 4th ann. conf. on computer graphics and interactive techniques*. – 1977. – P. 214–222.
3. O'Rourke J., Chien C. B., Olson T., Naddor D. A new linear algorithm for intersecting convex polygons // *Computer Graphics and Image Processing*. – 1982. 19, – P. 384–391.
4. Vatti B. R. A generic solution to polygon clipping // *Communications of the ACM*. – 1992. 35, № 7. – P. 56–63.
5. JTS Topology Suite – Overview. Available at: <http://www.vividsolutions.com/jts/JTSHome.htm> (accessed 25.09.2016).
6. General Polygon Clipping Library – Overview. Available at: <http://www.cs.man.ac.uk/~toby/alan/software/gpc.html> (accessed 25.09.2016).
7. Clipper – an open source freeware library for clipping and offsetting lines and polygons. Available at: <http://www.angusj.com/delphi/clipper.php> (accessed 25.09.2016).

**AN ALGORITHM FOR INTERSECTING CONVEX
POLYGONS WITH HIGH PRECISION
FOR USING IN GAS-DYNAMICS TASKS**

К. О. Власов

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

Today the solution of such problems as computer search for the intersection of flat polygons is rather claimed. This is due to the fact that applications that use computer graphics in the automated systems of various types (CAD, CAE, CAM), geographic information systems (GIS), in vector graphic editors, and many others objects are described using flat polygons.

We have reviewed existing algorithms to search for the intersection of polygons, analyzed their characteristics and application [1–4]. A new algorithm for finding the intersection of convex polygons, focused on high precision search intersections. A review of modern software libraries for finding the intersection of polygons that are the most effective and popular was done [5–7].

The developed new algorithm implemented at Fortran (2003). For comparative testing of the developed algorithm for computing accuracy and speed the two test problems have been developed, that are a set of convex polygons with known exact values of the intersection area. Comparative testing was conducted with a software library Clipper (v6.13) [7], which showed the advantage of developed algorithm in computational accuracy. Furthermore, during this testing an advantage over the Clipper library in calculation speed for single processor was

showed. The lag in the Clipper library speed because the algorithms used in it are focused on the arbitrary polygons.

Due to the high accuracy of the determination of the intersection point's coordinates presented algorithm is well suited for applications with extremely low comparative areas of polygons. Therefore, the algorithm is recommended for use in applications simulating physical processes at evolution of the computational grid, and at the stage of interface construction.

References

1. Sutherland I. E., Hodgman G. W. Reentrant Polygon Clipping // Communications of the ACM. – 1974. 17, № 1. – P. 32–42.
2. Weiler K., Atherton P. Hidden surface removal using polygon area sorting // Proc. of the 4th ann. conf. on computer graphics and interactive techniques. – 1977. – P. 214–222.
3. O'Rourke J., Chien C. B., Olson T., Naddor D. A new linear algorithm for intersecting convex polygons // Computer Graphics and Image Processing. – 1982. 19, – P. 384–391.
4. Vatti B. R. A generic solution to polygon clipping // Communications of the ACM. – 1992. 35, № 7. – P. 56–63.
5. JTS Topology Suite – Overview. Available at: <http://www.vividsolutions.com/jts/JTSHome.htm> (accessed 25.09.2016).
6. General Polygon Clipping Library – Overview. Available at: <http://www.cs.man.ac.uk/~toby/alan/software/gpc.html> (accessed 25.09.2016).
7. Clipper – an open source freeware library for clipping and offsetting lines and polygons. Available at: <http://www.angusj.com/delphi/clipper.php> (accessed 25.09.2016).

6-13

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СВОБОДНО ВСПЛЫВАЮЩЕГО ПУЗЫРЯ ВОЗДУХА

К. О. Власов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: konstmephi@gmail.com

На сегодняшний день процесс всплытия пузырька недостаточно хорошо описан с точки зрения количественного анализа. Это объясняется не только богатым физическим содержанием задачи, но и характерными размерами задачи, требующими использования огромных вычислительных ресурсов. С точки зрения эксперимента исследование данного процесса требует использования современных, высокоточных детектирующих средств и последующей компьютерной обработки результатов.

Всплытие пузырька имеет большое значение и с точки зрения практического применения, его можно наблюдать в различных производственных процессах в промышленности. В химической промышленности это: барботажные колонны, петлевые реакторы, перемешивающие реакторы, реакторы флотации и брожения. Для проектирования эффективных двухфазных

реакторов необходимы детальные знания о размерах пузырьков и их форме, о скоростях, внутренней циркуляции, динамике скоплений пузырьков, турбулентности, вызванной пузырьками и перемешивании. Также важно изучение распределения пузырьков по размерам (с учетом их слияния и распада). В таких промышленных применениях пузырьки часто имеют несферическую и даже изменяющуюся форму, а также асимметричный след позади себя.

Проведена работа по численному моделированию всплытия одиночных пузырьков воздуха в воде с различными диаметрами. Полученные траектории всплытия пузырьков имеют винтовой характер. Рассчитаны период и амплитуда траекторий всплытия для всех моделируемых размеров пузырьков и вычислена средняя скорость всплытия. Полученные значения согласуются с экспериментальными данными [1, 2] и результатами расчетов [3].

Литература

1. R. C. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber, Bubbles, Drops, and Particles, Academic, New York, 1978.
2. A. Tomiyama, G. P. Celata, S. Hosokawa and S. Yoshida, Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime // Int. J. Multiphase Flow, Vol. 28. 2002. P. 1497–1519.
3. Jinsong Hua, Ping Lin, and Jan F. Stene, Numerical simulation of gas bubbles rising in viscous liquids at high Reynolds number // Contemporary Mathematics, Vol. 466 . 2008. 190.

NUMERICAL SIMULATION OF THE MOTION OF A FREE RISING AIR BUBBLE

K. O. Vlasov

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

Today the process of bubble's rising is not well described in terms of a quantitative analysis. This is not only a wealth of physical content of the problem, but also the characteristic sizes of the problem requires the using of very large computational resources. From the viewpoint of the experiment the investigation of this process requires the using of the modern, high-precision detecting devices and subsequent computer processing of the results.

Rising of the bubble have a great importance from the standpoint of practical use, it can be observed in a variety of manufacturing processes in the industry. In the chemical industry: bubble columns, loop reactors, stirred reactors, flotation and fermentation reactors. For designing effective two-phase reactors requires detailed knowledge of the bubble's sizes and forms of their speeds, internal circulation, of the dynamics of the bubble clusters, of the turbulence caused by bubbles and of the stirring. It is also important to study the bubble size distribution (taking into account their merger and dissolution). In such industrial applications bubbles often have a non-spherical and even changing shape, as well as asymmetrical trace.

We carried out a numerical simulation of single bubble rising in the water with different diameters. The resulting trajectories have helical type. The period and amplitude of the trajectories for all simulated bubble's sizes and the average speed of rising are calculated. These values are consistent with known experimental data [1, 2] and with the results of numerical simulation [3].

References

1. R. C. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber, *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic, New York, 1978.
2. A. Tomiyama, G. P. Celata, S. Hosokawa and S. Yoshida, Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime // *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 28. 2002. P. 1497–1519.
3. Jinsong Hua, Ping Lin, and Jan F. Stene, Numerical simulation of gas bubbles rising in viscous liquids at high Reynolds number // *Contemporary Mathematics*, Vol. 466 . 2008. 190.

6-14

СПИРАЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ ВСПЛЫВАЮЩИХ ПУЗЫРЕЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО РАЗМЕРА. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

С. Ю. Седов, К. О. Власов

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

В докладе рассмотрены всплывающие в воде пузыри миллиметрового размера, а именно, в диапазоне радиусов ~ 1 – 2 мм. В этом, весьма узком, диапазоне радиусов пузырей наблюдаются сложные переходные динамические процессы при смене вида траектории движения всплывающего пузыря.

Основное внимание уделено проблеме аналитического описания винтовой траектории движения всплывающего пузыря. Рассмотрены работы, в которых предложены аналитические модели движения всплывающего пузыря [1, 2]. На основе их подхода сформулирована замкнутая аналитическая модель определения параметров траектории пузыря. В работе предложено объяснение механизма формирования вихрей за пузырем. Показана связь характерной спиралевидной траектории движения пузырей с наличием присоединенных вихрей.

Разработанная аналитическая модель, описывающая траекторию движения пузырей, представляет собой систему из 12 алгебраических уравнений. Данная система включает в себя одно эмпирическое число в выражении для подъемной силы, единственным входным параметром является радиус пузыря.

Литература

1. Magnaudet G., Magnaudet J. Path instability of a rising bubble // *Physical Review Letters*. – 2002. 88, № 1. – P. 014502–014504.

2. Shew W. L., Pinton J. F. Dynamical Model of Bubble Path Instability // *Physical Review Letters*. – 2006. 97, № 1. – P. 1–4.

СПИРАЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ ПУЗЫРЕЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО РАЗМЕРА. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

С. Ю. Седов, К. О. Власов

Российский федеральный ядерный центр –
Институт экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: SYSedov.vniief.ru

Миллиметровые пузыри, всплывающие в воде, рассматриваются в настоящем докладе, а именно, в диапазоне радиусов ~ 1 – 2 мм. В этом очень узком диапазоне радиусов пузырей наблюдаются сложные переходные динамические процессы при смене вида траектории движения всплывающего пузыря.

Основное внимание уделено проблеме аналитического описания винтовой траектории движения всплывающего пузыря. Рассмотрены работы, в которых предложены аналитические модели движения всплывающего пузыря [1, 2]. На основе их подхода сформулирована замкнутая аналитическая модель определения параметров траектории пузыря. В работе предложено объяснение механизма формирования вихря за пузырем. Показана связь характерной спиралевидной траектории движения пузырей с наличием присоединенных вихрей.

Разработанная аналитическая модель, описывающая траекторию движения пузырей, представляет собой систему из 12 алгебраических уравнений. Эта система включает в себя одно эмпирическое число в выражении для подъемной силы и единственное входное значение – радиус пузыря.

References

1. Magnaudet G., Magnaudet J. Path instability of a rising bubble // *Physical Review Letters*. – 2002. 88, № 1. – P. 014502–014504.
2. Shew W. L., Pinton J. F. Dynamical Model of Bubble Path Instability // *Physical Review Letters*. – 2006. 97, № 1. – P. 1–4.

6-15

ГИБРИДНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ УСКОРЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Л. В. Вшивкова, Г. И. Дудникова, К. В. Вшивков

Институт вычислительной математики и математической
геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
Институт вычислительных технологий СО РАН,
Новосибирск, Россия
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: lyudmila.vshivkova@parbz.ssc.ru,
gdudnikova@gmail.com, vkv76ru@gmail.com

Происхождение космических лучей (КЛ), оказывающих существенное влияние на процессы в околоземном космическом пространстве, до сих пор точно

не установлено и является одним из главных вопросов в астрофизике. В настоящее время один из рассматриваемых механизмов ускорения КЛ основан на отражении ионов от фронта бесстолкновительных ударных волн (БУВ), структура которых определяется коллективными плазменными процессами. Несмотря на почти полувековую историю спутниковых наблюдений и лабораторных экспериментов полной теории БУВ для больших чисел Альфвена–Маха в данный момент не существует и численное моделирование в исследовании БУВ играет важную роль. Наиболее полное описание структуры ударных волн и механизмов генерации ускоренных частиц на ее фронте возможно на основе кинетического уравнения Власова и системы уравнений Максвелла. Однако трудности численной реализации такой модели, связанные с большой разницей в пространственных и временных масштабах для электронов и ионов, затрудняют ее использование при проведении расчетов даже на современных вычислительных системах. В данной работе рассматривается двумерная гибридная модель, основанная на кинетическом приближении для ионов, а поведение электронной компоненты описывается уравнениями магнитной гидродинамики. В созданной модели формирование ударной волны происходит в результате отражения от проводящей границы непрерывно входящего в расчетную область прямоугольной формы потока полностью ионизованной плазмы. Для решения уравнения Власова используется метод частиц-в-ячейках. Для решения уравнений Максвелла создана неявная конечно-разностная схема второго порядка точности. Созданная двумерная численная модель позволяет исследовать как структуру ударных волн в зависимости от скорости входящего потока, так и ускорение частиц на фронте БУВ с ларморовским вращением ионов в ее подножье.

Работа поддержана грантами РФФ № 16-11-10028, РФФИ № 16-01-00209 и № 16-07-00916.

HYBRID NUMERICAL MODEL OF ACCELERATION OF CHARGED PARTICLES ON A SHOCK WAVE FRONT

L. V. Vshivkova, G. I. Dudnikova, K. V. Vshivkov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical
Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk,
Russia

Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: lyudmila.vshivkova@parbz.sbcc.ru,
gdudnikova@gmail.com, vkv76ru@gmail.com

At present time the origin of cosmic rays (CR) having a considerable influence on near-earth space processes has not been studied well and it is one of the fundamental interests in astrophysics. Nowadays one of the considered CR acceleration mechanisms is based on ion reflection from the front of collisionless shock waves (CSW), the structure of which is defined by collective plasma pro-

cesses. In spite of the semi-centennial history of satellite observations and laboratory experiments there has not been the CSW full theory for large Alfvén-Mach numbers and the numerical modeling to study CSWs plays the important role. The most full description of a shock wave structure and mechanisms of accelerated particle generation on its front is possible on the base of the Vlasov kinetic equation and the Maxwell equation system. However the difficulties of numerical implementation of such model, connected with the big difference in space and time scales for electrons and ions, impede its use even when making computations on modern computing systems. In the current work we consider the 2D hybrid model based on kinetic approach for ions and where the behavior of an electron plasma component is described by the equations of magnetic hydrodynamics. In this model the shock wave formation takes place as the result of reflection from a conducting boundary of a continuously entering into rectangular computation domain flow of fully ionized plasma. To solve the Vlasov equation the particle-in-cell method is used. For solving the Maxwell equations the new implicit scheme of the second order of accuracy has been developed. The proposed 2D model allows to study the structure of shock waves depending on the velocity of the entering flow and the particle acceleration on the CSW front along with the Larmor ion rotation in it too.

The research was supported by the Russian Science Foundation (RSF) under Grant 16-11-10028 and Russian Foundation for Basic Research under Grants 16-01-00209 and 16-07-00916.

6-16

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОДНОГО ТОЧНОГО ДВУМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕШЕНИЯ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ–СТОКСА

В. Ф. Габдулхаев

ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей
сообщения, Екатеринбург, Россия

E-mail: vadim260788@mail.ru

В книге [1] предложена методика построения решений полной системы уравнений Навье–Стокса с помощью тригонометрических рядов. При этом решение представляется в виде, когда к заданному фону прибавляются тригонометрические ряды по пространственным переменным с неизвестными коэффициентами, зависящими от времени. Для этих коэффициентов получена бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений. С помощью тождественных преобразований, эта система сведена к виду, который требует выполнения существенно меньшего числа арифметических операций при

вычислении правых частей системы обыкновенных дифференциальных уравнений по сравнению с первоначальным представлением.

Исследуемая в данной работе задача имеет конкретный газодинамический смысл. Рассматриваются горизонтальная неподвижная плоскость и горизонтальная плоскость, движущаяся вправо с некой скоростью, с условиями прилипания на них. Составим математическую модель данного течения.

Берется система уравнений газовой динамики, с учетом вязкости и теплопроводности, то есть полная система уравнений Навье–Стокса, у которой при конкретных коэффициентах есть точное решение. Ставится задача: исследовать, как ведет себя решение системы, полученное в виде суммы точного решения и небольшой добавки. Для этого, к точному решению системы уравнений Навье–Стокса, зависящему от двух пространственных переменных x и y , прибавляются тригонометрические ряды по пространственным переменным x и y с неизвестными коэффициентами, зависящими от времени. Подставляя данные суммы в полную систему уравнений Навье–Стокса, получаем бесконечную систему обыкновенных дифференциальных уравнений, для коэффициентов, которые зависят от времени. В полученных обыкновенных дифференциальных уравнениях, для коэффициентов, которые зависят от времени, присутствуют двойные суммы. С помощью тождественных преобразований делается переход от двойных сумм к одинарным. Таким образом, система сводится к виду, который требует выполнения существенно меньшего числа арифметических операций при вычислении правых частей системы обыкновенных дифференциальных уравнений по сравнению с первоначальным представлением. Далее делается переход от бесконечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, к конечной системе обыкновенных дифференциальных уравнений, к случаю, когда учитывается только конечное (но произвольное) число уравнений. В итоге получаем конечную систему обыкновенных дифференциальных уравнений, от конечного числа искомых функций, для коэффициентов, которые зависят от времени.

Литература

1. Баутин С. П., Замыслов В. Е., Скачков П. П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. Новосибирск: Наука, 2014.

USE TRIGONOMETRIC SERIES TO REPRESENT A SINGLE TWO-DIMENSIONAL UNSTEADY EXACT SOLUTIONS COMPLETE SYSTEM NAVIER–STOKES

V. F. Gabdulkaev

Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

E-mail: vadim260788@mail.ru

In the book [1], a method of constructing a complete system of solutions of the Navier–Stokes equations using trigonometric series. At the same time the solution is represented in the form, when added to the specified background trigonometric series in the spatial variables with unknown coefficients depending on time. For these coefficients obtained an infinite system of ordinary differential equations. With the help of identity transformations, the system is reduced to the form, which requires significantly fewer arithmetic operations in the calculation of the right sides of the system of ordinary differential equations compared to the original presentation.

The study in this paper, the problem has a specific gas-dynamic sense. We consider a fixed horizontal plane and the horizontal plane, moving to the right with a certain velocity, with the adhesion conditions on them. We construct the mathematical model of the flow.

Take the system of gas dynamics equations with viscosity and thermal conductivity, ie the complete system of Navier–Stokes equations, which in specific ratios there is an exact solution. The task: to study the behavior of the solution of the system obtained as the sum of the exact solution and a small supplement. For this purpose, the exact solution of the Navier–Stokes equations depending on two space variables x and y , trigonometric series are added to the spatial variables x and y with unknown coefficients depending on time. Substituting the amount of data in the complete system of Navier–Stokes equations, we obtain an infinite system of ordinary differential equations for the coefficients that depend on the time. In the resulting ordinary differential equations for the coefficients that depend on the time, there are double the amount. With identity transformations made the transition from single to double sums. Thus, the system is reduced to the form, which requires significantly fewer arithmetic operations in the calculation of the right sides of the system of ordinary differential equations compared to the original presentation. Next, a transition is made from the infinite system of ordinary differential equations to a finite system of ordinary differential equations to the case considered only a finite (but arbitrary) number of equations. As a result, we obtain a finite system of ordinary differential equations, a finite number of unknown functions, for the coefficients that depend on the time.

References

1. Bautin S. P., Zamyslov V. E., Skachkov P. P. Mathematical modelling of one-dimensional flow of a viscous transcalent gas with the help of trigonometric series. Novosibirsk: Nauka, 2014.

6-17

МЕТОД ЧАСТИЦ В ЯЧЕЙКАХ И ПРОБЛЕМА ЧИСЛЕННЫХ ШУМОВ

Е. А. Генрих

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: mesyats@gmail.com

На настоящий момент метод частиц в ячейках рекомендовал себя как простой и удобный инструмент для моделирования сложных нелинейных процессов в физике плазмы. В то же время именно при решении задачах физики плазмы такая проблема метода частиц, как численные шумы, может приводить к развитию нефизических неустойчивостей. Один из возможных путей решения данной проблемы – увеличение числа модельных частиц, что с развитием вычислительной техники становится все более доступным. Однако остается ряд задач, проблему шумов в которых сложно решить одним лишь использованием больших вычислительных мощностей. Сюда относится в том числе и задача плазменно-пучкового взаимодействия в трехмерной полностью кинетической постановке, представляющая интерес для широкого круга приложений, таких как ускорение заряженных частиц внешними электромагнитными полями и нагрев и удержание плазмы в лабораторных экспериментах.

Второй путь решения проблемы шумов – использование схем более высокого порядка точности, ядер частиц повышенной гладкости, использование методов адаптивного изменения количества и масс частиц, адаптивных сеток и т. д. Все это усложняет алгоритм и лишает метод частиц ряда его преимуществ. Поэтому вопрос количественной, а не только качественной оценки точности решения, является актуальным. Ответ на этот вопрос позволит понять, какой из путей при решении конкретной задачи лучше выбрать.

В работе рассматривается вопрос точности метода частиц в ячейках в зависимости от числа и формы модельных частиц, а также от алгоритма расчета токов на примере решения задачи взаимодействия электронного пучка с плазмой. Реализовано несколько различных алгоритмов вычисления токов и плотности для разных форм ядер частиц. Для проведенного численного моделирования процесса возбуждения электронным пучком плазменной волны формулируются критерии точности полученного решения.

Разработка численных алгоритмов выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 16-11-10028. Программная реализация и тестовые эксперименты выполнены при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00209.

PARTICLE-IN-CELL METHOD AND NUMERICAL NOISE PROBLEM

E. A. Genrikh

Institute of Computational Mathematics and Mathematical
Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: mesyats@gmail.com

Nowadays the particle-in-cell method is considered as a simple and convenient tool for the simulation of complex nonlinear processes in plasma physics. At the same time PIC numerical noise can lead to the non-physical instabilities growth in plasma physics problems. One of the possible solutions of this problem is increasing the

number of model particles. This becomes more feasible with the supercomputers evolution. However, there is still a number of problems in which non-physical noises can't be vanished using only supercomputer power. This includes the problem of beam-plasma interaction in a fully three-dimensional kinetic formulation of interest to a wide range of applications, such as the acceleration of charged particles by external electromagnetic fields and the plasma heating and confinement in laboratory experiments.

The second way to solve the noise problem is the usage of high order accuracy schemes, increasing smoothness of particle form-factors, the usage of adaptive particle numbers and masses, adaptive grids, etc. All this complicates the algorithm and particle method loses some of its advantages. Therefore, the question of quantitative (not just qualitative) estimation of the solution accuracy is important. The answer to this question will help to understand which of the ways for solving a specific task to choose.

The paper discusses accuracy of the PIC method depending on the number and form-factor of the particles, as well as the algorithm for calculating the current on plasma-beam interaction problem. A number of different algorithms for calculating the current density and for different particle form-factors are implemented. Solution accuracy criterion for the numerical simulation of the process of excitation by an electron beam plasma wave is formulated.

Development of numerical algorithms supported by RNF, grant № 16-11-10028, code development and tests were carried out with the support of RFBR grant № 16-01-00209.

6-18

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА

О. Н. Дементьев

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: dement@csu.ru

В рамках линейной теории исследуется устойчивость стационарного течения в вертикальном плоском слое вязкого несжимаемого газа, содержащего тяжелую твердую примесь. Оседающие неравномерно распределенные поперек слоя частицы (N – число частиц в единице объема, α – коэффициент, определяющий концентрацию примеси вблизи границ слоя, h – полуширина слоя)

$$N(\alpha, x) = \frac{4ch \alpha ch \frac{\alpha x}{h} - ch \frac{2\alpha x}{h} - ch 2\alpha - 2}{4ch \alpha - ch 2\alpha - 3},$$

взаимодействуя с газом, приводят его в движение. Газ и примесь предполагаются взаимопроникающими

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 газа. Частицы предполагаются сферическими, недеформируемыми, одинаковой массы и радиуса; плотность материала частиц много больше плотности газа. Выталкивающая сила, действующая на частицы, пренебрежимо мала, так как пропорциональна отношению плотностей газа и материала частиц. Взаимодействие между фазами при их относительном движении подчиняется закону Стокса. Газ расположен в плоском вертикальном слое с твердыми границами.

Устойчивость течения газа с примесью исследовалась по отношению к малым нормальным возмущениям. Для решения краевой задачи по определению границ устойчивости рассматриваемого течения использовался метод пошагового интегрирования Рунге–Кутты–Мерсона с ортогонализацией решений по Граму–Шмидту на каждом шаге интегрирования. Неустойчивость стационарного движения газа с тяжелой примесью обусловлена характером распределения частиц в слое ($0,5 \leq \alpha \leq 70$) и обусловлена взаимодействием встречных потоков: нисходящего центрального и двух восходящих около стенок. Оседаящие частицы порождают в газе бегущие вдоль слоя возмущения и способствуют их переносу. При уменьшении параметра α понижается устойчивость течения, вызванного оседанием частиц. Действительно, при малых значениях α распределение частиц в слое имеет отчетливо выраженный «язычковый» характер. Уменьшение α приводит к увеличению скорости течения газа и нарушению его устойчивости.

Литература

1. Бурмистрова А. Б., Дементьев О. Н. Устойчивость стационарного течения жидкости с тяжелой примесью. – ПМТФ. – 1986. Т. 27. № 2.

STABILITY OF FLOW OF A DUSTY GAS

O. N. Dementiev

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: dement@csu.ru

Stability of steady-state flow of a viscous incompressible gas with a heavy solid impurity in a vertical plane layer is studied in the framework of the linear theory. Gas motion is produced by settling of the heavy impurity particles which are nonuniformly distributed across a channel (N , number of particles per unit volume; α , coefficient defining the impurity concentration near the boundary of the layer; $2h$, width of layer)

$$N(\alpha, x) = \frac{4ch \alpha ch \frac{\alpha x}{h} - ch \frac{2\alpha x}{h} - ch 2\alpha - 2}{4ch \alpha - ch 2\alpha - 3}.$$

We will consider a viscous incompressible gas, containing an impurity in the form of nondeforming spherical solid particles. We assume the gas and impurity to be continuous media, interpenetrating and interacting with each other, and neglect interaction between the particles. The volume fraction of particles is assumed to be so low that the Einstein correction to liquid viscosity can be neglected. The density of the particle material is much greater than the density of the carrier medium. The left force acting on the particles is negligibly small, since it is proportional to the ratio density of gas and density of the particle material. Interaction between the phases as they undergo relative motion follows the Stokes law.

Stability of a flow of a gas with impurity was studied regarding small normal perturbations. To solve the boundary problem, i.e., to determine the stability limits of the flow under consideration and calculate the decrement spectrum, we use the Runge–Kutta–Merson method of step-by-step integration with the Gram–Schmidt orthogonalization. Calculations performed for a wide range of values of the parameter α ($0.5 \leq \alpha \leq 70$) show that instability of steady-state motion of the liquid with heavy particles is caused by the interaction of oppositely directed flows: the descending central flow and two ascending flows near the walls. Instability in the motion is produced by lower modes of hydrodynamic perturbations, while the decrements of normal perturbations prove to be complex (traveling perturbations). The settling particles generate oscillatory (traveling) perturbations and encourage their transport. With decrease in the parameter α the stability of the flow induced by particle settling decreases. In fact, at low α the particle distribution in the layer has a sharply expressed «tonguelike» character and the flow intensity is high; decrease in α leads to an increase in flow velocity and disruption of stability.

Reference

1. Burmistrova A. B., Dementiev O. N. Stability of steady-state flow of a liquid with a heavy impurity. – J. Appl. Mech. A. Tech. Phys. (PMTF). – 1986. – V. 27. No. 2.

6-19

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ КОНИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ, ПРИМЫКАЮЩИХ К ОБЛАСТИ ПОКОЯ

С. П. Баутин, С. Л. Дерябин, А. В. Мезенцев

ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей
сообщения, Екатеринбург, Россия

E-mail: SBautin@usurt.ru, SDeryabin@usurt.ru,

AMezentsev@usurt.ru

В данной работе рассматриваются трехмерные стационарные течения газа в некоторой окрестности конической контактной характеристики кратности два, разделяющей восходящий закрученный поток и покоящийся газ.

Для системы уравнений газовой динамики поставлена начально-краевая задача и доказана теорема существования и единственности решения в окрестности контактной поверхности. Решение начально-краевой задачи построено в виде рядов, сходящихся в окрестности контактной поверхности. Анализ первых коэффициентов ряда позволил получить закон сохранения: квадрат модуля вектора скорости газа на бихарактеристике контактной поверхности есть величина постоянная. Для определения коэффициентов ряда были получены системы дифференциальных уравнений с частными производными. Эти системы с помощью характеристического параметра были сведены к системам обыкновенных дифференциальных уравнений. Следовательно, было построено параметрическое решение поставленной начально-краевой задачи. Параметры газа на контактной поверхности и в ее окрестности и сама контактная поверхность восстанавливались численно.

MATHEMATICAL MODELING OF THE STATIONARY CONIC FLOWS ADJOINING THE DOMAIN OF REST

S. P. Bautin, S. L. Deryabin, A. V. Mezentsev

Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg,
Russia

E-mail: SBautin@usurt.ru, SDeryabin@usurt.ru,
AMezentsev@usurt.ru

In this study we look at three-dimension stationary gas flows in a neighborhood of the conic contact characteristics environment with ratio of two, dividing the upward swirling flow and gas at rest.

Initial-boundary value problem set for gas dynamics equations system and theorem of existence and singularity of solution in a neighborhood of the contact surface is proved. Solution of initial-boundary problem is constructed in form as the convergent series in a neighborhood of the contact surface. Analysis of first coefficients series helped acquire the conservation law: gas speed vector square module on contact surface is a constant value. For determining coefficients series was obtained system of equations with partial derivatives. This system with the help of the characteristic parameter was reduced for the system of ordinary differential equations. Thus was constructed parametric solution set initial-boundary value problem. Parameters of the gas at the contact surface and its surroundings and itself the contact surface was restored numerically.

6-20

ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ

А. Е. Дудоров¹, С. А. Хайбрахманов^{1,2}

¹Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

²Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Коуровская
астрономическая обсерватория, Екатеринбург, Россия

E-mail: khaibrakhmanov@csu.ru

Численно исследуются образование и эволюция протозвездных дисков в результате коллапса вращающихся протозвездных облаков с магнитным полем. Моделирование проводится с помощью двумерного численного МГД кода Enlil, в основе которого лежит явная квази-монотонная TVD-схема повышенного порядка точности [1]. В коде реализована модель расчета степени ионизации с учетом лучистых рекомбинаций и рекомбинаций на пылевых частицах. Проведены расчеты коллапса изначально однородного сферического протозвездного облака солнечной массы различными начальными значениями отношения тепловой, вращательной и магнитной энергий к модулю гравитационной энергии. Учитывается влияние омической диффузии и магнитной амбиполярной диффузии на эволюцию магнитного потока.

Расчеты показывают, что гравитационный коллапс протозвездного облака с сильным магнитным полем (отношение магнитной энергии к гравитационной 0,4) приводит к образованию сплюснутой оболочки с внутренним диском. Соотношение осей оболочки составляет 1:2, радиус внутреннего протозвездного диска – 1000–3000 астрономических единиц, отношение толщины внутреннего диска к радиусу 1:10. Степень ионизации составляет $\sim 10^{-15}$ во внутренней части протозвездного диска, на расстояниях от 50–100 астрономических единиц протозвезды. Это означает, что область эффективной диффузии магнитного поля (т. н. «мертвая» зона) образуется еще на стадии протозвездного диска. Интенсивность магнитного поля B в протозвездном диске зависит от плотности как $B \propto \rho^{1/2}$. Подобная зависимость следует из кинематической МГД-модели аккреционных дисков Дудорова и Хайбрахманова [2]. В центральной части протозвездного диска интенсивность магнитного поля составляет 0,01–0,1 Гс при плотности газа 10^{-13} г/см³, что подтверждает результаты кинематической МГД-модели аккреционных дисков.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 15-12-10017).

Литература

1. Дудоров А. Е., Жилкин А. Г., Кузнецов О. А. (1999) Матем. Мод. 11(11), 109.
2. Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A. (2014) *Astrophys. Space. Sci.* 352(1), 103.

THE FORMATION AND EVOLUTION OF PROTOSTELLAR DISCS

A. E. Dudorov¹, S. A. Khaibrakhmanov^{1,2}

¹Chelyabinsk state university, theoretical physics department,
Chelyabinsk, Russia

²Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin, Kourovka astronomical observatory,
Ekaterinburg, Russia

E-mail: khaibrakhmanov@csu.ru

The formation and evolution of the protostellar discs as a result of the collapse of the magnetic rotating protostellar clouds is numerically investigated. The simulations are carried out with the help of the two-dimensional numerical MHD code Enlil based on the explicit monotonic high resolution TVD-scheme [1]. Model of the ionization fraction calculation considering radiative recombinations and the recombinations on the dust grains is implemented in the code. We performed the simulations of the collapse of the initially uniform spherical solar mass protostellar clouds with different initial ratios of the thermal energy, rotational energy and magnetic energy to the modulus of the gravitational energy. The influence of Ohmic diffusion and magnetic ambipolar diffusion on the magnetic flux evolution is considered.

The simulations have shown that the collapse of the protostellar cloud with strong magnetic field (the ratio of the magnetic energy to the gravitational energy is 0.4) leads to the formation of the flattened envelope with inner disc. The axes ratio of the envelope is 1:2, the inner disc has radius 1000–3000 astronomical units and the ratio of height to radius 1:10. The ionization fraction is $\sim 10^{-15}$ in the inner part of the disc, at the distances 50–100 astronomical units from the star. This means that the region of efficient magnetic diffusion (so-called «dead» zone) forms at the stage of the protostellar discs. The dependence of the magnetic field strength B on the density in the protostellar discs is $B \propto \rho^{1/2}$. Similar dependence follows from the kinematic MHD model of the accretion discs of Dudorov and Khaibrakhmanov [2]. The magnetic field strength is 0.01–0.1 G in the central part of the disc with density 10^{-13} г/см³, which confirms result of the kinematic MHD model of the accretion discs.

Acknowledgements. The work is supported by Russian science foundation (project No 15-12-10017).

References

1. Dudorov A. E., Zhilkin A. G., Kuznetsov O. A. (1999) *Matem. Mod.* 11(11), 109 (in Russian).
2. Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A. (2014) *Astrophys. Space. Sci.* 352(1), 103.

6-21

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМУ

Е. А. Берендеев, В. А. Вшивков,
Г. И. Дудникова, А. А. Ефимова

Институт вычислительной математики и математической
геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: berendejev@ssd.sccc.ru, vsh@ssd.sccc.ru,
dudn@ict.nsc.ru, efimova@ssd.sccc.ru

Работа посвящена численному моделированию генерации электромагнитного излучения в системе электронный пучок-плазма. Рассматриваемый физический процесс описывается уравнениями Власова для функций распределения заряженных частиц и системой уравнения Максвелла. Для решения кинетических уравнений Власова используется метод частиц в ячейках. Решение задачи рассматривается в области прямоугольной формы с открытыми границами, которая заполнена однородной неподвижной плазмой с продольным магнитным полем, и в которую через левую границу непрерывно входит релятивистский электронный пучок малой плотности. В поперечном к пучку направлении плазма окружена вакуумом. Алгоритм входа-выхода пучка через границы расчетной области основан на создании специальных буферных зон, в которых постоянно поддерживается начальное распределение плазмы. Созданные методы диагностики получаемых решений включают контроль баланса энергии пучка и плазмы в области моделирования и в буферах а так же спектральный анализ электромагнитного излучения в вакуумной области. На границах области моделирования использованы поглощающие граничные условия (ПГУ). Было рассмотрено несколько типов ПГУ: простой поглощающий слой, свободный выход плоской волны и ПГУ Мура 1-го рода. Создан алгоритм параллельных вычислений, позволяющий проводить расчёты на современных вычислительных комплексах массивно-параллельной архитектуры. Были проведены тестовые расчёты по определению спектра электромагнитных волн, генерируемых в процессе взаимодействия плазма-электронный пучок, определён характерный размер и амплитуда волн в зависимости от параметров пучка и плазмы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 16-31-00304, 16-01-00209).

**NUMERICAL SIMULATION OF GENERATION
OF ELECTROMAGNETIC RADIATION
BY CONTINUOUS INJECTION
OF ELECTRON BEAM IN PLASMA**

E. A. Berendeev, V. A. Vshivkov,
G. I. Dudnikova, A. A. Efimova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical
Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: berendeev@ssd.sccc.ru, vsh@ssd.sccc.ru,
dudn@ict.nsc.ru, efimova@ssd.sccc.ru

The work is devoted to numerical simulation of generation of electromagnetic radiation in electron beam-plasma system. The physical process is described by the Vlasov equations for the distribution functions of charged particles, and Maxwell's equations. In order to solve the kinetic Vlasov equations the particle-in-cell (PIC) method is used. The computation area has a rectangular shape with open borders, which is filled by homogeneous plasma with stationary longitudinal magnetic field. Relativistic electron beam of low density is continuously injected through the left boundary of the area. The plasma is surrounded by a vacuum in the transverse direction to the beam. The algorithm of the beam input-output through the boundary is based on the creation of special buffer zones, which is maintained the initial plasma distribution. Created diagnostic methods produced solutions that include beam energy balance control and plasma modeling, and buffers as well as spectral analysis of electromagnetic radiation in the vacuum area. An absorbing boundary conditions are used at the boundaries of the area. We consider three types the absorbing boundary conditions: a simple absorbing layer, a free exit of the plan wave and the Mur absorbing boundary conditions. The algorithm of parallel computing which allows carrying out calculations on supercomputer systems with massively parallel architecture is developed. Calculations were performed to determine the spectrum of electromagnetic waves generated during the interaction. The electron beam plasma, the characteristic wave amplitude is defined with depending on the parameters of the beam and plasma.

The present work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under Grant number 16-31-00304, and 16-01-00209.

6-22

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ
ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО
ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА**

С. П. Баутин, В. Ф. Габдулхаев, В. Е. Замыслов,
О. Д. Зорина, П. А. Козлов, П. П. Скачков

ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей
сообщения, Екатеринбург, Россия

E-mail: SBautin@math.usurt.ru

В работе рассматривается полная система уравнений Навье–Стокса [1] для описания одномерных и многомерных течений сжимаемого вязкого теплопроводного идеального газа в случае постоянных значений коэффициентов вязкости и теплопроводности. В качестве независимых термодинамических переменных берутся удельный объем и давление. 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. Такой подход дает возможность строить приближенные решения полной системы уравнений Навье–Стокса как бесконечные суммы гармоник по пространственной переменной с коэффициентами, зависящими от времени [2–4]. Для коэффициентов выписаны бесконечные системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Показано, что при условиях теплоизоляции и прилипания на границах расчетной области по пространственным переменным решения этих систем представляют собой сумму стоячих волн с кратными частотами. Описана алгебраическая структура множества кратных частот в решении, зависящая 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 [3]. Соответствующий факт установлен и для трехмерных нестационарных течений.

При учете конечного числа гармоник численно построены конкретные решения соответствующих конечных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. В частности, смоделировано движение бегущего ударного перехода, не имеющего существенных осцилляций в районе его фронта [4].

Литература

1. Баутин С. П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике. Новосибирск: Наука, 2009. 368 с.
2. Баутин С. П., Замыслов В. Е. Представление приближенных решений полной системы уравнений Навье–Стокса

в одномерном случае // Вычислительные технологии. 2012. Том 17. № 3. С. 3–12.

3. Замыслов В. Е. Стоячие волны как решения полной системы уравнений Навье–Стокса в одномерном случае. // Вычислительные технологии. 2013. Том 18. № 2. С. 33–45.

4. Баутин С. П., Замыслов В. Е., Скачков П. П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. Новосибирск: Наука, 2014.

USE TRIGONOMETRIC SERIES IN APPROXIMATING FLOWS VISCOUS HEAT CONDUCTING GAS

S. P. Bautin, V. F. Gabdulhaev, V. E. Zamylov,
O. D. Zorina, P. A. Kozlov, P. P. Skachkov

Ural State University of Railway Transport, Russia,
Ekaterinburg

E-mail: SBautin@math.usurt.ru

The paper deals with the complete system of Navier–Stokes equations [1] for the description of one-dimensional and multi-dimensional flows of a compressible viscous heat-conducting ideal gas in the case of constant values of viscosity and thermal conductivity. The specific volume and the pressure taken as an independent thermodynamic variables. In this case, the complete system of Navier–Stokes equations written in normal form with respect to the time derivatives of the unknown functions, and the right sides are polynomial type with quadratic nonlinearities. This approach makes it possible to construct approximate solutions of the complete system of Navier–Stokes equations as an infinite sum of harmonic in the space variable with coefficients depending on time [2–4]. For the coefficients are written infinite systems of ordinary differential equations.

It is shown that under the conditions of thermal insulation and sticking to the boundaries of the region in the space variables of these systems solutions represent the sum of standing waves with multiple frequencies. We describe the algebraic structure of the set of multiple frequencies in the solution depends on the harmonic frequencies included in the initial conditions. An explanation of the mechanism of mutual influence on each other harmonics with different frequencies. This fact is confirmed by the calculations of difference solutions of the corresponding initial-boundary value problems for the full Navier–Stokes equations in the traditional thermodynamic variables: density and temperature [3]. The relevant fact has been established for three-dimensional unsteady flows.

In accounting for a finite number of harmonics numerically built specific solutions relevant end systems of ordinary differential equations. In particular, the simulated movement of the running of the shock transition without having substantial oscillations in the vicinity of its front [4].

References

1. Boutin S. P. The characteristic Cauchy problem and its application to gas dynamics. Novosibirsk: Nauka, 2009. 368 s.
2. Boutin S. P., Zamylov V. E. Presentation of the approximate solutions of the complete system of Navier–Stokes equations in the one-dimensional case // Computational technologies. 2012. Vol 17. № 3. S. 3–12.
3. Zamylov V. E. Standing waves as the solution of the complete Navier–Stokes equations in the one-dimensional case. // Computational technologies. 2013. Vol 18. № 2. S. 33–45.
4. Boutin S. P., Zamylov V. E., Skachkov P. P. Mathematical modeling of the trigonometric series of one-dimensional flows of a viscous heat-conducting gas. Novosibirsk: Nauka, 2014.

6-23

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МНОГОМАТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЫ С ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ НЕУСТОЙЧИВОСТЯМИ

К. Е. Городничев, П. П. Захаров,
С. Е. Куратов, И. С. Меньшов

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

В докладе представлено дальнейшее развитие метода конечного объема гоудуновского типа для расчета течения многоматериальной среды на фиксированных эйлеровых сетках [1]. В качестве математической модели используется система уравнений Эйлера, которая в области чистого течения замыкается уравнением состояния соответствующего материала. Для областей течения нескольких материалов используется смесевое уравнение состояния, полученное из допущения о равенстве давления и температуры.

Предлагаемый численный метод относится к классу методов сквозного счета. Для аппроксимации численного потока через грань, разделяющую две чистые ячейки расчетной сетки, применяются стандартные аппроксимации Годунова, Русанова и т. д. Для случая, когда к грани примыкает, по крайней мере, одна ячейка, содержащая несколько материалов, применяется аппроксимация с учетом подсеточной структуры на основе решения составной задачи Римана.

Возможности численного метода демонстрируются на расчетах задач, включающие явления гидродинамической неустойчивости разных типов (Рэля–Тэйлора, Рихтмайера–Мешкова, Кельвина–Гельмгольца). Рассматриваются задачи о схлопывании газовой полости в воде, о тройной точке, разгон и торможение оболочки при ЛТС, неустойчивость контактной границы при соударении разноплотных пластин [2].

Литература

1. Menshov I., Zakharov P. On the composite Riemann problem for multi-material fluid flows // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2014. – Т. 76. – №. 2. – С. 109–127.

2. Городничев К. Е., Куратов С. Е., Захаров П. П. Возмущение контактного разрыва при ударно-волновых процессах в средах с неоднородностью плотности. Доклад на конференции АФМ-2016, 5–7 декабря, Москва.

NUMERICAL MODELING OF MULTIMATERIAL MEDIUM FLOW WITH HYDRODYNAMIC INSTABILITIES

K. E. Gorodnichev, S. E. Kuratov,
I. S. Menshov, P. P. Zakharov

Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow,
Russia

Further development of the Godunov type purely Eulerian finite volume method for calculations of multimaterial medium is presented [1]. The mathematical model is Eulerian system with the proper equation of state in the domain of pure flow. In the domain of multimaterial flow we use the mixture equation of state obtained from the assumption of pressure and temperature equilibrium.

Suggested numerical method is of the shock/interface capturing type. For the cell interfaces separating two pure cells convenient numerical flux approximations as Godunov, Rusanov and etc. is employed. For the cell interfaces adjacent at least with one mix cell we regard sub-cell structure in the mix cell via flux approximation based the composite Riemann problem solution.

Numerical results presented concern the problems with hydrodynamic instabilities of different type (Rayleigh–Taylor, Richtmyer–Meshkov, Kelvin–Helmoltz). The problems of underwater bubble collapse, triple point problem, acceleration/deceleration of spherical shell in LFS, interface instability due to impact of density-perturbed [2].

References

1. Menshov Igor, and Pavel Zakharov. On the composite Riemann problem for multi-material fluid flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 76.2 (2014): 109–127.
2. Gorodnichev K. E., Kuratov S. E., Zakharov P. P. Interface perturbation under shock-wave processes in density non-uniform mediums. *AFM-2016 Conference Report*, 5–7 December, Moscow.

Численно в трехмерной постановке исследован процесс деформирования медных 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) и РФФИ (код проекта 16-43-700774).

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 С. А., 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.

NUMERICAL SIMULATION OF DEFORMATION OF COPPER SAMPLES UNDER DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING

S. A. Zelepugin^{1,2}, A. S. Bodrov¹,
A. S. Zelepugin^{1,2}, Yu. F. Khristenko¹

¹Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Tomsk Scientific Center SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: szel@yandex.ru, szel@dsm.tsc.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ

С. А. Зелепугин^{1,2}, А. С. Бодров¹,
А. С. Зелепугин^{1,2}, Ю. Ф. Христенко¹

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Томский научный центр СО РАН, Томск, Россия

E-mail: szel@yandex.ru, szel@dsm.tsc.ru

Deformation of copper 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) and the Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-43-700774).

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.

6-25

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

С. И. Кabanikhin, М. А. Шишленин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН,
Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия
E-mail: kabanikhin@sscc.ru, mshishlenin@ngs.ru

Коэффициентные обратные задачи для гиперболических уравнений имеют большое значение в сейсмике, акустике, электродинамике, поскольку позволяют определить неизвестные свойства среды, такие как плотность, скорость распространения волн, проводимость, диэлектрическую проницаемость и т. д. Эти задачи не являются классически корректными и требуют специальных методов регуляризации.

Методы решения обратных задач для гиперболических уравнений можно разделить на две основные группы: прямые и итерационные. К прямым относятся методы линеаризации, обращения конечно-разностных схем, И. М. Гельфанда, Б. М. Левитана и М. Г. Крейна, граничного управления и сингулярного разложения. Прямые методы позволяют определить неизвестные коэффициенты в фиксированной точке среды в случае, когда дополнительная информация задана в виде следа решения прямой задачи на временноподобной поверхности (например, на поверхности Земли). Прямые методы решения являются наиболее перспективными, поскольку в итерационных алгоритмах (методы градиентного спуска, метод Ньютона–Канторовича и др.) необходимо многократно решать соответствующие прямые и сопряженные задачи, что в многомерном случае является достаточно сложной проблемой.

В докладе будут рассмотрены методы решения обратных и некорректных задач для гиперболиче-

ских уравнений и приведены теоретические результаты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-01-09230, 16-29-15120), Министерства образования и науки Российской Федерации и Международного математического центра Новосибирского государственного университета.

NUMERICAL METHODS FOR SOLVING OF INVERSE PROBLEMS FOR HYPERBOLIC EQUATIONS

S. I. Kabanikhin, M. A. Shishlenin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, Novosibirsk, Russia
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
E-mail: kabanikhin@sscc.ru, mshishlenin@ngs.ru

Coefficient inverse problems for hyperbolic equations are very important in seismic, acoustics, electrodynamics, because they allow to determine the unknown properties of the medium such as density, speed of wave propagation, conductivity, dielectric permittivity, etc. These problems are not classically correct and require special methods of regularization.

Methods for solving inverse problems for hyperbolic equations can be divided into two main groups: direct and iterative. Direct methods include linearization, the finite-difference scheme inversion, I. M. Gelfand, B. M. Levitan and M. G. Krein, boundary control and singular value decomposition. Direct methods allow to determine the unknown coefficients in fixed point of the medium when inverse problem data is given in the form of a trace solution of the direct problem for time-like surfaces (e.g., on the surface of the Earth). Direct solution methods are the most promising, since in the iterative algorithms (gradient methods, the method of Newton-Kantorovich, etc.) we have to solve the direct and conjugate problems on each iteration step, that in the multidimensional case is a rather difficult problem.

We will discuss the methods of solving inverse and ill-posed problems for hyperbolic equations and the theoretical results.

The work is financial supported by RFBR (projects 15-01-09230, 16-29-15120), Ministry of education and science of the Russian Federation and the International mathematical center of Novosibirsk State University.

6-26

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ КОШИ
С НАЧАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ,
ОПИСЫВАЮЩЕЙ ЗАКРУТКУ ГАЗА**

А. О. Казачинский

Снежинский Физико-Технический Институт
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
«МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: a.kazachinskij@gmail.com

В данной работе для системы уравнений газовой динамики рассмотрена одна конкретная характеристическая задача Коши с начальными условиями на горизонтальной плоскости $z = 0$. При этом полагается равным нулю значение вертикальной составляющей ω вектора скорости газа при $z = 0$, то есть, газ через плоскость $z = 0$ не течет. В случае общих пространственных изэнтропических течений непроницаемая плоскость $z = 0$ является контактной характеристикой кратности 2.

Для того, чтобы рассматриваемая задача с начальными данными при $z = 0$ имела единственное решение, необходимо на другой поверхности задать 2 дополнительных условия. Для простоты рассмотрения будет взят случай, когда радиальная составляющая u вектора скорости газа будет полагаться постоянным отрицательным числом, а окружная v – нулем. При этом полагается, что на некотором цилиндре ненулевого радиуса u имеет постоянное отрицательное значение, а $v = 0$.

Решение задачи строится в виде начальных отрезков ряда со степенями z . Коэффициенты ряда зависят от остальных независимых переменных t, r, φ . Нулевые коэффициенты ряда удовлетворяют гиперболической системе уравнений с частными производными и не зависят от φ . Это позволяет численно построить нулевые коэффициенты методом характеристик. Остальные коэффициенты ряда определяются из линейных уравнений с частными производными. Это позволяет частично разделить переменные: зависимость от полярного угла φ задается в явном виде через конечное число гармоник с соответствующими частотами. Для искоемых коэффициентов, стоящих перед этими гармониками также получаются свои гиперболические системы уравнений с частными производными. Это тоже позволяет свести построение этих коэффициентов к численному решению соответствующих систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

**THE ANALYTICAL DECISION
OF THE CHARACTERISTIC TASK CAUCHY
WITH INITIAL DATA DESCRIBING
THE TURNING OF GAS**

A. O. Kazachinsky

Snezhinsk Physics and technology Institute National Research
Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia

E-mail: a.kazachinskij@gmail.com

In this operation for a system of equations of gas dynamics one specific characteristic objective of Cauchy with initial conditions on the horizontal $z = 0$ plane is considered. At the same time value of a vertical component ω a gas velocity vector is necessary equal to zero in case of $z = 0$, that is, gas through the $z = 0$ plane doesn't flow. In case of the general spatial isentropic currents the impenetrable $z = 0$ plane is the contact characteristic of a multiplicity 2.

In order that the considered task with initial data in case of $z = 0$ had the single decision, it is necessary to set 2 additional conditions on other surface. For simplicity of reviewing the case when radial component u of a velocity vector of gas relies with a constant negative number, and environing v – zero will be taken. At the same time it is necessary that on some cylinder of nonzero radius of u has constant negative value, and $v = 0$.

The decision of the task is built in the form of initial segments of a row with z levels. Coefficients of a row depend on remaining independent variables of t, r, φ . Zero coefficients of a row satisfy to a hyperbolic system of equations with private derivatives and don't depend from φ . It allows to construct numerically zero coefficients by method of characteristics. Remaining coefficients of a row decide from the linear equations on private derivatives. It allows to separate variables partially: dependence on vectorial angle φ is set in an explicit form through a finite number of harmonicas with the corresponding frequencies. For the required coefficients facing these harmonicas also the hyperbolic systems of equations with private derivatives turn out. It allows to reduce creation of these coefficients to the numerical solution of the appropriate systems of ordinary differential equations too.

6-27

О ПОСТРОЕНИИ ДОПУСТИМЫХ УПРАВЛЕНИЙ В НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

И. Н. Кандоба, И. В. Козьмин

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского
УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: kandoba@imm.uran.ru, ikozmin@imm.uran.ru

Рассматриваются вопросы построения допустимых программных управлений в одной задаче оптимального выведения ракеты-носителя (РН) на заданную околоземную эллиптическую орбиту. На управление и текущее фазовое состояние нелинейной динамической системы, описывающей управляемое движение РН, накладывается ряд ограничений.

Математическая модель движения РН включает уравнения поступательного движения центра масс носителя и уравнения его вращательного движения как твердого тела. Управлениями служат скорости изменения углов поворота продольных осей камер рулевых двигателей РН. Искомое управление должно обеспечивать выведение РН на заданную орбиту за минимальное время и выполнение всех требований к текущему фазовому состоянию системы.

Для построения допустимых в указанной выше, основной, задаче управлений применяются подходы, основанные на методологии решения задач управления с поводиром [1]. В качестве поводира предлагается использовать упрощенную нелинейную динамическую систему, описывающую поступательное движение центра масс РН. Управляющими параметрами для упрощенной системы являются скорости изменения углов тангажа и рыскания, определяющих пространственную ориентацию строительной оси РН. Наряду с основной задачей рассматривается вспомогательная задача быстрогодействия для упрощенной системы. Для этой задачи известен [2] метод построения субоптимального (базового) управления, которое обеспечивает выведение центра масс РН на заданную орбиту за время, близкое к минимальному. Для нахождения допустимых в основной задаче управлений разработан метод, существенно использующий базовое управление для упрощенной системы и специфику уравнений, описывающих в исходной, более сложной, системе вращательное движение РН как твердого тела. Приводятся результаты численного моделирования с использованием реальных данных.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Математические задачи современной теории управления».

Литература

1. Красовский Н. Н., Субботин А. И. Позиционные дифференциальные игры. М.: Наука, 1974. 456 с.
2. Мазгалин Д. В. Построение способа управления ракетой-носителем при использовании в качестве управления про-

граммных угловых скоростей разворотов // Информационно-управляющие системы. 2010. №3 (46). С. 21–29.

ON CONSTRUCTING ADMISSIBLE CONTROLS IN A NONLINEAR OPTIMAL TIME PROBLEM WITH PHASE CONSTRAINTS

I. N. Kandoba, I. V. Kozmin

Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS,
Ekaterinburg, Russia

E-mail: kandoba@imm.uran.ru, ikozmin@imm.uran.ru

Questions of constructing admissible program controls in a problem of injecting a carrier rocket (a launcher) into a given circumglobal elliptic orbit are considered. The controlled motion of the launcher is described by a nonlinear dynamical system. There are some constraints on the control and the system's phase state.

The mathematical model of the motion of the launcher includes the equations of translational motion of the mass center and the equations of rotation of the launcher as a solid. Velocities of changing the rotation angles of the longitudinal axes of control engine chambers are used as controls. The desired control has to provide injecting the launcher into the orbit in a minimal time and meeting all the requirements imposed on the current phase state of the system.

To construct admissible controls in the main problem, approaches based on the methodology of solving control problems with a guide [1] are applied. A simplified nonlinear dynamical system describing the translational motion of the mass center of the launcher is suggested as a guide. Velocities of changing the pitch and prowl angles are control parameters for this system. These angles determine the space orientation of the launcher building axis. Along with the main problem, an additional optimal time problem for the simplified system is considered. An algorithm for constructing a suboptimal (base) control in the additional problem is known [2]. This control provides injecting the launcher into the given orbit in a time close to minimal. To find admissible controls in the main problem, a method using the base control for the simplified system and the specific properties of the original system is developed. Results of some numerical experiment with the use of real data are presented.

The work was supported by the Program of the Presidium of RAS «Mathematical problems of the modern control theory».

References

1. N. N. Krasovskii, A. I. Subbotin. Positional differential games. M.: Nauka, 1974. 456 p.
2. D. V. Mazgalin. Designing a method to control carrier rocket when angular velocity of rotation is used as a control program // Information and Control Systems. 2010. No 3(46). p. 21–29.

6-28

ОБОБЩЕНИЕ ЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОЛНЫ РИМАНА ПРИ УЧЕТЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

А. С. Кирьянова

ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей
сообщения, Екатеринбург, Россия

E-mail: ASKiryanova@usurt.ru

В работе рассматриваются двумерные плоско- и цилиндрически симметричные изэнтропические течения политропного газа примыкающие к вакууму в условиях действия силы тяжести [1, 2]. В качестве математической модели используются системы уравнений газовой динамики. Для постановки задачи о распаде специального разрыва в системах делается вырожденная замена переменных, а именно: зависящие и независимые переменные меняются ролями [1, 2]. В новых переменных для систем ставятся начально-краевые задачи с данными на звуковой характеристике и дополнительным условием. Это условие описывает мгновенное разрушение непроницаемой стенки, отделяющей в начальный момент времени газ от вакуума. Доказываются теоремы существования и единственности поставленных начально-краевых задач в окрестности звуковой характеристики. Далее решения строятся в виде степенных рядов. Для определения коэффициентов рядов выписываются и интегрируются системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Анализ структуры коэффициентов рядов показал, что для показателей политропы $\gamma > 1$ в плоско-симметричном и $1 < \gamma < 3$ в цилиндрически симметричном случаях ряды сходятся во всей области течения от звуковой характеристики до границы газ-вакуум включительно. Для определения закона движения границы газ-вакуум выписаны квазилинейные системы уравнений с частными производными, которые с помощью характеристического параметра сводятся к системам обыкновенных дифференциальных уравнений [3]. После интегрирования последних систем в параметрическом виде получен закон движения границ газ-вакуум и значения параметров газа на них.

Литература

1. Баутин С. П., Дерябин С. Л. Математическое моделирование истечения идеального газа в вакуум. Новосибирск. Наука, 2005. 390 с. ISBN 5-02-032505-8.
2. Баутин С. П., Дерябин С. Л., Мезенцев А. В., Чуев Н. П. Начально-краевые задачи для моделирования сплошной среды с особенностями на свободной границе. Новосибирск. Наука, 2015. 191 с. ISBN 978-5-94614-333-2.
3. Дерябин С. Л., Мезенцев А. В. Численно-аналитическое моделирование газовых течений, примыкающих к вакууму в условиях действия сил тяготения и Кориолиса. Вычислительные технологии. 2010. – Т. 15. № 5. С. 51–71

GENERALIZATION OF A CENTERED RIEMANN WAVE INTO ACCOUNT THE FORCES OF GRAVITY

A. S. Kiryanova

Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg,
Russia

E-mail: ASKiryanova@usurt.ru

The paper examines two-dimensional plane-symmetric and the cylindrically symmetric isentropic flow of a polytropic gas under the action of gravity [1, 2]. As a mathematical model uses systems of equations of gas dynamics. To put the problem of decay of a special break in the systems becomes degenerate change of variables, namely: dependent and independent variables change roles [1, 2]. In the new variables for the systems is put initial-boundary value problem with data on the characteristics of the sound and the additional condition. This condition describes the instantaneous destruction of the impermeable wall separating the initial time the gas from the vacuum. We prove the existence and uniqueness of the initial-boundary value problem in the vicinity of the sound characteristics. Next, the solution is constructed in the form of a power series. To determine the coefficients of the series are written and integrated systems of ordinary differential equations. Analysis of the structure of the coefficients of the series showed that the polytropic index $\gamma > 1$ in plane-symmetrical and $1 < \gamma < 3$ cylindrically symmetric case series converge in the entire region of the flow of the sound characteristics to the boundary of the vacuum gas-inclusive. To determine the law of motion of gas-vacuum boundary issued quasi-linear systems of partial differential equations, which by means of a characteristic parameter is reduced to systems of ordinary differential equations [3]. After integration of the latter system in parametric form obtained law of motion of gas-vacuum boundary values and parameters of the gas on it.

References

1. Bautin S. P., Deryabin S. L. Matematicheskoe modelirovanie istecheniya ideal'nogo gaza v vakuum [Mathematical modeling expiration ideal gas into vacuum]. Novosibirsk: Nauka, 2005. 390 p. ISBN 5-02-032505-8. (in Russian)
2. Bautin S. P., Deryabin S. L., Mezentsev A. V., Chuev N. P. Nachal'no-kraevye zadachi dlya modelirovaniya sploshnoj sredy s osobennostyami na svobodnoj granice [Initial-boundary value problem for the simulation of a continuous medium with the features of the free edge]. Novosibirsk: Nauka, 2015. 191 p. ISBN 978-5-94614-333-2. (in Russian)
3. Deryabin S. L., Mezentsev A. V. Computational and analytic modeling of gas flows adjacent to vacuum under the action of gravity and Coriolis. Vychislitel'nye tekhnologii – Computational technologies. 2010. – Vol. 15. № 5. Pp. 51–71. (in Russian)

6-29

**ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ
ЗАДАЧ РАСШИРЕНИЯ (СЖАТИЯ)
ПОЛЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ
ШАРОВ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБ
ИЗ НЕСЖИМАЕМЫХ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

А. Б. Киселев

Механико-математический факультет МГУ
имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: akis2006@yandex.ru

В работе получены новые точные решения одномерных задач расширения и сжатия полых толстостенных двухслойных сферических шаров и цилиндрических труб из несжимаемых вязкопластических материалов под действием внешних и внутренних динамических нагрузок. Решения получены в лагранжевых переменных и легко обобщаются на случай большого числа слоёв, что важно для ряда технических приложений.

Они могут использоваться для расчета параметров напряженно-деформированного состояния конструкций, их разогрева, для оценки вклада вязкости в диссипацию энергии и момента начала макроразрушения (естественно, необходимо выбрать тот или иной критерий разрушения, например, по предельной удельной диссипации). Эти решения могут применяться для тестирования программ компьютерного моделирования и оценки эффективности новых численных методов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-01-01541а).

**EXACT SOLUTIONS
OF THE ONE-DIMENSIONAL PROBLEMS
OF EXPANSION AND COMPRESSION HOLLOW
TWO-LAYERS SPHERES AND CYLINDRICAL
TUBES MADE OF INCOMPRESSIBLE
VISCOPLASTIC MATERIALS
UNDER THE ACTION OF DYNAMICAL
LOADINGS**

А. В. Kiselev

Mechanics and Mathematics Faculty
of Moscow Lomonosov State University, Moscow, Russia

E-mail: akis2006@yandex.ru

In present paper exact solutions of the one-dimension problems of expansion and compression hollows two-layers spheres and cylindrical tubes made of incompressible viscoplastic materials under the action of external and internal dynamical loadings are obtained. These solutions are obtained with use Lagrange coordinates and easy generalized for case more numbers of layers that importuned for some technical applications.

These solutions can be used for calculate the parameters of the stress-strain state of structure, their heating up, and to estimate the contribution of viscosity to the energy dissipation and the instant when fracture begins (naturally, one must choose the fracture criterion, for example, criterion of limiting specific dissipation). They can also be used to test numerical calculation programmers and to estimate the effectiveness of new numerical methods.

This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (15-01-01541a).

6-30

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СФЕРИЧЕСКИХ
УДАРНЫХ ВОЛН С МЕХАНИЧЕСКИМИ
И ТЕПЛОВЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ
ВБЛИЗИ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Н. Л. Клиначева, Ю. М. Ковалев

Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

E-mail : klinachevsv@is74.ru; yum_kov@mail.ru

Данная работа посвящена математическому моделированию явления, связанного со взаимодействием ударных волн с механическими и тепловыми неоднородностями вблизи плоской поверхности. Это может быть поверхность Земли с лесным массивом. Широко известный пример – изучение Тунгусского явления. Анализ характерной формы вывала деревьев позволил указать параметры Тунгусского болида. При входе космического тела в плотные слои атмосферы происходит резкое торможение тел, в ударном слое создается давление порядка тысячи атмосфер, возникают большие лучистые и тепловые потоки. Внутри тела появляются значительные массовые силы инерции; под действием высоких механических и термических напряжений происходит полное или частичное разрушение тела с выделением энергии. Взаимодействие лучистой энергии с кронами деревьев приводит к выделению газообразных продуктов пиролиза и их воспламенению. Поэтому пришедшая ударная волна будет взаимодействовать и с механическими неоднородностями, и с тепловыми. В связи с большими трудностями экспериментального изучения разрушения движущихся тел большое значение приобретают методы математического моделирования процессов, определяющих поведение космических тел в атмосфере. В данной работе решена модельная задача о взаимодействии сферических ударных волн с механическими [1] и тепловыми неоднородностями вблизи плоской поверхности [2]. Задача решалась модифицированным методом крупных частиц [3], позволяющим решать задачи о движении ударных волн в газозвесах с достаточно большим числом Куранта. Было показано существенное различие формы фронта отраженной ударной волны для рассмотренных случаев.

Литература

1. Ковалев Ю. М., Пигасов Е. Е. Математическая модель газовзвеси с химическими превращениями в приближении парных взаимодействий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2014. Т. 7. № 3. С. 40–49.
2. Ковалев Ю. М., Черемохов А. Ю. Взаимодействие плоской ударной волны с нагретым слоем газа // Доклады Академии наук. 1999. Т. 367. № 6. С. 769–771.
3. Грищенко Д. С., Ковалев Ю. М., Ковалева Е. А. Модификация метода крупных частиц для исследования течений газовзвесей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2015. Т. 8. № 2. С. 36–42.

THE INTERACTION OF SPHERICAL SHOCK WAVES WITH MECHANICAL AND THERMAL HETEROGENEITIES CLOSE TO A FLAT SURFACE

N. L. Klinacheva, Yu. M. Kovalev

South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russia

E-mail : klinachevsv@is74.ru; yum_kov@mail.ru

This paper is devoted to the mathematical modeling of the phenomenon associated with the interaction of shock waves with mechanical and thermal heterogeneities close to a flat surface, such as the surface of the Earth covered with forest. A widely known example is the study of the Tunguska phenomenon. The analysis of the data collected on the mean direction of the fallen trees allowed to specify the parameters of the Tunguska bolide. When entering the dense layers of the atmosphere, a space body drastically loses its speed. The resulting pressure in the shock layer can measure up to thousands of atmospheres; significant radiant heat flows and inertia forces are generated. Due to high mechanical and thermal stresses inside the body, its complete or partial destruction occurs, accompanied by the release of energy. The interaction of the radiant energy with the trees leads to the release of gaseous products of pyrolysis and ignition. As a result, the emerging shock wave interacts with both mechanical and thermal heterogeneities. In view of the difficulties encountered with regard to the experimental study of the moving body fracture, mathematical modeling of the processes that determine the behavior of cosmic bodies in the atmosphere has assumed great importance. In this work, we introduced a model for simulating the interaction of spherical shock waves with mechanical [1] and thermal [2] heterogeneities close to a flat surface. The problem was solved by a modified method of large particles [3] allowing to solve the problem of the motion of shock waves in gas suspensions with a sufficiently large Courant number. There was a significant difference between the shapes of the reflected shock-wave front for the considered cases.

References

1. Kovalev Yu. M., Mathematical model of the gas suspension with the chemical transformations in the pair interactions / Yu. M. Kovalev, E. E. Pigasov // Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming. – 2014 – V. 7, No. 3. – pp. 40–49.
2. Kovalev Yu. M. Interaction of a plane shockwave with a heated gas layer / Yu. M. Kovalev, A. Yu. Cheremokhov // Doklady Physics. 1999. T. 44. № 8. С. 582–584.
3. Grishchenko D. S. Modification of Method of Large Particles for Research of Currents of Gas-Suspensions / D. S. Grishchenko, Yu. M. Kovalev, E. A. Kovaleva, // Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming. – 2015 – V. 8, No. 2. – pp. 36–42.

6-31

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ

П. А. Козлов

ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей
сообщения, Екатеринбург, Россия

Моделируются одномерные и двумерные плоско-симметричные течения газа решением полной системы уравнений Навье–Стокса, строящейся с использованием бесконечных тригонометрических рядов по пространственным переменным [1]. Эта методика использована для решения специально выбранных начально-краевых задач для полной системы уравнений Навье–Стокса в одномерном и двумерном случаях.

В выбранных условиях на границах отрезка пространственной переменной автоматически выполняются условия прилипания и теплоизоляции.

Решение представляется таким образом, что тригонометрические ряды по пространственным переменным с неизвестными коэффициентами добавляются к указанному фоновому течению. Коэффициенты бесконечных сумм есть искомые функции, зависящие только от времени в качестве переменной.

Например, в случае двух измерений, для функции удельного объема (δ), представление имеет следующий вид:

$$\delta(t, x, y) = \delta_0^0 + \delta_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{k,1}(t) \cos kx + \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{k,2}(t) \cos ky,$$

где x, y – пространственные переменные, t – время, δ_0^0 – заданная константа, $\delta_0(t)$, $\delta_{k,1}(t)$, $\delta_{k,2}(t)$ – искомые коэффициенты. Подобным образом получают представления для функций скорости (u, v) и давления (p). После проецирования функций на бесконечном базис, получаем систему обыкновенных

дифференциальных уравнений (СОДУ) для $\delta_0(t)$, $\delta_{k,i}(t)$, $u_{k,i}(t)$, $v_{k,i}(t)$, $p_0(t)$, $p_{k,i}(t)$, $i = 1, 2$.

Посредством преобразований, система сводится к форме, содержащей одиночные суммы вместо двойных, в результате чего требуется гораздо меньшее количество арифметических операций в расчете правых частей при решении СОДУ по сравнению с первоначальным представлением.

Берутся конечные отрезки бесконечных тригонометрических рядов с требуемой точностью (K слагаемых), строится СОДУ с конечным числом уравнений и конечным числом искоемых функций.

Распараллеливание производится по следующему принципу: управляющий процессор осуществляет прием и передачу данных, а управляемые процессоры вычисляют каждый свое уравнение СОДУ.

Литература

1. Баутин С. П., Замыслов В. Е., Скачков П. П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. – Новосибирск: Наука, 2014. – 90 с.

SIMULATION OF VISCOUS HEAT-CONDUCTING GAS USING TRIGONOMETRIC SERIES AND NUMERICAL METHODS FOR SOLVING OF PARALLELIZATION

P. A. Kozlov

Ural State University of Railway Transportation, Ekaterinburg,
Russia

Simulated one-dimensional and two-dimensional plane-symmetric gas flow solution of the complete system of Navier–Stokes, built with infinite trigonometric series in the space variables [1]. This technique is used to solve a specially selected initial value problems for the full Navier–Stokes equations in the one-dimensional and two-dimensional cases.

The selected conditions at the boundaries of the segment spatial variable automatically satisfies the conditions of adhesion and insulation.

The solution seems so that the trigonometric series in the spatial variables with unknown coefficients added to said background current. The coefficients of infinite sums have unknown functions that depend only on the time as a variable.

For example, in the case of the two measurements for the specific volume function (δ), representation is as follows:

$$\delta(t, x, y) = \delta_0^0 + \delta_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{k,1}(t) \cos kx + \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{k,2}(t) \cos ky,$$

where x, y – the spatial variable, t – time, δ_0^0 – given constant, $\delta_0(t)$, $\delta_{k,1}(t)$, $\delta_{k,2}(t)$ – the required ratios. Similarly, the rate obtained for presentation functions (u, v) and pressure (p). After the projection functions on infinite-dimensional basis, we obtain a system of ordi-

nary differential equations (SODE) for $\delta_0(t)$, $\delta_{k,i}(t)$, $u_{k,i}(t)$, $v_{k,i}(t)$, $p_0(t)$, $p_{k,i}(t)$, $i = 1, 2$.

The system reduces to a more simple form, thereby requiring a much smaller number of arithmetic operations in the calculation of the right sides in solving SODE compared to the original presentation.

Undertake the segments of infinite trigonometric series with the required accuracy (K terms) SODE constructed with a finite number of equations and finite number of unknown functions.

Parallelization is done in the following way: the control processor carries out reception and transmission of data and control processors perform calculations on each equation of its SODU.

References

1. Boutin S. P., Zamyslov V. E., Skachkov P. P. Mathematical modeling of the trigonometric series of one-dimensional flows of a viscous heat-conducting gas. – Novosibirsk: Nauka, 2014. – 90 p.

6-32

ОСНОВАННАЯ НА МЕТОДЕ МОНТЕ–КАРЛО ОЦЕНКА ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД

А. Б. Коновалов, С. В. Кольчугин, Р. Ф. Мухамадиев,
В. В. Власов, Г. Н. Малышкин

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

E-mail: a_konov@mail.vega-int.ru

Традиционный подход к определению матрицы весовых коэффициентов (матрицы чувствительности) для решения обратной задачи рентгеновской томографии основан на линейном (проеекционном) приближении и сводится к дискретизации интегрального уравнения Радона. В действительности же такие эффекты как комптоновское рассеяние рентгеновских квантов и образование пар электрон-позитрон вносят нелинейные искажения в характер зависимости регистрируемых проекционных данных от искомого коэффициента ослабления излучения. В условиях, когда для просвечивания объектов с большим атомным номером используется мегаэлектронвольтовый источник [1], а число ракурсов съемки сильно ограничено [2, 3], эти искажения существенно влияют на точность реконструкции томографических изображений. В настоящем докладе предложен метод расчета весовых коэффициентов с помощью программы ПРИЗМА [4]. Дано теоретическое обоснование метода, в основе которого вероятностная интерпретация процесса транспортировки энергии квантами через вещество от источника к приемнику. Показано, что для выбранной связи источник-приемник весовой коэффициент, характери-

зующий вклад в сигнал ячейки дискретизации области реконструкции, прямо пропорционален доле пересекающих ячейку траекторий из числа всех траекторий квантов, зарегистрированных приемником. С целью обоснования эффективности предложенного метода поставлен численный эксперимент по реконструкции сферического фантома из плутония с воздушными полостями и 25%-ым перепадом плотности. Показано, новый метод расчета весовых коэффициентов в случае реконструкции по 9-ти ракурсам позволяет получать томограммы более высокого качества, нежели метод, основанный на линейном приближении.

Литература

1. Коновалов А. Б., Власов В. В. Оценка геометрических параметров и допустимого уровня шума томографа с мегаэлектронвольтовым источником электронов // Сборник материалов 12-й Международной конференции «Забабакхинские научные чтения». – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ. – 2014. – С. 299.
2. Konovalov A. B., Vlasov V. V. Spatial resolution analysis for few-views discrete tomography based on MART-AP algorithm // ISRN Sign. Process. – 2013. – V. 2013. – P. 356291-1–356291-7.
3. Vlasov V. V., Konovalov A. B., Uglov A. S. Few-views image reconstruction with SMART and an allowance for contrast structure shadows // Proc. 16th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, Lecture Notes in Computer Sciences. – 2015. – V. 9256. – P. 667–677.
4. Kandiev Y. Z., Kashaeva E. A., Khatuntsev K. E., Kuropatenko E. S., Lobanova L. V., Lukin G. V., Malakhov A. A., Malyshkin G. N., Modestov D. G., Mukhamadiev R. F., Orlov V. G., Samarin S. I., Serova E. V., Spirina S. G., Vakhonina T. V., Voronina N. A., Zatsepin O. V. «PRIZMA» Status // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – V. 82. – P. 116–120.

MONTE CARLO BASED ESTIMATION OF WEIGHT COEFFICIENTS FOR FEW-VIEWS TOMOGRAPHY OF STRONGLY ABSORBING MEDIA

A. B. Konovalov, S. V. Kolchugin, R. F. Mukhamadiev,
V. V. Vlasov, G. N. Malyshkin

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

E-mail: a_konov@mail.vega-int.ru

A traditional approach to determining the matrix of weight coefficients (sensitivity matrix) for the inverse X-ray tomography problem is based on linear (projection) approximation and reduces to discretization of the Radon integral equation. However in reality, such effects as Compton scattering and electron-positron pair production induce nonlinear disturbances in the dependence of recorded projection data on the sought attenuation coefficient. When a mega-electron-volt source [1] is used for X-raying objects with large atomic numbers and views are very limited [2, 3], the disturbances strongly affect image reconstruction accuracy. The paper proposes a method for calculating the weight coefficients by a code PRIZMA [4].

We give theoretical justification to the method which is based on a probabilistic interpretation of energy transport by X-ray photons in material from source to receiver. It is shown that for a particular source-receiver couple, the weight coefficient, which characterizes the contribution of a discrete cell of reconstruction area to the signal, is directly proportional to the ratio of photon paths which cross the cell to all paths registered by receiver. The proposed method was verified by a numerical experiment aimed at reconstruction of a spherical plutonium phantom with air voids and a 25% density difference. In reconstruction from 9 views, the new method gave higher quality tomograms than the method based on linear approximation.

References

1. Konovalov A. B., Vlasov V. V. Evaluating the geometrical parameters and permissible noise level for mega-electron-volt electron beam tomography // Abstract book of the 12th International Conference «Zababakhin Scientific Talks». – Snezhinsk: RFNC – VNIITF Press. – 2014. – P. 300.
2. Konovalov A. B., Vlasov V. V. Spatial resolution analysis for few-views discrete tomography based on MART-AP algorithm // ISRN Sign. Process. – 2013. – V. 2013. – P. 356291-1–356291-7.
3. Vlasov V. V., Konovalov A. B., Uglov A. S. Few-views image reconstruction with SMART and an allowance for contrast structure shadows // Proc. 16th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, Lecture Notes in Computer Sciences. – 2015. – V. 9256. – P. 667–677.
4. Kandiev Y. Z., Kashaeva E. A., Khatuntsev K. E., Kuropatenko E. S., Lobanova L. V., Lukin G. V., Malakhov A. A., Malyshkin G. N., Modestov D. G., Mukhamadiev R. F., Orlov V. G., Samarin S. I., Serova E. V., Spirina S. G., Vakhonina T. V., Voronina N. A., Zatsepin O. V. «PRIZMA» Status // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – V. 82. – P. 116–120.

6-33

РАСЧЕТ СЕПАРАЦИИ ДВУКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ

А. В. Красильников, В. Ф. Куропатенко

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

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: press-csu@yandex.ru

С использованием метода расчета ударных волн [1] рассчитана задача о сепарации двухкомпонентной смеси сухих порошков в сосуде при помощи вертикальной вибрации [2]. Расчеты выполнялись лагранжево-эйлеровым методом с использованием системы разностных уравнений, учитывающей кластерное и парное взаимодействия между компонентами смеси [3]. Проведено сравнение с результатами расчета по методике [4], учитывающей только парное взаимодействие. При моделировании процесса варьировались частота и амплитуда колебаний сосуда.

Литература

1. Куропатенко В. Ф. Об одном методе сквозного счета ударных волн // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2014, том 7, № 1, с. 62–75.
2. N. Burtally, P. J. King, and M. R. Swift. Spontaneous Air-Driven Separation in Vertically Vibrated Fine Granular Mixtures. *Science* 295, 1877 (2002).
3. Куропатенко В. Ф. Новые модели механики сплошных сред // ИФЖ, 2011, том 84, № 1, с. 74–92.
4. M. Habib, N. J. Miles, U. Habib, and P. Hall. Separation of Dry Mixtures by Controlled Vertical Vibration. *Particulate Science and Technology*, 31: 555–560.

TWO-COMPONENT MIXTURE SEPARATION SIMULATION

A. V. Krasilnikov, V. F. Kuropatenko

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

E-mail: press-csu@yandex.ru

A shock calculation method [1] is used to solve separation of a two-component mixture of dry powders in a vessel by vertical vibration [2]. Calculations are done by a Lagrangian-Eulerian method with difference equations allowing for cluster and pair interactions between mixture components [3]. Comparison is made with calculations by a technique [4] where only pair interaction is considered. The frequency and amplitude of vessel vibrations are varied in calculations.

References

1. V. F. Kuropatenko, A shock capture method. *SUSU Bulletin, Mathematical Modeling and Programming Series*, 2014, V. 7, No.1, P. 62–75.
2. N. Burtally, P. J. King, and M. R. Swift, Spontaneous Air-Driven Separation in Vertically Vibrated Fine Granular Mixtures. *Science* 295, 1877 (2002).
3. V. F. Kuropatenko, New continuum mechanics models. *J. Appl. Phys.* 2011, V. 84, No.1, P. 74-92.
4. M. Habib, N. J. Miles, U. Habib, and P. Hall, Separation of Dry Mixtures by Controlled Vertical Vibration. *Particulate Science and Technology*, 31: 555–560.

Для анализа процессов деформирования и разрушения сложных технических объектов при ударе необходим численный инструмент, позволяющий моделировать в реальном времени возможные сценарии их развития. Приведены основные этапы создания численного инструмента для моделирования процессов деформирования и разрушения сложных технических объектов.

Программный комплекс предназначен для решения нестационарных задач деформирования и разрушения материалов при нагружении сложных технических объектов [1]. В комплексе реализован непрерывно-дискретный подход, сочетающий лагранжевы координаты для сплошного материала и дискретные частицы конечного размера, моделирующие фрагменты разрушенного материала. Поведение материалов описывается упругопластической моделью с мало-параметрическим, термодинамически полным, уравнением состояния [2, 3]. Разностные соотношения положены на треугольную сетку, которая строится динамическим способом в сложных, многосвязных расчетных областях [4]. Все это позволяет моделировать процессы ударного нагружения сложных технических объектов до «конца», т. е. до полного завершения процессов поглощения кинетической энергии налетающего тела и/или разделения объекта на отдельные фрагменты. Представлены результаты расчета ударного нагружения сложных технических объектов как при низких (до 500 м/с), так и высоких скоростях (до 20 км/с), показывающие работоспособность созданного численного инструментария [1].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10300)

Литература

1. Kraus E. I., Shabalin I. I. Reactor2D: A tool for simulation of shock deformation // *AIP Conference Proceedings*. – Vol. 1770. 2016. – P. 030092.
2. Kraus E. I., Shabalin I. I. A few-parameter equation of state of the condensed matter // *Journal of Physics: Conference Series* – 2016. – Vol. 774. – P. 012009.
3. Kraus E. I., Shabalin I. I. Calculation of elastic modulus behind strong shock wave // *Journal of Physics: Conference Series*, 2015. – Vol. 653 – 012085.
4. Краус Е. И., Фомин В. М., Шабалин И. И. Динамический метод построения треугольных сеток в многосвязных областях // *Вычислительные технологии*. – 2009. – Т. 14. – № 5. – С. 40–48.

6-34

МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Е. И. Краус, И. И. Шабалин

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

SIMULATION OF SHOCK DEFORMATION AND FRACTURE OF SOLIDS

E. I. Kraus, I. I. Shabalin

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

Analysis of the processes of deformation and destruction of complex technical objects upon impact requires

a numerical tool to simulate possible scenarios of their development in real time. The basic steps for creating the numerical tool to simulate processes of deformation and failure of complex technical objects are presented.

The software package is designed to solve the time-dependent problems of deformation and fracture of materials at loading of complex technical objects [1]. The complex involves a continuous-discrete approach combining Lagrangian coordinates for the continuous material and discrete particles of finite size simulating fragments of the destroyed material. The behavior of the material is described by elastoplastic model with a few-parameter, thermodynamically complete equation of state [2, 3]. Differential ratios are written for a triangular grid, which is constructed in a dynamic way in complex, multiply connected domains [4]. All this allows one to simulate the processes of impact loading of complex technical objects to «the end», i.e. until the complete absorption of the kinetic energy of the projectile body and/or division of the object into separate fragments. The results of the calculation of shock loading of complex technical objects both at low (up to 500 m/s) and high speeds (up to 20 km/s) are presented, demonstrating the efficiency of the numerical tool created [1].

The study was supported by the Russian Science Foundation (project 16-19-10300).

References

1. Kraus E. I., Shabalin I. I. Reactor2D: A tool for simulation of shock deformation // AIP Conference Proceedings. – Vol. 1770. 2016. – P. 030092.
2. Kraus E. I., Shabalin I. I. A few-parameter equation of state of the condensed matter // Journal of Physics: Conference Series – 2016. – Vol. 774. – P. 012009.
3. Kraus E. I., Shabalin I. I. Calculation of elastic modules behind strong shock wave // Journal of Physics: Conference Series, 2015. – Vol. 653 – 012085.
4. Kraus E. I., Fomin V. M., Shabalin I. I. Dynamic method for constructing triangular grids in multiply connected regions // Vychislitel'nye tekhnologii. – 2009. – Vol. 14. – No. 5. – P. 40–48. [In Russian]

6-35

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ПЛОСКОГО ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕННОЕ

А. А. Кривоногов¹, А. Л. Карташев²

¹АО Промышленная Группа «Метран», Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: alexeykrivonogov@mail.ru, al_kartashev@mail.ru

Доклад посвящен разработке математической модели, трансформирующей частоту, фазу, амплитуду двумерного течения в проточной части вихревого расходомера в аналогичные параметры для трехмерного течения.

В докладе представлены результаты анализа существующей 3D модели, реализованной в пакете ANSYS, используемой для моделирования течения в проточной части вихревого расходомера.

По результатам анализа картины течения в проточной части вихревого расходомера определены базовые точки геометрии проточного тракта вихревого расходомера, в которых будет проводиться математическое моделирование.

Разработана функциональная структура математической модели, определения параметров течения в проточной части вихревого расходомера для варианта двумерного моделирования.

Осуществлен выбор математического метода трансформации трехмерной модели расчета проточного тракта вихревого расходомера в двумерную модель.

Разработан вычислительный алгоритм математической модели, связывающей трехмерную и двумерную модели проточного тракта вихревого расходомера. Алгоритм основан на использовании быстрого преобразования Фурье и решении задачи минимизации для определения частоты, амплитуды и фазы сигнала.

Актуальность исследования связана с выбором оптимального математического алгоритма моделирования процесса срыва вихрей с тела обтекания, находящегося в трубе (проточной части вихревого расходомера), и распространения вихрей ниже по потоку.

MATHEMATICAL MODEL OF TRANSFORMATION PLANE VORTEX FLOW TO SPATIAL CASE

A. A. Krivonogov¹, A. A. Kartashev²

¹Emerson Automation Solutions IG Metran, Chelyabinsk,
Russia

²South Ural State University (national research university),
Chelyabinsk, Russia

E-mail: alexeykrivonogov@mail.ru, al_kartashev@mail.ru

The report is devoted to development a mathematical model transforming two-dimensional flow parameters such as frequency, phase, amplitude in the three-dimensional characteristics.

The report devotes the results of 3D ANSYS model have been using for flow simulation in the flow part of vortex flowmeter.

By streamline fields analysis in the flow part of vortex flow meter the control points were defined. Simulation data were collected at these control points.

The functional structure of a mathematical model for determining the flow parameters in the flow part was created for two-dimensional simulation case.

The mathematical method of transformation two-dimensional simulation results to a three-dimensional model was executed for flow simulation in the flow part of vortex flow meter.

A computational algorithm of a mathematical model was created. It connects the three-dimensional and two-dimensional model of a flow part. The algorithm is based

on the fast Fourier transform and minimization problem solution to determine frequency, amplitude, and phase of the signal.

Research relevance is associated with choice of optimal simulation mathematical algorithm for vortex shedding process from a bluff body inside a tube (the flow part of the vortex flow meter), and downstream vortices distribution.

6-36

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
В МОНОКРИСТАЛЛАХ В УСЛОВИЯХ
ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ**

М. Н. Кривошеина^{1,2}, С. В. Кобенко³, Е. В. Туч¹

¹ФГБНУ Институт физики прочности и материаловедения
СО РАН, Томск, Россия

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
государственный университет», Томск, Россия

³ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный
университет», Нижневартовск, Россия

E-mail: Marina_nkr@mail.ru, sergeyvk@inbox.ru,
tychka2012@mail.ru

Работа посвящена моделированию процессов упругопластической деформации в анизотропных материалах в трехмерной постановке. В анизотропных материалах сферические поры, а также сферические тела из анизотропных материалов под действием гидростатического напряжения обретают эллипсоидальную форму. В случае динамического нагружения анизотропных материалов импульсом давления процессы деформации в порах или исходно сферических телах сильно усложняются из-за волновой картины деформирования. Получены результаты численного моделирования развития микропор и процесса деформации сферического тела из монокристалла цинка, обладающего высокой степенью анизотропии упругих и пластических свойств. Показано, что эллиптичность формы в анизотропных материалах зависит не только от механических свойств, но и от параметров импульса давления.

**MODELING OF ELASTOPLASTIC
DEFORMATIONS PROCESSES
IN CONDITIONS OF DYNAMIC LOADING
IN SINGLE CRYSTALS**

M. N. Krivosheina^{1,2}, S. V. Kobenko³, E. V. Tuch¹

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS,
Tomsk, Russia

²National research Tomsk state university, Tomsk, Russia

³Nizhnevartovsk state university, Nizhnevartovsk, Russia

E-mail: Marina_nkr@mail.ru, sergeyvk@inbox.ru,
tychka2012@mail.ru

The work is about processes modeling of elastoplastic deformation of anisotropic materials in three-dimensional statement. The anisotropic materials have a spherical pores and the spherical anisotropic bodies takes ellipsoid shape under hydrostatic stress. If the anisotropic materials were given a dynamic loading by pressure impulse, the processes of deformation in the pores or initial spherical bodies will be much more complex because of the deformation wave.

Obtained results of numerical modeling of the extension of micropores and of the process of deformation of spherical body of a single crystal of zinc, which has a high degree of anisotropy of the elastic and plastic properties. It was shown that the ellipticity of forms of anisotropic materials not only depends on the mechanical properties, but also on the parameters of the pressure impulse.

6-37

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ
В ПРИДОННЫХ ЧАСТЯХ ТОРНАДО
И ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА**

И. Ю. Крутова

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

E-mail: IYKrutova@mephi.ru

Математически моделируются трехмерные нестационарные течения идеального политропного газа в условиях действия сил тяжести и Кориолиса. Для системы уравнений газовой динамики поставлена начально-краевая задача, решение которой описывает течение, возникающее при плавном стоке газа через поверхность вертикального цилиндра заданного ненулевого радиуса в окрестности непроницаемой плоскости $z = 0$. Доказано, что данная задача также является характеристической задачей Коши стандартного вида и поэтому при условии аналитичности входных данных у нее существует единственное аналитическое решение. Анализ первых коэффициентов ряда по степеням z показал, что при начале радиального стока внутрь цилиндра сразу возникает окружное движение газа, закрученное в Северном полушарии в положительном направлении и в отрицательном направлении для случая Южного полушария. Установленные факты являются математическим обоснованием результатов соответствующих экспериментов в части возникновения закрутки и направления этой закрутки. Для моделирования трехмерного нестационарного придонного течения таких природных вихрей как торнадо и тропические циклоны используется начальный отрезок ряда, задающий это аналитическое решение. Коэффициенты начальных отрезков рядов численно строятся при решении соответствующих систем гиперболического типа. Приведены результаты расчетов

и их сравнения с данными натуральных наблюдений за торнадо различных классов и среднего по своим характеристикам тропического циклона. Примеры показывают значения газодинамических параметров для торнадо класса F30 и тропического циклона.

Были проведены расчеты значений величины кинетической энергии торнадо, которая состоит из двух основных составляющих: радиальной и окружной.

Литература

1. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008. 96 с.
2. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г., Баутин К. В. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. Новосибирск: Наука, 2013. 216 с.
3. Tatom F. B., Witton S. J. The transfer of energy from tornado into the ground // Seismological Research Letter. – 2001. – V. 72. № 1. – Pp. 12–21.
4. Крутова И. Ю. Расчеты газодинамических параметров в придонной части торнадо // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2015. – том 4 № 6. 523–527 с.

MODELING OF FLOW IN THE BOTTOM PART OF THE TORNADOES AND TROPICAL CYCLONES

I. Y. Krutova

Snezhinsk Physic Institute of the National Research Nuclear University MEPHI, Snezhinsk, Russia

E-mail: IYKrutova@mephi.ru

Mathematically modeled three-dimensional non-stationary flows of an ideal polytropic gas under the action of gravity and Coriolis. For the system of equations of gas dynamics posed boundary value problem whose solution describes the flow that occurs when a smooth surface runoff gas through a vertical cylinder specified non-zero radius in the vicinity of an impermeable plane $z = 0$. It is proved that this problem is also a characteristic problem Cauchy of a standard type and therefore subject to analytic input it has a unique analytic solution. Analysis of the first coefficients of the series in powers of z has shown that at the beginning of radial flow inside the cylinder immediately raises the circumferential motion of the gas, spun in the Northern Hemisphere in the positive direction and in the negative direction in the case of the southern hemisphere. The facts are the mathematical justification of the results of the corresponding experiments with regard to occurrence of spin and direction of spin. To simulate a three-dimensional non-stationary bottom flow of natural vortices as tornadoes and tropical cyclones using the initial segment of the sequence that defines an analytic solution. The coefficients of the initial segments are constructed with rows numerically solving the corresponding systems of hyperbolic type. The results of the calculations and their comparison with the data of field observations of tornadoes different classes and average in their characteristics of a tropical cyclone. The examples

show the value of gas-dynamic parameters for tornadoes class F30 and a tropical cyclone.

Estimates of values of the magnitude of the kinetic energy of a tornado were carried out, which consists of two main components: the radial and circumferential.

References

1. Boutin S. P. Tornado and the Coriolis force. Nauka, Novosibirsk, 2008. 96 p.
2. Boutin S. P., Krutova I. Y., Obukhov A. G., Boutin K. V. Destructive atmospheric vortices: theorem calculations, experiments. Novosibirsk: Nauka, 2013. 216 p.
3. Tatom F. B., Witton S. J. The transfer of energy from tornado into the ground // Seismological Research Letter. – 2001. – V. 72. № 1. – Pp. 12–21.
4. Krutova I. Y. Calculations of gas-dynamic parameters in the bottom part of the tornado // Herald National Research Nuclear University «MEPhI». – 2015. – том 4 № 6. 523–527 p.

6-38

УСВОЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СО СПУТНИКОВ В МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОКЕАНА

К. П. Беляев¹, А. А. Кулешов², Н. П. Тучкова³

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН», Москва, Россия

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

E-mail: kosbel55@gmail.com, andrew_kuleshov@mail.ru, natalia_tuchkova@mail.ru

В работе рассматривается применение разработанного авторами метода усвоения данных наблюдений [1] к задаче моделирования динамики океана. Пусть для численного решения в исходной модели введена дискретизация по времени с шагом Δt_n . На каждом шаге по времени $[t_n, t_{n+1}]$ производится расчет по модели и в момент t_{n+1} происходит усвоение данных наблюдений по формуле

$$X_{a,n+1} = X_{b,n+1} + K_{n+1}(Y_{n+1} - HX_{b,n+1}), \quad (1)$$

где X_a, X_b – два вектора состояния параметров модели, после и до усвоения (analysis and background states) соответственно, Y – вектор наблюдаемых параметров, K – так называемая весовая матрица Калмана (Kalman gain), H – матрица оператора, который проектирует пространство модели в пространство наблюдений. Ранее в [1] было показано, что при некоторых условиях

$$K_{n+1} = \frac{(\Lambda_{n+1} - C_{n+1})(H\Lambda_{n+1})'Q_{n+1}^{-1}}{(H\Lambda_{n+1})'Q_{n+1}^{-1}H\Lambda_{n+1}}, \quad (2)$$

$$\Lambda_{n+1} = \frac{X_{b,n+1} - X_{a,n}}{\Delta t_n},$$

$Q = E(Y - HX)(Y - HX)' + R$ – ковариационная матрица ошибки моделирования плюс ковариационная матрица инструментальной ошибки наблюдений R , E – осреднение по ансамблю или математическое ожидание, C – заданный вектор.

Предложенный метод использует для коррекции значений выходных параметров модели их значения на текущем и предыдущем шагах по времени и данные наблюдений, в отличие от стандартной схемы Калмана, которая не учитывает динамику модели и использует для коррекции рассчитанных параметров модели только значения параметров и данные наблюдений на текущем шаге и не использует скорректированные значения параметров с предыдущего шага. В этом состоит преимущество разработанного метода.

Разработанный метод усвоения данных (1)–(2) был применен с вычислительной климатической моделью Max Plank Institute Earth System model (MPIESM), созданной в Институте Макса Планка по метеорологии в г. Гамбург, Германия [2, 3]. В численных экспериментах использовались данные по уровню и температуре поверхности океана и другие данные из архива AVISO (Archiving, Validating and Interpolating Satellite Ocean, www.ifremer.ocean.fr). Результаты численных экспериментов с усвоением и без усвоения данных наблюдений записывались и анализировались. Особое внимание было уделено Арктической зоне России. Было получено хорошее совпадение результатов с независимыми данными и с наблюдаемыми климатическими тенденциями.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-11-00434.

Литература

1. Беляев К. П., Кулешов А. А., Тучкова Н. П., Танажур К. А. Метод коррекции расчетов динамической модели данными наблюдений и его применение к анализу динамики Атлантического океана // Математическое моделирование, 2015. Т. 27. № 12. С. 20–32.
2. Haak H. Simulation of Low-Frequency Climate Variability in the North Atlantic Ocean and the Arctic, V. 1. Max Planck Institute for Meteorology, 2004.
3. Wetzel P., Haak H., Jungclaus J., Maier-Reimer E. The Max-Planck-Institute Global Ocean/Sea-Ice Model MPI-OM. Technical report, URL <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/models/MPIOM/>.

ASSIMILATION OF REMOTE MEASURED DATA INTO OCEAN DYNAMIC MODEL

K. P. Belyaev¹, A. A. Kuleshov², N. P. Tuchkova³

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

³Federal Research Center «Computer Science and Control» of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: kosbel55@gmail.com, andrew_kuleshov@mail.ru, natalia_tuchkova@mail.ru

In the current study the original data assimilation method, developed by the authors [1] is applied to the problem of ocean dynamics modeling. Let for the numerical solution of the considered model the discretization with time step Δt_n be introduced. On each time interval $[t_n, t_{n+1}]$ the model equations are numerically solved and at instant time t_{n+1} data assimilation is performed by the formulae

$$X_{a,n+1} = X_{b,n+1} + K_{n+1}(Y_{n+1} - HX_{b,n+1}) \quad (1)$$

where X_a, X_b are two model states after and before assimilation, respectively, called as analysis and background ones, Y is an observational vector, K is the so-called Kalman gain matrix and H is matrix of an operator projecting the model space into the observation space. Earlier in [1] it was shown that under specific conditions

$$K_{n+1} = \frac{(\Lambda_{n+1} - C_{n+1})(H\Lambda_{n+1})'Q_{n+1}^{-1}}{(H\Lambda_{n+1})'Q_{n+1}^{-1}H\Lambda_{n+1}}, \quad (2)$$

$$\Lambda_{n+1} = \frac{X_{b,n+1} - X_{a,n}}{\Delta t_n},$$

$Q = E(Y - HX)(Y - HX)' + R$ is the covariance matrix of the modeling error plus covariance matrix of the instrumental observational error R , E is the ensemble average or mathematical expectation, C is an given vector.

The proposed method uses both model outputs at previous and current time steps and observational data, in opposed to the standard Kalman scheme, which is not taking into account the model dynamics: for the correction of the model state at each time step, it just uses the model output and observational data at the current time step. This is an advantage of the developed method.

The developed data assimilation method (1)–(2) has been applied in conjunction with the numerical climate model Max Plank Institute Earth System model (MPIESM), created in Max Plank Institute for Meteorology in Hamburg, Germany [2, 3]. In the numerical experiments the sea surface heights, temperature and other satellite data from the archive AVISO (Archiving, Validating and Interpolating Satellite Ocean, www.ifremer.ocean.fr) have been used. The results of numerical experiments with and without assimilation were recorded and analyzed. A special attention has been focused on the Arctic zone of Russia. A good coincidence of the results with an independent data and an observed climate trend was obtained.

This work was supported by the Russian Scientific Foundation, project no. 14-11-00434.

References

1. Belyaev K. P., Kuleshov A. A., Tuchkova N. P., Tanajura C. A. S. A correction method for dynamic model calculations using observational data and its application in Oceanography // Mathematical Models and Computer Simulations, 2016. Vol. 8. No. 4. PP. 391–400.
2. Haak H. Simulation of Low-Frequency Climate Variability in the North Atlantic Ocean and the Arctic, V. 1. Max Planck Institute for Meteorology, 2004.

3. Wetzel P., Haak H., Jungclaus J., Maier-Reimer E. The Max-Planck-Institute Global Ocean/Sea-Ice Model MPI-OM. Technical report, URL <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/models/MPIOM/>.

the distributed file format of EFR. The grid of 1 billion cells was constructed.

6-39

РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ И УСКОРЕНИЕ ПОСТРОЕНИЯ БЛОЧНЫХ СЕТОК В ПРЕПРОЦЕССОРЕ ЛОГОС

В. В. Лазарев

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

E-mail: vvlazarev@vniief.ru

В докладе рассматриваются способы, ускоряющие построение блочных расчетных сеток по подготовленной декомпозиции геометрической модели на блоки. Описано внутреннее представление декомпозиции и фрагментное представление блочной сетки. На основе этих представлений описаны распараллеленные алгоритмы построения блочной сетки. Приведены графики зависимостей эффективности распараллеливания и коэффициента ускорения от количества потоков и объема задач. Реализован алгоритм, позволяющий повторно перестраивать блочную сетку по измененной декомпозиции только на измененных блоках. Для построения сеток, не помещающихся в оперативную память, разработан алгоритм построения и записи сетки в распределенный файл EFR. Построена сетка на 1 миллиард ячеек.

PARALLELIZATION AND ACCELERATION OF MULTIBLOCK GRID GENERATION IN LOGOS PREPROCESSOR

V. V. Lazarev

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

E-mail: vvlazarev@vniief.ru

The works describes the ways to accelerate generation of multiblock computational grids by the prepared decomposition of a geometrical model into the blocks. The work shows the internal representation of the decomposition and the representation of the multiblock grid by fragments. Basing on these representations the parallelized algorithms for generation of the grid are described. The plots of the parallelization efficiency and speedup as a function of a number of flows and the volume of problems are given. The algorithm that allows regeneration of the multiblock grid according to the changed decomposition only on the modified blocks is realized. To generate the grids that do not fit into main memory there was developed the algorithm to generate and record the grid into

6-40

НЕПРЕОДОЛИМОСТЬ СВОЙСТВА ЛОКАЛЬНОСТИ ДЛЯ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

Н. Ф. Лапина, М. В. Пчелинцев

Снежинский Физико-Технический Институт
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
«МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: nfismagilova@mail.ru, mvpchelintsev@mail.ru

Результаты настоящей работы навеяны исследованиями, анонсированными в [1], [2].

Пусть $F : X \subseteq R^n \rightarrow Y \subseteq R^n$ – некоторое нелинейное отображение, и \tilde{x} – неизвестное решение уравнения $F(x) = 0$. В общем случае все известные итерационные методы решения указанного уравнения являются локальными. То есть успешно сходятся только в том случае, если начальное приближение достаточно близко к \tilde{x} . Попытки строить методы (чаще всего модификации известных методов) с целью расширения (глобализации) области сходимости остаются безрезультатными. Достаточно полное представление о положении дел в обозначенной проблематике отражено в монографиях [3], [4], библиография которых в общей сложности насчитывает более тысячи источников.

С геометрической точки зрения вопрос о расширении области сходимости связан с проблемой ориентации в пространстве. То есть с вопросом о том, можно ли из данной точки пространства хотя бы приблизительно определить направление, в котором следует искать \tilde{x} .

В настоящей работе показано, что в такой постановке задача эквивалентна задаче о приближенном определении начального вектора скорости для системы дифференциальных уравнений второго порядка с заданными краевыми условиями, которая описывает в пространстве Y геодезические линии в римановой метрике, индуцированной в Y отображением F из пространства X . Неразрешимость последней задачи обосновывается следующим образом. Для точки в пространстве Y во всех направлениях из нее выходят свои геодезические. Указанная выше система дифференциальных уравнений в фиксированной точке абсолютно одна и та же для всех направлений. Имеющаяся в распоряжении информация точечная (привязана к одной точке). Другой нет. Все направления (которых континуум!) в равной мере по отношению друг к другу претенденты быть требуемым. Соответственно, выделить требуемое направление (в том числе и приблизительно) никаких возможностей нет. Рассуждения дополнительно интерпретируются вероятностно.

Литература

1. Пчелинцев М. В., Скоркин Н. А. Геометрический смысл метода Ньютона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, механика, физика». 2009. Вып. 1. № 22(159). С. 4–11.
2. Пчелинцев М. В., Скоркин Н. А. Теорема существования и единственности решения для одной специальной системы дифференциальных уравнений и ее приложения // Вестник НИЯУ МИФИ. Прикладная математика и математическая физика. 2013. Т. 2. № 1. С. 59–62.
3. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. М.: Мир, 1975. 558 с. (J. Ortega and W. Rheinboldt. Iterative Solution of Nonlinear Equations in Several Variables).
4. Дэннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М.: Мир, 1988. 440 с. (J. E. Dennis, R. B. Schnabel. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations).

INSUPERABILITY OF LOCALITY PROPERTY FOR ITERATIVE METHODS OF NONLINEAR EQUATION SETS SOLUTION

N. F. Lapina, M. V. Pchelintsev

Snezhinsk Physics and technology Institute National Research Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia

E-mail: nfismagilova@mail.ru, mvpchelintsev@mail.ru

The results of the present work are inspired by research, announced in [1], [2].

Let $F: X \subseteq R^n \rightarrow Y \subseteq R^n$ be a certain nonlinear image and \tilde{x} be an unknown solution of the equation $F(x) = 0$. In general, all known iterative methods of said equation solution are local, i.e. successfully converge only if initial approximation is close enough to \tilde{x} . Attempts to create methods (usually modifications of known methods) in order to expand (globalize) convergence domain remain ineffective. Monographs [3], [4] (which bibliography in total has more than thousand sources) give a fairly complete picture of state of affairs of indicated problems

From a geometric point of view, the problem of convergence domain expanding is related to the problem of spatial orientation, i.e. with the question, if it is possible at least approximately determine the direction of searching \tilde{x} from the given point in space.

The present work shows, that in this formulation the problem is equivalent to the problem of approximate determination of the initial velocity vector for second order differential equation set (with given boundary conditions), which describes in space Y geodesic lines in Riemann metric, induced in Y from space X by an image F . Insolubility of this problem is justified as follows. From a point in space Y in all directions come out its geodesic lines. At a fixed point the differential equation set mentioned above is the same for all directions. Available information is bound to a single point. All directions are equal required applicants. Accordingly, there is not a single opportunity to select a required direction (approximately or not). The reasoning is further interpreted probabilistically.

References

1. Pchelintsev M. V., Skorkin N. A. The Geometrical Meaning of the Newton's Method // SUSU Herald. «Mathematics, mechanics, physics» series. 2009. Ed. 1. № 22 (159). P. 4–11
2. Pchelintsev M. V., Skorkin N. A. The Theorem of Existence and Uniqueness of a Solution for a Special Set of Differential Equations and its Applications // NRNU MEPhI Herald. Applied mathematics and mathematical physics. 2013. V. 2. № 1. P. 59–62.
3. J. Ortega and W. Rheinboldt. Iterative Solution of Nonlinear Equations in Several Variables. M.: Mir, 1975. 558 p.
4. J. E. Dennis, R. B. Schnabel. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. M.: Mir, 1988. 440 p.

6-41

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕНОСА УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ

Д. Е. Ларин

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

E-mail: delarin@vniief.ru

Моделирование процессов переноса излучения методом Монте–Карло требует весьма существенного количества машинного времени. Однако прохождение излучения через вещество и электромагнитные поля можно описать и аналитическими соотношениями, полученными как решением базовых уравнений, так и аппроксимацией результатов экспериментальных исследований. Моделирование процесса переноса с использованием аналитических выражений позволяет существенно сократить время, необходимое для расчета прогнозируемых результатов эксперимента, и позволяет выявить возможные пути оптимизации его постановки.

Предлагаемый метод основывается на математическом аппарате теории вероятностей, в частности, на теореме о борелевской функции от двух случайных величин, утверждающей, что результирующее распределение может быть вычислено через последовательное вычисление сверток исходных распределений.

На примере протонов ускорителя У-70 (ИФВЭ, г. Протвино, Московская обл.) показано, что предлагаемый метод обеспечивает удовлетворительное совпадение с экспериментальными результатами. В модели учтены следующие факторы: многократное кулоновское рассеяние протонов, адронное рассеяние протонов на ядрах, потери энергии протонов в веществе и линейные эффекты взаимодействия протонов с полями магнитооптической системы (МОС).

Сопоставление расчетных данных с экспериментом указывает на невыполнение ключевого условия применимости разработанной модели к МОС ускорителя У-70 – предположения о (-1) -преобразовании

монохроматического протонного пучка полями МОС. По итогам обсуждения был разработан комплекс мер, направленных на более тщательный контроль угловых распределений пучка протонов в плоскостях xz и yz , имеющих существенное значение для обеспечения (-1) -оптики, а также на уменьшение роли нелинейностей магнитных полей в линзах МОС.

ANALYTICAL METHOD OF ULTRARELATIVISTIC PROTON TRANSPORT COMPUTATION

D. E. Larin

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

Radiation transport processes simulation by Monte-Carlo method requires considerable amount of computer time. However, radiation transport through medium and electromagnetic fields may be described by analytical relations being obtained by both base equation solution and approximation of experimental results. Transport processes simulation using analytical formulas permits to considerably reduce amount of time what's needed to calculate a prediction of experiment. Also it enables to reveal potentialities of experiment arrangement optimization.

Suggested method is based on mathematical apparatus of probability theory. In particular, two random variables Borelean function theorem affirms that final distribution may be calculated by consecutive calculation of convolutions of initial distributions.

By experiments at the proton accelerator U-70 (Institute of High-Energy Physics, Protvino, Moscow reg.) satisfactory accuracy was shown to be reached by suggested method. The model takes account of following factors: multiply Coulomb scattering, hadronic proton-nuclear scattering, energy loss in medium and linear effects of interactions between protons and fields of magneto-optical system (MOS).

Comparison of estimated data with experimental one indicates non-compliance with key applicability condition of developed model that is assumption of (-1) -transformation of monochromatic proton beam transported through MOS. A complex of measures was developed as a result of discussion which was intended for more accurate control of proton angular distributions in xz and yz planes (what has importance for (-1) -optics supply) and also for reducing role of magnetic nonlinearities in MOS lenses.

6-42

ТЕОРЕМА О ЛОКАЛЬНОЙ СХОДИМОСТИ МЕТОДА КАСАТЕЛЬНЫХ ГИПЕРПЛОСКОСТЕЙ

Ю. Ю. Лушина, М. В. Пчелинцев

Снежинский Физико-Технический Институт
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
«МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: nati-progress@yandex.com, mvpchelintsev@mail.ru

Метод касательных гиперплоскостей для численного решения систем нелинейных алгебраических уравнений концептуально анонсирован в работах [1–3]. Идея метода разработана исходя из геометрического анализа причин расходимости метода Ньютона [4–6]. В указанных работах так же приводятся результаты практического применения метода к модельной системе уравнений с демонстрацией его положительных сторон, и проводится его сравнение с методом Ньютона.

Как хорошо известно из теории решения нелинейных уравнений, для всякого итерационного процесса должна быть обоснована по меньшей мере его локальная сходимость. На момент анонсирования метода касательных гиперплоскостей и до настоящего времени доказательство его локальной сходимости получить не удалось. Основным препятствием было наличие специфической теоретической неопределенности, являющейся органическим элементом метода.

В настоящей работе указанная проблема успешно разрешена – теорема о локальной сходимости метода касательных гиперплоскостей исчерпывающим образом доказана (в частности, полученная оценка скорости сходимости итераций оказалась квадратичной, то есть точно такой же, как в методе Ньютона). Источником этого результата стал внимательный анализ некоторых свойств гладких гиперповерхностей в n -мерном евклидовом пространстве.

Литература

1. Пчелинцев М. В., Кошутин Д. А., Зубкова Е. А., Метод касательных гиперплоскостей для решения систем нелинейных алгебраических уравнений // Проблемы теоретической и прикладной математики: Труды 40-й Региональной молодежной конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. С. 93–98.
2. Кошутин Д. А., Зубкова Е. А. Вариант квазиньютоновского метода для решения систем нелинейных уравнений // Сборник тезисов конференции. 2009, г. Саров, Россия.
3. Пчелинцев М. В., Кошутин Д. А., Зубкова Е. А. Один комбинированный метод решения систем нелинейных уравнений // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Снежинск и наука – 2009, современные проблемы атомной науки и техники». 1–5 июня 2009 года, г. Снежинск, Челябинская обл. Изд. СГФТА. С. 54–56.

4. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. М.: Мир, 1975. 558 с. (J. Ortega and W. Rheinboldt. Iterativ Solution of Nonlinear Equations in Several Variables).
5. Дэннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М.: Мир, 1988. 440 с. (J. E. Dennis, R. B. Shnabel. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations).
6. Пчелинцев М. В., Скоркин Н. А. Геометрический смысл метода Ньютона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, механика, физика». 2009. Вып. 1. № 22(159). С. 4–11.

THE LOCAL CONVERGENCE OF THE TANGENT HYPERPLANES METHOD THEOREM

Y. Y. Lushina, M. V. Pchelintsev

Snezhinsk Physics and technology Institute National Research Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia

E-mail: nati-progress@yandex.com, mvpchelintsev@mail.ru

The tangent hyperplanes method for numerical solution of nonlinear algebraic equations is conceptually announced in works [1–3]. The concept of the method is developed on the basis of a geometrical analysis of causes of the Newton's method divergence. [4–6]. Said works also demonstrate the results of practical application of the method to a model equation system, showing its positive sides, and compare the method with the Newton's method.

As is widely known from the nonlinear equations solution theory, at least local convergence should be substantiated for every iterative process. From announcing the tangent hyperplanes method till now its local convergence has not been proved. The main obstacle was specific theoretical indeterminacy, which is an organic element of the method.

In this work the said problem is successfully solved – the local convergence of the tangent hyperplanes method theorem is comprehensively proved (in particular, the obtained estimate of the iteration convergence velocity appeared to be quadratic, i.e. the same as in the Newton's method). The source of this result is an attentive analysis of some properties of smooth hyperplanes in n -dimensional Euclidean space.

References

1. Pchelintsev M. V., Koshutin D. A., Zubkova E. A. The Tangent Hyperplanes Method for Nonlinear Algebraic Equations Solution // Problems of theoretical and applied mathematics: works of 40th Regional youth conference. Ekaterinburg: UB RAS, 2009. P. 93–98
2. Koshutin D. A., Zubkova E. A. A Quasinewton Method Version for Nonlinear Algebraic Equations Solution // Theses of conference. 2009, Sarov, Russia.
3. Pchelintsev M. V., Koshutin D. A., Zubkova E. A. A Combined Method for Nonlinear Equations Solution // Scientific works collection of the international scientific and practical conference «Snezhinsk and science – 2009, contemporary problems of nuclear science and technics». June 1–5, 2009, Snezhinsk, Chelyabinsk Reg. SSPhTA Ed. P. 54–56.

4. J. Ortega and W. Rheinboldt. Iterative Solution of Nonlinear Equations in Several Variables. M.: Mir, 1975. 558 p.
5. J. E. Dennis, R. B. Shnabel. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. M.: Mir, 1988. 440 p.
6. Pchelintsev M. V., Skorkin N. A. The Geometrical Meaning of the Newton's Method // SUSU Herald. «Mathematics, mechanics, physics» series. 2009. Ed. 1. № 22 (159). P. 4–11

6-43

ЧИСЛЕННОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДИФФУЗИИ, КОАГУЛЯЦИИ И ПЕРЕНОСА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА СУПЕР-ЭВМ

М. А. Марченко

ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Новосибирский государственный университет (НГУ), Новосибирск, Россия

E-mail: marchenko@sscc.ru

В докладе представлены эффективные алгоритмы распределенного численного статистического моделирования на основе методов расщепления и весового моделирования для прецизионной оценки функционалов, определяемых маловероятными событиями, на траекториях диффузионных процессов, таких как вероятность недостижения границы области траекториями за заданное время и полная концентрация траекторий в точке за заданное время.

Предложена вероятностная модель для численного моделирования процесса пространственно неоднородной коагуляции, основанная на применении пространственной регуляризации ядра коагуляции и метода мажорантной частоты, и реализующий ее параллельный алгоритм.

Описана вероятностная модель для численного моделирования процесса развития электронных лавин в газе, основанная на использовании ветвящихся процессов, и реализующий ее параллельный алгоритм.

Предложены длиннопериодные параллельные генераторы псевдослучайных чисел и методика распределенного численного статистического моделирования для высокопроизводительных вычислительных систем.

Описана имитационная модель исполнения программ распределенного численного статистического моделирования с целью получения оценок их масштабируемости на большое число процессоров.

Также в докладе представлены универсальные библиотеки распределенного численного статистического моделирования для высокопроизводительных вычислительных систем и параллельная программа для численного анализа стохастических осцилляторов.

**NUMERICAL STOCHASTIC SIMULATION
OF KINETIC PROCESSES OF DIFFUSION,
COAGULATION AND CHARGED PARTICLES
TRANSFER ON SUPERCOMPUTERS**

M. A. Marchenko

Institute of Computational Mathematics and Mathematical
Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of
Sciences (ICMMG SB RAS), Novosibirsk, Russia
Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia

Email: marchenko@sccc.ru

In our talk, the effective algorithms of distributed numerical stochastic simulation for precocious evaluation of functionals determined by rare events on trajectories of diffusion processes are presented. The algorithms are based on the splitting and weighted techniques. We consider such functionals as the probability of non-reaching the boundary of the domain within the given time interval and the full concentration of trajectories in the point within the given time interval.

The stochastic model for numerical stochastic simulation of the spatially inhomogeneous coagulation process is presented. The model is based on the spatial regularization of the coagulation kernel and the method of the majorant frequency. The parallel algorithm for implementation of the stochastic model is also given.

The stochastic model for numerical stochastic simulation of the process of electron avalanches evolution in the gas is given. The model is based on the use of branched processes. The parallel algorithm for implementation of the stochastic model is also presented.

The parallel long-period pseudorandom numbers generators are introduced. The technique of distributed numerical stochastic simulation on high-performance computational system is also described.

The imitation model of execution of distributed numerical stochastic simulation programs is presented. The model is used for evaluation of scalability of such kind of programs.

The universal software libraries for realization of distributed numerical stochastic simulation programs on high-performance computational systems and the parallel program for numerical analysis of stochastic oscillators are presented.

В данной работе объединены возможности, предоставляемые при использовании динамически адаптивных сеток [1], вычислительная простота декартовых алгоритмов и преимущества метода свободной границы [2], позволяющего моделировать на декартовых сетках твердые включения сложной геометрии. Программный комплекс снабжен расчетной схемой конечного объема 2-го порядка точности по времени и пространству на основе WENO-производных с опцией аппроксимации потоков по Годунову или Русанову, алгоритмом динамической адаптации многоуровневой расчетной сетки к решению по различным бинарным критериям.

Для решения неоднородной системы уравнений, моделирующей границу внедренного тела, применено расщепление по физическим процессам: сначала во всей расчетной области решается однородная задача, итерирование добавки от компенсационного потока в пересекаемых ячейках проводится по методу Ньютона на втором шаге интегрирования. Для уменьшения потерь точности при измельчении ячеек предложена методика подсеточной WENO-реконструкции численного решения.

В качестве одного из методов анализа гладкости решения предлагается оценка коэффициентов вейвлет-разложения сеточной функции в окрестности исследуемой точки [3] на шаблоне типа «неравномерный крест», отвечающем реальной конфигурации адаптивной сетки в окрестности исследуемой ячейки.

Возможности и универсальность программного комплекса проиллюстрированы набором разноплановых расчетов: течений газа в различных ударно-волновых режимах, обтекания стационарных и подвижных твердых тел, динамики многофазных течений на основе составной задачи Римана [4].

Литература

1. Merkulov K. Wavelet-Based Local Mesh Adaptation with Application to Gas Dynamics // International Conference on Parallel Computing Technologies. – Springer International Publishing, 2015. – С. 426–435.
2. Меньшов И., Корнев М. Метод свободной границы для численного решения уравнений газовой динамики в областях с изменяющейся геометрией // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26. – №. 5. – С. 99–112.
3. Afendikov A. Multilevel Wavelet Based Non-uniform Cartesian Grids Adaptation in CFD // Supercomputing in Scientific and Industrial Problems. German-Russian. – 2016. – С. 6.
4. Menshov I., Zakharov P. On the composite Riemann problem for multi-material fluid flows // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2014. – Т. 76. – №. 2. – С. 109–127.

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА
ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ
НА ДВУМЕРНЫХ ДЕКАРТОВЫХ СЕТКАХ
С ДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОКАЛЬНОЙ
АДАПТАЦИЕЙ**

П. П. Захаров, И. С. Меньшов, К. Д. Меркулов

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

**PROGRAM COMPLEX FOR CALCULATION
OF CONTINUUM MECHANICAL PROBLEMS
ON 2D CARTESIAN MESHES WITH DYNAMIC
LOCAL ADAPTATION**

I. S. Menshov, K. D. Merkulov, P. P. Zaharov

Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow,
Russia

This paper combine the opportunities offered by the dynamically adaptive grids [1], the computational simplicity of Cartesian algorithms and the advantages of the Free Boundary Method [2], introduced for the treating complex geometries on the Cartesian grids. The software package use 2nd order accurate in time and space Finite Volume Method based on WENO-derivatives with an option of the flux approximation by Godunov or Rusanov; multi-level algorithm for dynamic mesh refinement by various binary criteria.

We applied Method of splitting by physical processes for the solution of the inhomogeneous system modeling the internal body interface: we start from solving the homogeneous problem in the whole computational domain and then iterating right-hand-side part in cut cells using Newton's method. To reduce the loss of precision in refining cells the technique of subcell WENO-reconstruction was suggested.

The evaluation of the grid function wavelet decomposition coefficients in the neighborhood of analyzed cell is used as one of adaptation criteria. The local wavelet pattern «uneven cross» was designed for corresponding to the actual mesh configuration in the vicinity of the test cell.

The opportunities and versatility of the software system are illustrated by the set of calculations: gas flows of different speedy modes, flows around static and moving bodies, dynamics of multiphase flows, calculated using Composite Riemann Problem [4].

References

1. Merkulov K. Wavelet-Based Local Mesh Adaptation with Application to Gas Dynamics // International Conference on Parallel Computing Technologies. – Springer International Publishing, 2015. – С. 426–435.
2. Menshov I., Kornev M. Free-boundary method for the numerical solution of gas-dynamic equations in domains with varying geometry // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2014. – Т. 6. – №. 6. – С. 612–621.
3. Afendikov A. Multilevel Wavelet Based Non-uniform Cartesian Grids Adaptation in CFD // Supercomputing in Scientific and Industrial Problems. German-Russian. – 2016. – С. 6.
4. Menshov I., Zakharov P. On the composite Riemann problem for multi-material fluid flows // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2014. – Т. 76. – №. 2. – С. 109–127.

6-45

**МЕТОД УКРУЧЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ
МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ
СЖИМАЕМОГО ГАЗА
В ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ**

Н. А. Михайлов, И. В. Глазырин

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

Для моделирования многофазных течений в эйлеровых переменных широко используется подход VOF (Volume of Fluid) [1–3], в котором для каждой ячейки задаются объемные доли фаз, содержащихся в ячейке. Все методы в рамках VOF можно разделить на три группы: геометрические, алгебраические и дифференциальные. В геометрических методах VOF, например [1,2], на каждом временном шаге делается восстановление контактных границ фаз внутри каждой ячейки, и потоки через грани ячейки вычисляются с учетом движения восстановленных контактных границ за временной шаг. В алгебраических методах VOF, например [3], потоки определяются с использованием специальных реконструкций объемных долей на гранях ячеек, позволяющих минимизировать численную диффузию фаз. Также используются алгебраические методы [4], в которых осуществляется восстановление контактных границ на алгебраическом уровне путем аппроксимации контактных границ некоторой параметризованной функцией, например, гиперболическим тангенсом. Наконец, в дифференциальных методах VOF для устранения численной диффузии объемных долей фаз в основную систему уравнений добавляются фиктивные дифференциальные члены [5, 6]. Данные дифференциальные члены могут иметь как антидиффузионные, так и сжимающие свойства. При этом большое значение имеет тип численной схемы для фиктивных дифференциальных членов, который может быть либо параболическим, либо гиперболическим.

В данной работе предлагается дифференциальный метод VOF для трехмерной многофазной системы уравнений динамики сжимаемого газа с фиктивным укрупняющим членом, увеличивающим градиент концентрации для контактных границ. Рассматриваемая система уравнений является обобщением на трехмерный многофазный случай одномерной системы уравнений для двух фаз, приведенной в [6]. Предполагается парный контакт фаз, то есть в каждой ячейке могут присутствовать только две фазы. Система уравнений аппроксимируется с использованием расщепления по физическим процессам. На первом этапе расчета временного шага решается основная система уравнений по методу типа MUSCL. На втором этапе – добавочная система. Поскольку добавочная система является гиперболической, то для ее аппроксимации применяется метод Годунова.

Метод реализован в трехмерной эйлеровой программе Фокус [7]. Приведен набор тестовых задач, показывающий эффективность расчета контактных границ.

Литература

1. C. W. Hirt and B. D. Nichols. Volume of fluid (VOF) methods for dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, 39, 201–225 (1981).
2. D. L. Youngs. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion. In K.W. Morton and M.J. Baines (eds), *Numerical methods for fluid dynamic*, Academic, New York, 273–285 (1982).
3. S. T. Zalesak. Fully multi-dimensional flux corrected transport algorithms for fluid flow. *J. Comput. Phys.*, 31, 335–362 (1979).
4. Keh-Ming Shyue, Feng Xiao. An eulerian interface sharpening algorithm for compressible two-phase flow: the algebraic THINC approach. *J. Comput. Phys.*, 268, 326–354 (2014).
5. K. K. So, X. Y. Hu and N. A. Adams. Anti-diffusion method for interface steepening in two-phase incompressible flow. *J. Comput. Phys.*, 231(11), 4304–4323 (2012).
6. A. Tiwari, J. B. Freund, C. Pantano. A diffuse interface model with immiscibility preservation. *J. Comput. Phys.*, 252, 290–309 (2013).
7. N. A. Mikhailov The Convergence Order of Weno Schemes Behind a Shock Front. *Mathematical Models and Computer Simulations*. Vol. 27, №. 2. Pp. 129–138 (2015).

METHOD OF CONTACT BOUND STEEPENING FOR THE SIMULATION OF 3D MULTIPHASE COMPRESSIBLE FLOWS IN EULER VARIABLES

N. A. Mikhaylov, I. V. Glazyrin

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

Volume of Fluid (VOF) approach [1-3], which for every cell specifies the volume fraction of the phases contained in the cell, is widely used for the simulation of multiphase flows in Euler variables. All of the methods in the framework of the VOF can be divided into three groups: geometric, algebraic and differential. In the geometric VOF methods, for example, [1,2], at each time step the reconstruction of contact boundaries of phases is done in each cell, and flows through the faces of the cells are calculated taking into account the movement of all reconstructed contact boundaries for the time step. In algebraic VOF methods, for example [3], flows are defined using special reconstructions of volume fraction on the faces of the cells, which helps to minimize numerical diffusion of the phases. Also, one can use algebraic methods [4], in which the reconstruction of the contact boundaries on the algebraic level is calculated through approximation of contact boundaries by some parameterized function such as the hyperbolic tangent. Finally, in the differential VOF methods fictitious terms are added to eliminate the numerical diffusion of the volume fraction of the phases in the basic system of differential equations [5, 6]. These

differential terms may have both antidiffusion and compressive properties. In this case, the type of the numerical scheme for fictitious terms is very important. It can be either parabolic, or hyperbolic.

Here differential VOF method for 3D multiphase system of equations for compressible gas dynamics with fictitious sharpening term which increases concentration gradient on contact bounds is proposed. This system of equations is a generalization to 3D multiphase case of 1D system of equations for the two phases, that is presented in [6]. It is assumed coupled phase contact, that is, only two phases may be in the cell. The system of equations is approximated using the splitting into physical processes. In the first stage of the calculation of the time step the main system of equations is solved by MUSCL type method. Additional system of equations is solved on the second stage. Also since the system is hyperbolic, then it is approximated with Godunov's method.

The method is implemented in a 3D Eulerian code Focus [7]. Effectiveness of contact bounds simulations is shown in presented tests.

References

1. C. W. Hirt and B. D. Nichols. Volume of fluid (VOF) methods for dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, 39, 201–225 (1981).
2. D. L. Youngs. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion. In K. W. Morton and M. J. Baines (eds), *Numerical methods for fluid dynamic*, Academic, New York, 273–285 (1982).
3. S. T. Zalesak. Fully multi-dimensional flux corrected transport algorithms for fluid flow. *J. Comput. Phys.*, 31, 335–362 (1979).
4. Keh-Ming Shyue, Feng Xiao. An eulerian interface sharpening algorithm for compressible two-phase flow: the algebraic THINC approach. *J. Comput. Phys.*, 268, 326–354 (2014).
5. K. K. So, X. Y. Hu and N. A. Adams. Anti-diffusion method for interface steepening in two-phase incompressible flow. *J. Comput. Phys.*, 231(11), 4304–4323 (2012).
6. A. Tiwari, J. B. Freund, C. Pantano. A diffuse interface model with immiscibility preservation. *J. Comput. Phys.*, 252, 290–309 (2013).
7. N. A. Mikhailov The Convergence Order of Weno Schemes Behind a Shock Front. *Mathematical Models and Computer Simulations*. Vol. 27, №. 2. Pp. 129–138 (2015).

6-46

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД
РАСЩЕПЛЕНИЯ ПО ФИЗИЧЕСКИМ
ПРОЦЕССАМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ
РАДИАЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ**

Н. Я. Моисеев

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

E-mail: nyamoiseyev@vniitf.ru

Представлен подход к решению уравнений радиационной газовой динамики [1] в многогрупповом кинетическом приближении модифицированным методом расщепления. Суть подхода состоит в том, что расщепление исходной системы уравнений осуществляется с помощью уравнения переноса теплового излучения, а не с помощью уравнения энергии. Подход позволяет применить аналитические методы к решению интегродифференциальных уравнений, проводить счет задач в многогрупповом кинетическом приближении без итераций по интегралу столкновений, без обращения матриц [2] и естественным образом обобщается на решение задач в многомерных пространствах. Разностная схема повышенной точности построена на основе метода Годунова [3] с применением приближенного решения задачи о распаде произвольного разрыва в двухтемпературной газовой динамике [4].

Литература

1. Четверушкин Б. Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. М.: Наука, 1985.
2. Моисеев Н. Я. Явно–неявная разностная схема для совместного решения уравнений переноса теплового излучения и энергии методом расщепления // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2013. Т. 53. № 3. С. 111–127.
3. Численное решение многомерных задач газовой динамики. Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976.
4. Моисеев Н. Я., Шестаков Е. А. Решение задачи о распаде разрыва в двухтемпературной и трехтемпературной газовой динамике // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2015. Т. 55. № 9. С. 1579–1585.

**MODIFIED PHYSICAL PROCESS
SPLITTING METHOD TO SOLVE RADIATIVE
GAS-DYNAMICS EQUATIONS**

N. Ya. Moiseev

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

E-mail: nyamoiseyev@vniitf.ru

The paper presents an approach to radiative gas-dynamics equations [1] in a multigroup kinetic approximation by the modified splitting method. In this method, the

initial equation system is split by the heat-transfer equation rather than by the energy equation. This approach allows one to use analytical methods in solving integro-differential equations, calculate the problems in the multigroup kinetic approximation without Boltzmann integral iterations or matrix inversion [2]. In addition, it can be naturally extended to solving problems in multidimensional spaces. The high-accuracy difference scheme has its basis in Godunov method [3] using an approximate solution for a problem on the breakout of an arbitrary discontinuity in two-temperature gas dynamics [4].

References

1. B. N. Chetverushkin. Mathematical modelling in radiative gas dynamics problems. M.: Nauka, 1985.
2. N. Ya. Moiseev. Explicit-implicit difference scheme for the joint solution of the radiative transfer and energy equations by the splitting method // Comput. Math. Math. Phys. 2013. Vol. 53. No 3. pp. 111–127.
3. Numerical Solution of Multidimensional Problems in Gas Dynamics, Ed. By S. K. Godunov. M.: Nauka, 1976.
4. N. Ya. Moiseev, Ye. A. Shestakov. Solution of the Riemann Problem in Two and Three-temperature Gas dynamics // Comput. Math. Math. Phys. 2015. Vol. 55. No 9. pp. 1579–1585.

6-47

**ОДИН ИЗ СПОСОБОВ ПОСТРОЕНИЯ
КОНСЕРВАТИВНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ
В СЛУЧАЕ ТРЕХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ПЕРЕМЕННЫХ**

Н. С. Еськов, Я. В. Пронин, А. Ф. Опрышко

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

E-mail: N.S.Escov@vniitf.ru, J.V.Pronin@vniitf.ru,
A.F.Opryshko@vniitf.ru

Построена консервативная разностная схема для расчета упругопластических течений в лагранжевых координатах для случая трех пространственных переменных. Для описания течения сплошных сред рассматривается система уравнений Навье–Стокса. Разностная аппроксимация законов сохранения производится на произвольной регулярной гексагональной сетке с использованием разнесенного шаблона.

Эволюция тензора напряжений G осуществляется согласно закону Прандтля–Рейса. Для численного интегрирования используется известный метод Уилкинса. Тензор скоростей деформаций определяется как симметричная часть градиента вектора скорости \bar{W} .

Разностные операторы $DIV(G)$ и $DIV(G\bar{W})$ уравнений движения и энергии построены из условия выполнения основных законов сохранения и позволяют

на сферической сетке с достаточной точностью сохранять симметрию одномерных течений.

В работе представлены результаты некоторых тестовых задач, полученных с использованием новой разностной схемы. Для всех расчетов имеется хорошее согласие с аналитическими решениями.

A METHOD OF CONSTRUCTING A CONSERVATIVE DIFFERENCE SCHEME FOR 3D MODELING OF ELASTIC-PLASTIC FLOWS

N. S. Eskov, Y. V. Pronin, A. F. Opryshko

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

E-mail: N.S.Eskov@vniitf.ru, J.V.Pronin@vniitf.ru,
A.F.Opryshko@vniitf.ru

A conservative difference scheme is constructed for 3D modeling of elastic-plastic flows in Lagrangian coordinates. The Navier–Stokes equations are used to describe continuum flows. The conservation laws are approximated on arbitrary structured meshes of hexagonal cells. Staggered meshes are used.

The stress tensor G evolves in accord with Prandtl–Reuss law. The Wilkins method is used for numerical integration. The strain rate tensor is defined as symmetrical part of the velocity gradient \overline{W} .

The difference operators $DIV(G)$ and $DIV(G\overline{W})$ in the equations of motion and energy are constructed so as to satisfy the main conservation laws. They rather accurately keep the symmetry of 1D flow on spherical meshes.

The paper presents results of some tests problems, obtained with the new difference scheme. All calculations agree well with analytical solutions.

6-48

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В СТАЦИОНАРНОМ ПЛОСКОМ СЛУЧАЕ

О. В. Опрышко

Снежинский Физико-Технический Институт
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
«МИФИ», Снежинск, Россия

В природе довольно часто встречается интересное атмосферное явление – восходящие закрученные потоки воздуха, такие как вихри, смерчи, торнадо. С. П. Баутиным была предложена и обоснована [1] ранее не встречающаяся схема (см. также [2]) возникновения природных восходящих закрученных потоков типа торнадо и тропического циклона. Чтобы математически смоделировать течение газа в придонной части торнадо, используется в качестве данных натуральных наблюдений за торнадо различной интенсивности шкала Фудзиты [3], а также расширенная шкала

Фудзиты, где собрана и систематизирована доступная часть данных натуральных наблюдений за торнадо. В ней указывается значение ширины полосы разрушения для торнадо различной интенсивности, также значение максимальной скорости ветра.

Для системы уравнений газовой динамики была поставлена одна задача Коши с начальными условиями, заданными на горизонтальной плоскости $z = 0$, для нахождения значений c_0, u_0, v_0 .

Задача Коши решалась с помощью явного метода Рунге–Кутты 4-го порядка точности, на каждом шаге находились значения коэффициентов c_0, u_0, v_0 .

В работе представлены результаты вычислений для углов $\psi = \pi/6, \psi = \pi/4, \psi = \pi/3$, широты, в которых функционируют торнадо. Примеры показывают значения газодинамических параметров для торнадо класса F30 и тропического циклона.

В данной работе представлен сравнительный анализ газодинамических характеристик всех классов торнадо по расширенной шкале Фудзиты для углов: $\psi = \pi/6, \psi = \pi/4, \psi = \pi/3$.

Были проведены расчеты значений величины кинетической энергии торнадо, которая состоит из двух основных составляющих: радиальной и окружной.

$$W = W_{\text{рад}} + W_{\text{окр}}. \quad (1)$$

Формула для расчета кинетической энергии выглядит следующим образом:

$$W = \pi \int_{r_0}^{r_{in}} \frac{2}{c^{\gamma-1}}(r) u^2(r) r dr + \pi \int_{r_0}^{r_{in}} \frac{2}{c^{\gamma-1}}(r) v^2(r) r dr. \quad (2)$$

Литература

1. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008. 96 с.
2. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г., Баутин К. В. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. Новосибирск: Наука, 2013. 216 с.
3. Tatom F. B., Witton S. J. The transfer of energy from tornado into the ground // Seismological Research Letter. – 2001. – V. 72. № 1. – Pp. 12-21.
4. Крутова И. Ю. Расчеты газодинамических параметров в придонной части торнадо // «Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2015. – том 4 № 6. 523–527 с.

MODELING THE BOTTOM PART OF THE RISING SWIRLING FLOWS IN A STATIONARY PLANE CASE

O. V. Opryshko

Snezhinsk Physics and technology Institute National Research
Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia

Interesting atmospheric phenomena are often found in nature. These are ascending swirling flows (ASF) of air, such as whirlwinds, tornadoes, tornado. S. P. Bautin proposed and justified [1] the encountered previously scheme (see also [2]) of the natural upward swirling

flows of tornadoes and tropical cyclones type. In order to model the gas flow in the bottom part of tornado, the Fujita scale [3] is used as field studies data at tornado of varying intensity, and also the refined Fujita scale, where collected and systematized an available part of observations of tornadoes. It indicates the value of the bandwidth destruction for tornadoes of varying intensity, and the value of maximum wind speed.

A Cauchy problem with the initial conditions was posed for the system of equations of gas dynamics, set up on a horizontal plane $z = 0$, the value of which are determined c_0, u_0, v_0 [2].

The Cauchy problem was solved by using an explicit Runge–Kutta 4th order accuracy at each step are values of coefficients: c_0, u_0, v_0 .

The paper presents the results calculation of values for angles: $\psi = \pi/6$, $\psi = \pi/4$, $\psi = \pi/3$, latitudes, in which the tornadoes function.

The examples shows the values of gas-dynamic parameters for a tornado F30 class and a tropical cyclone.

This paper presents a comparative analysis of the gas dynamic characteristics of all classes of tornado on the enhanced Fujita scale for angles: $\psi = \pi/6$, $\psi = \pi/4$, $\psi = \pi/3$.

Estimates of values of the magnitude of the kinetic energy of a tornado were carried out, which consists of two main components: the radial and circumferential.

$$W = W_{rad} + W_{cir}. \quad (1)$$

The formula for calculating the kinetic energy is as follows:

$$W = \pi \int_{r_0}^{r_{in}} \frac{2}{c^{\gamma-1}}(r) u^2(r) r dr + \pi \int_{r_0}^{r_{in}} \frac{2}{c^{\gamma-1}}(r) v^2(r) r dr. \quad (2)$$

References

1. Boutin S. P. Tornado and the Coriolis force. Nauka, Novosibirsk, 2008. 96 p.
2. Boutin S. P., Krutova I. Y., Obukhov A. G., Boutin K. V. Destructive atmospheric vortices: theorem calculations, experiments. Novosibirsk: Nauka, 2013. 216 p.
3. Tatom F. B., Witton S. J. The transfer of energy from tornado into the ground // Seismological Research Letter. – 2001. – V. 72. № 1. – Pp. 12–21.
4. Krutova I. Y. Calculations of gas-dynamic parameters in the bottom part of the tornado // «Herald National Research Nuclear University «МЭФН»». – 2015. – том 4 № 6. 523–527 p.

6-49

ВЕРИФИКАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЗОНАНСА СВОБОДНОЙ ПОЛОСТИ

Г. В. Орлов

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

Ключевые слова: резонансная сейсмометрия, резонанс подземной полости, нахождение подземной полости.

Для упругой среды определены условия резонанса границы среды при падении на нее акустической волны. Указана модель резонансного отклика полый сферы на падающую сферическую акустическую волну, которая зависит от двух резонансных параметров – частоты падающей волны и ее затухания. При естественных предположениях получена модель затухания звука как функция от частоты, принимающая значение резонансного затухания на резонансной частоте. Эта модель показывает как можно изменять вид зависимости затухания от частоты с целью интерпретации экспериментальных спектров.

С целью верификации полученных аналитических моделей резонанса представлена интерпретация экспериментальных спектральных плотностей движений свободной поверхности земли, измеренных сейсмометром на двух расстояниях от эпицентра подземной полости, образованной ядерным взрывом на Семипалатинском испытательном полигоне [1]. Эти движения включают дифракцию плоского микросейсмического шума глубин Земли на полости взрыва. Показано, что предложенная модель точно отражает резонанс полости ПЯВ, правильно указывает не резонансные пики спектральной плотности отражения микросейсмического шума, показывает периодические по частоте выпуклости спектров и правильно описывает квадратичную скорость убывания спектров в логарифмическом масштабе от единиц герц до резонансной частоты и далее до конца интервала измеренных частот.

Литература

1. Кишкина С. Б., Лукишов Е. М., Спивак А. А. Сейсмореzonансный метод обнаружения очагов подземных ядерных взрывов. - Вестник НЯЦ РК, выпуск 3, 2010.

VERIFICATION OF A CAVITY RESONANCE THEORETICAL MODEL

G. V. Orlov

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

Keywords: resonance seismometry, underground cavity resonance, underground cavity finding

Resonance conditions are defined for the acoustic response of elastic solid-gas free interface. The paper identifies a model for the resonance response of a hollow sphere to a spherical acoustic wave. The model depends on two resonant parameters – wave frequency and its attenuation. The frequency dependent acoustic attenuation model is derived from natural assumptions. At resonant frequency it takes the value of resonant attenuation. The model shows how frequency dependent attenuation can be varied for interpreting experimental spectra.

For the verification of these theoretical resonance models, an interpretation is given for the experimental

spectral densities of free earth surface motions measured by a seismometer at two distances from the epicenter of an underground cavity formed by an underground nuclear explosion at the Semipalatinsk Test Site [1]. The motions include diffraction by the cavity of plane microseisms. It is shown that the model accurately reproduces underground cavity resonance, non-resonance peaks in the spectral density of noise reflection, frequency-periodic convexities in the spectra, and the quadratic rate of the spectral density decrease in logarithmic scale from a few Hz to the resonance frequency and then to the end of the measurement frequency range.

References

1. Кишкина С. Б., Лукишов Е. М., Спивак А. А. Сейсморезонансный метод обнаружения очагов подземных ядерных взрывов. – Вестник НЯЦ РК, выпуск 3, 2010.

6-50

ПЕРЕСЧЕТ ВЕЛИЧИН ПОВЫШЕННОГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ VOF-МЕТОДА

Э. М. Вазиев, Ю. Г. Панюков

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

E-mail: e.m.vaziev@gmail.com, yury.g.panyukov@yandex.ru

При решении уравнений газовой динамики, с использованием ALE подхода, возникает необходимость перестроения сетки в расчетной области и, следовательно, возникает необходимость пересчета величин со старой сетки на новую. В данной работе представлен пересчет величин повышенного порядка точности. Пересчет величин выполняется путем наложения старой сетки на новую сетку. При этом используется ограниченное кусочно линейное представление величин в ячейках старой сетки. Ограничение накладывается таким образом, чтобы значения величин в каждой ячейке новой сетки не выходили за пределы значений соответствующих величин в ячейках старой сетки, с которым ячейка новой имеет не пустое пересечение. Пересчет величин проводится с сохранением массы, импульса и полной энергии.

В ходе пересчета могут возникнуть ячейки, содержащие более одного вещества, так называемые смешанные ячейки. Для того чтобы не допустить размывания вещества в ходе пересчета и сократить число смешанных ячеек, используется VOF метод, при помощи которого в смешанной ячейке восстанавливаются границы раздела веществ.

В работе представлен ряд тестов, демонстрирующих работоспособность представляемого метода пересчета. Проведено сравнение с методом пересчета первого порядка точности.

Ключевые слова: пересчет величин повышенного порядка, VOF метод, нерегулярная сетка.

VOF-BASED HIGHER ORDER REMAPPING

E. M. Vaziev, Y. G. Panyukov

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

E-mail: e.m.vaziev@gmail.com, yury.g.panyukov@yandex.ru

Solving hydrodynamic equations within the ALE approach requires rezoning and hence remapping between the old and new meshes. The paper presents higher order remapping through mesh superposition and the use of a restricted piecewise-linear representation of quantities in the old cells. The restriction requires that in each cell of the new mesh, whose intersection with the old cells is not empty, the values should be within their limit in the old cell. Mass, momentum and total energy are conserved.

During rezoning mixed cells containing two or more materials can be appear. Interfaces in mixed cells are reconstructed with the VOF method.

A number of tests are presented to demonstrate performance of the proposed method. Comparison with first-order remapping is made.

Keywords: higher order remapping, VOF method, unstructured mesh.

6-51

АЛГОРИТМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ МНОГОМЕРНЫХ РАСЧЕТОВ В МЕТОДИКЕ ТИМ

Т. Н. Половникова, А. А. Воропинов

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

Методика ТИМ [1, 2] предназначена для решения многомерных нестационарных задач механики сплошных сред на неструктурированных лагранжевых сетках произвольного вида.

Эффективное выполнение счетных программ на многопроцессорных машинах с распределенной памятью требует декомпозиции данных по процессам таким образом, чтобы распределение вычислительной нагрузки было равномерным, а количество межпроцессных обменов минимальным.

Опыт проведения расчетов показал, что основной проблемой является не получение изначально плохой декомпозиции, а постепенное ухудшение ее качества в процессе проведения расчета.

Алгоритмы балансировки для сеточных методик можно классифицировать следующим образом:

- Статическая балансировка (на этапе декомпозиции учитываются весовые функции).

- Квазидинамическая балансировка (передекомпозиция в процессе счета).
- Динамическая балансировка (передача ячеек между параобластями внутри математической области).

Набор критериев для проведения динамической балансировки вычислительной нагрузки состоит из двух частей:

1. Критерии анализа необходимости выполнения операции улучшения качества декомпозиции:
 - Разбалансированность по вычислительной нагрузке.
 - Параобласть близка к перебитию (по типу «песочные часы»).
2. Критерии выбора ячеек для переброски.
 - Неоптимальное отношение по количеству внутренних и граничных ребер (2D) и граней (3D).
 - Неоптимальное отношение по длине внутренних и граничных ребер (2D) и по площади внутренних и граничных граней (3D).
 - Ячейка с максимальным весом.
 - Ряд критериев, вырабатываемых программами поддержания качества сетки.

Применение алгоритмов динамической балансировки вычислительной нагрузки позволяет ускорить счет и эффективно загрузить процессорное поле, выделенное на задачу.

В дальнейшем планируется провести исследование на серии сложных расчётов для выбора оптимального набора параметров, подходящего для решения широкого класса прикладных задач.

Литература

1. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 3. С. 37–52.
2. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г., и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Там же. 2006. Вып. 4. С. 29–43.

ALGORITHMS OF DYNAMIC BALANCING THE COMPUTATIONAL LOAD FOR MULTIDIMENSIONAL SIMULATIONS IN TIM-METHOD

T. N. Polovnikova, A. A. Voropinov

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

TIM code [1, 2] is designed for solving multidimensional non-stationary problems of continuum mechanics using non-structured lagrangian meshes of random form.

Efficient performance of computational programs on multiprocessor computers with distributed memory need decomposition of the data among the processors in such a way that distribution of computational load would be uni-

form and the number of interprocessor exchange would be minimum.

Our experience in simulations has shown that the basic problem lies not in the production of initially bad decomposition, but gradual degradation of its quality in the process of simulation.

Algorithms of balancing for grid methods can be classified in the following way:

- Static balancing (weight functions are taken into account at the stage of decomposition).
- Quasi-dynamic balancing (re-decomposition in the process of computation).
- Dynamic balancing (by transferring the cells between the para-domains inside the mathematical area).

A number of criteria to carry out the dynamic balancing of the computational load comprises two parts:

1. Criteria to analyze the need to perform the operation of the decomposition quality upgrading:
 - Disbalance in computational load.
 - Para-domain is close to the neck formation (by «sand glass» type).
2. Criteria to select the cells to transfer.
 - Cells from the given list.
 - Not optimum ratio with regard to the number of interior and boundary edges (2D) and interior and boundary faces (3D).
 - Not optimum ratio with regard to the length of the interior and boundary edges (2D) and the area of the interior and boundary faces (3D).
 - A cell of the maximum weight.
 - A number of criteria developed by the programs that support the quality of the mesh.

Implementation of algorithms of dynamic balancing the computational load makes it possible to accelerate the simulations and to load the processor field allocated for the problem efficiently.

Further we plan to do the research on the series of complex simulations to select an optimum set of parameters appropriate for the solution of a wide range of applied problems.

References

1. S. S. Sokolov, A. I. Panov, A. A. Voropinov et al. TIM code for simulation of 3D continuum mechanics problems using unstructured polyhedral Lagrangian grids // Voprosy atomnoi nauki i tehniki. Ser. Mathematical simulation of physical processes. 2005. Issue 3. pp. 37–52.
2. S. S. Sokolov, A. A. Voropinov, I. G. Novikov et al. TIM-2D code for simulation of continuum mechanics problems using irregular polygonal meshes with a random number of bonds in the mesh nodes // Voprosy atomnoi nauki i tehniki. Ser. Mathematical simulation of physical processes. 2005. Issue 4. pp. 29–43.

6-52

DSN-TVD МЕТОД РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ НА ДВУМЕРНЫХ НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТКАХ

Э. М. Вазиев, А. Д. Гаджиев, Т. В. Пономарёва

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

E-mail: e.m.vaziev@gmail.com, tat.v.ponomareva@yandex.ru

В докладе представлен нелинейный DS_N TVD метод решения двумерного уравнения переноса нейтронов на нерегулярных сетках в осесимметричном случае, в многогрупповом приближении. TVD реконструкция проводится только по пространственным переменным. Данный метод имеет повышенный порядок точности, а так же обладает монотонными свойствами. Расчетная область покрывается сеткой из многоугольных ячеек. По угловым направлениям сетка строится согласно ES_M -квадратуре. Система разностных уравнений переноса решается методом бегущего счета.

Представлены результаты расчетов ряда тестовых задач, с использованием регулярных и нерегулярных сеток. В частности, метод опробован на расчетах λ методом установления.

Ключевые слова: двумерное уравнение переноса нейтронов, DS_N метод, TVD реконструкция, нерегулярная сетка.

THE DSN-TVD METHOD FOR SOLVING THE NEUTRON TRANSPORT EQUATION ON 2D UNSTRUCTURED MESHES

E. M. Vaziev, A. D. Gadzhiev, T. V. Ponomaryova

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

E-mail: e.m.vaziev@gmail.com, tat.v.ponomareva@yandex.ru

The paper presents a nonlinear DS_N TVD method for solving 2D multi-group neutron transport in axially symmetric geometry on unstructured meshes. TVD reconstruction is only done for spatial variables. The method is monotone and higher-order accurate. The domain is broken into polygonal cells. In angular directions the mesh is constructed by ES_M -quadratures. The difference equations are solved by a sweeping procedure.

Test calculations with structured and unstructured meshes are presented. In particular, the method is tested by calculating λ with settle cycles.

Keywords: 2D neutron transport equation, DS_N method, TVD reconstruction, unstructured mesh

6-53

РЕАЛИЗУЕМЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ КОНЕЧНООПРЕДЕЛЕННЫХ ГРУПП В МНОГООБРАЗИИ НИЛЬПОТЕНТНЫХ ГРУПП СТУПЕНИ 2

Д. С. Попов¹, М. В. Пчелинцев²

¹МОУ Средняя образовательная школа № 125, Снежинск,
Россия

²Снежинский Физико-Технический Институт
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
«МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: snehik@gmail.com, mvpchelintsev@mail.ru

Фундаментальную проблематику комбинаторной теории групп (т. е. групп, заданных порождающими элементами и определяющими соотношениями) составляют так называемые алгоритмические проблемы [1, 2].

Хорошо известно [1, 2], что в общем случае ни одна из таких проблем не является разрешимой. Поэтому имеет смысл поиск решений для отдельных семейств (классов) групп.

Построенные алгоритмы в подавляющем своем числе нереализуемы на практике. Соответственно, авторы обзорной статьи [3] отмечают повышение интереса к практической сложности и реализуемости алгоритмов.

В настоящей работе строятся реализуемые алгоритмы для конечноопределенных групп в многообразии 2-ступенно нильпотентных групп: 1) алгоритм решения проблемы вхождения в подгруппу, заданную конечным множеством порождающих элементов, либо заданную как нормальное замыкание конечного множества элементов (что, в частности, автоматически влечет решение классической проблемы тождества); 2) алгоритм для решения (классической) проблемы сопряженности.

Всякая нильпотентная группа является фактор-группой свободной нильпотентной группы, что позволяет «поднять» проблематику в нее. Основополагающими являются три алгоритмические процедуры для подгрупп свободной нильпотентной группы.

Первая процедура строит для подгруппы, заданной конечным порождающим множеством элементов, новое порождающее множество, названное ступенчатой базой, которое является аналогом системы базисных коммутаторов [4] и позволяет эффективно решать проблему вхождения в подгруппу. Последнюю миссию выполняет вторая процедура. Третья процедура строит для нормальной подгруппы, заданной как нормальное замыкание конечного множества элементов, конечное порождающее множество.

Проблема сопряженности так же «поднимается» в свободную нильпотентную группу и с помощью модифицированной ступенчатой базы, названной приведенной, сводится к задаче решения системы линейных уравнений над кольцом целых чисел.

Некоторые вычислительные средства заимствованы из [5].

Литература

1. Магнус В., Каррас А., Солитер Д. Комбинаторная теория групп. – М.: Наука, 1974.
2. Р. Линдон, П. Шупп. Комбинаторная теория групп. – М.: Мир, 1980.
3. Ремесленников В. Н., Романьков В. А. Теоретико-модельные и алгоритмические вопросы теории групп // Итоги науки и техники. Алгебра. Топология. Геометрия. ВИНТИ АН СССР. 1983. Т. 21. С. 3–79.
4. М. Холл. Теория групп. – М.: ИЛ, 1966.
5. Huppert B. Endliche Gruppen. Vol. I, Springer, 1967.

**IMPLEMENTABLE ALGORITHMS
FOR FINITELY PRESENTED GROUPS
IN THE MANI-FOLD OF CLASS 2 NILPOTENT
GROUPS**

D. S. Popov¹, M. V. Pchelintsev²

¹School № 125, Snezhinsk, Russia

²Snezhinsk Physics and technology Institute National Research Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia

E-mail: snehik@gmail.com, mvpchelintsev@mail.ru

Fundamental problems of combinatory group theory (i. e. groups defined by generating elements and constitutive relations) are the so called algorithmic problems. [1, 2].

It is known [1, 2], that in general none of these problems is insoluble, that's why it is reasonable to seek solutions for separate classes of groups.

The majority of built algorithms are unrealizable in practice. Accordingly, the authors of the review article [3] point increase in interest to practical complexity and feasibility of algorithms.

In the present work the following realizable algorithms for finitely presented groups in the manifold of class 2 nilpotent groups are built: 1) the algorithm for solution a problem of entry in a subgroup, defined by finite set of generating elements or defined as conjugate closure of a finite set of elements (in particular, this implies a solution of the classical problem of identity) 2) the algorithm for solution the (classical) problem of conjugacy.

Every nilpotent group is a quotient group of a free nilpotent group. That fact lets us solve the problem instead for it. Three algorithmic procedures are fundamental for subgroups of a free nilpotent group.

First procedure is the following: for a subgroup, defined by a finite generating set of elements is built a new generating set, called step base, which is an analogue of a basic commutator set [4] and which allows to effectively solve a problem of entry in a subgroup. The last task is fulfilled by a second procedure. The third procedure builds a finite generating set for a normal subgroup, defined as conjugate closure of a finite set of elements.

The problem of conjugacy also «rises» to the free nilpotent group and with the help of a modified step base, called reduced, is reduced to the problem of solution of a linear equation set over the ring of integers.

Some computing means are borrowed from [5].

References

1. W. Magnus, A. Karrass, D. Solitar. Combinatorial Group Theory – М.: Nauka, 1974.
2. R. Lyndon, P. Schupp. Combinatorial Group Theory – М.: Mir, 1980.
3. V. N. Remeslennikov, V. A. Romankov. Theoretical Model and Algorithmic Problems of Group Theory // The Results of Science and Technology. Algebra. Topology. Geometry. VINITI AS USSR. 1983. V. 21. P. 3-79.
4. M. Hall. Group Theory – М.: ИЛ, 1966.
4. B. Huppert. Endliche Gruppen. Vol. I, Springer, 1967.

6-54

**КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЕРЕНОСА ТЕПЛА
В СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ
(СТОХАСТИЧЕСКИЙ
И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ)**

И. Ф. Потапенко¹, С. А. Карпов²

¹ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН», Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: irina@keldysh.ru, firena@yandex.ru, karpov.st@yandex.ru

Кинетическое описание динамики плазмы важно для многих приложений. Например, взаимодействие лазерного интенсивного излучения с плазмой приводит к появлению больших градиентов температуры и плотности, что ставит под сомнение возможность описание современных лазерных экспериментов в рамках классической транспортной теории. В то же время, электронный тепловой поток, который играет ключевую роль в энергетическом балансе лазерной плазмы, часто моделируется весьма приближенно. Аналитическая теория нелокального переноса рассматривает лишь небольшие отклонения от равновесия. Таким образом, единственный путь вычислить параметры теплового переноса в плазме с температурной неоднородностью масштабом меньше или порядка сотни электронных длин свободного пробега – это численное моделирование кинетического уравнения со столкновительным интегралом Ландау (Фоккера-Планка).

Много масштабный характер задачи является сложной проблемой для всех областей температурной неоднородности. Мы представляем численное моделирование, выполненное с помощью наших вычислительных кодов, которые используют два различных подхода: стохастический и детерминистический. Первый – для нелинейного уравнения Власова-Ландау (Фоккера-Планка) в 1D3V геометрии основан на методе прямого дискретного моделирование типа Монте-Карло (DSMC). Этот метод объединяет моделирование методом частица-в-ячейке (PiC) для «вла-

совской» части кинетического уравнения и алгоритм типа Монте-Карло для столкновительного интеграла Ландау, который аппроксимируется интегралом столкновений Больцмана [1]. Детерминистический подход рассматривает кинетическое уравнение в 1D2V геометрии на основе так называемых сохраняющих асимптотику разностных схем (см., например, работу [2] и ссылки в ней). В этой работе мы даем краткий сравнительный анализ эффективности этих двух численных методов.

В качестве иллюстративного примера представлен эффект распространения тепла, вызванный мгновенным изменением температуры стенки. Кинетические эффекты, воздействующие на распространение тепловой волны, структура электронной функции распределения в различных пространственно-временных областях, автомодельное поведение решения и т. д., анализируются. Результаты исследования и численные подходы могут быть интересны для разнообразных приложений.

Благодарности. Авторы благодарят частичную финансовую поддержку РФФИ (Грант № 14-01-00251), а также В. Ю. Быченкова, Г. В. Долголеву, Л. П. Басса за многочисленные плодотворные дискуссии.

Литература

1. Bobylev A. V., Potapenko I. F. Monte Carlo methods and their analysis for Coulomb collisions in multicomponent plasmas // *Journal of Computational Physics*. 2013. V. 246. P. 123–144.
2. S. Guisset, S. Brull, B. Dubroca, E. d’Humières, S. Karpov and I. Potapenko. Asymptotic-Preserving scheme for the M1-Maxwell system in the quasi-neutral regime // *Communications in Computational Physics*. 2016. V. 19, N 2. P. 301–328.

KINETIC SIMULATION OF HEAT TRANSPORT IN COLLISION PLASMAS (DETERMINISTIC AND STOCHASTIC APPROACHES)

I. F. Potapenko¹, S. A. Karpov²

¹Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

²Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: irina@keldysh.ru, firena@yandex.ru,
karpov.st@yandex.ru

The kinetic description of plasma dynamics is important for many applications. For example, the interaction of intense laser radiation with a plasma results in the appearance of high temperature and density gradients, which casts doubts on the possibility of describing actual laser experiments in the framework of the classical transport theory. Meanwhile, the thermal electron flux that plays a key role in the energy balance in a laser produced plasma, is very often modeled in an approximate way. The analytical theory of nonlocal transport is designed only for the small temperature perturbations. So the only way to calculate the parameters of the heat transport in plasma with the temperature inhomogeneity scale length less or equal

to one hundred electron mean free path lengths is the numerical simulation of the kinetic equation with Landau (Fokker-Planck) collision operator.

The multiscale character of a problem causes an essential challenge throughout the all ranges of the temperature inhomogeneity scales. We present numerical simulations, performed with our numerical codes that use two different approaches: stochastic and deterministic ones. The first algorithm for the nonlinear 1D3V Vlasov-Landau (Fokker-Planck) kinetic equation deals with DSMC approach. This method combines PiC simulation for the Vlasov part of the kinetic equation and Monte Carlo type algorithm for the Landau collision integral that is approximated by the Boltzmann collision integral [1]. The deterministic approach treats 1D2V kinetic equation with help of so-called asymptotic-preserving (finite difference) schemes (for instance, see [2] and references therein). We give here a short comparative analysis of an effectiveness for both numerical methods.

As an illustrative example, the effect of wall heat conduction caused by sudden changes of wall temperature is presented. Kinetic effects affected the heat wave propagation, the electron distribution structure in different space-temporal regions, self-similarity of the solution, etc, are analyzed. Results of the research and numerical approaches might have interest for different applications.

Acknowledgments. Partial financial support of RFFI (Grant № 14-01-00251) and many fruitful discussions with V. Yu. Bychenkov, G. V. Dolgoleva, L. P. Bass are gratefully acknowledged.

References

1. Bobylev A. V., Potapenko I. F. Monte Carlo methods and their analysis for Coulomb collisions in multicomponent plasmas // *Journal of Computational Physics*. 2013. V. 246. P. 123–144.
2. S. Guisset, S. Brull, B. Dubroca, E. d’Humières, S. Karpov and I. Potapenko. Asymptotic-Preserving scheme for the M1-Maxwell system in the quasi-neutral regime // *Communications in Computational Physics*. 2016. V. 19, N 2. P. 301–328.

6-55

О ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ВЫСОТНЫХ ГРОВОВЫХ РАЗРЯДОВ В ИОНОСФЕРЕ: ЭЛЬФЫ, ДЖЕТЫ И СПРАЙТЫ

А. А. Потапов

Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru

В предлагаемом докладе обсуждаются результаты фрактальной обработки изображений некоторых высотных грозовых разрядов. Начиная с середины 90-х годов XX века в центре внимания физиков оказалось новое явление – грозовой электрический разряд в средней атмосфере на высотах от 20 до 100 км, лежащих выше абсолютного большинства облаков [1].

Эти вспышки, в отличие от обычных молний идут не вниз, к земле, а вверх, к ионосфере. Физические модели спрайтов, эльфов и джетов до сих пор остаются предметом острых дискуссий. Хотя этап накопления данных, характеризующих морфологию этих явлений, отнюдь не завершен, уже можно перейти к исследованию более тонких особенностей структуры и динамики высотных разрядов и их роли в глобальной электрической цепи и балансе малых составляющих атмосферы. Динамические пространственно-временные особенности и морфология спрайтов могут быть объяснены, в частности, фрактальной геометрией разрядов и перколяцией [2]. Мы имеем здесь еще один пример самоорганизованной критичности, когда динамика высотного разряда обусловлена достижением порога перколяции, характеризующейся формированием фрактальных проводящих каналов по всему телу спрайта. При статистической обработке таких данных в настоящее время по традиции используют классические методы. Это не позволяет извлечь всю информацию о таких новейших атмосферных структурах. Автором показано [3–7], что применение математической теории дробной меры, фракталов и физического скейлинга открывает для физиков целый ряд новых методологических принципов.

Литература

1. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges // NATO Science Series. V.225 / Eds. M. Fullekrug, E. Mareev, M. Rycroft. – Dordrecht, The Netherlands, 2006. – 398 pp.
2. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Университетская книга, 2005. – 848 с.
3. Потапов А. А. Оценки фрактальных характеристик радиотеплового излучения атмосферы // Abstracts Int. Conf. «Turbulence and Wave Processes», dedicated to the centenary of Mikhail D. Millionshchikov (1913–1973) (November 26–28, 2013, Moscow, МГУ). – М.: INTUIT.RU Ltd., 2013. P. 155–158.
4. Potapov A. A. Research of the fractal and scaling properties of tropospheric and ionospheric turbulence with artificial perturbations // Сб. тр. Междунар. конф. «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность: МСС-14» (Москва, ИКИ РАН, 24-27 ноября 2014 г.). – М.: ЛЕНАНД, 2014. С. 334–339.
5. Подосенов С. А., Потапов А. А., Фоукзон Дж., Менькова Е. Р. Неголономные, фрактальные и связанные структуры в релятивистских сплошных средах, электродинамике, квантовой механике и космологии: в 3 т. / Под ред. А. А. Потапова. М.: ЛЕНАНД, 2015. – 1128 с.
6. Potapov Alexander A. Fractal Radar: Towards 1980–2015 // Proc. of CHAOS 2015 Int. Conf. (26–29 May 2015, France). – Paris: Henri Poincaré Institute, 2015. P. 559–573.
7. Potapov Alexander A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. Chapter 12 in the book: The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / Ed. C. Skiadas. – Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. P. 195–218.

ON THE FRACTAL STRUCTURE OF HIGH-ALTITUDE STORM DISCHARGES IN THE IONOSPHERE: ELVES, JETS AND SPRITES

A. A. Potapov

V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia

E-mail: potapov@cplire.ru

The results of fractal processing of some high-altitude storm discharges images are discussed in the suggested report. Starting from the middle of nineties of XX a new phenomenon became the focus of physicists' interest – lightning electric discharge in the middle atmosphere at altitudes from 20 to 100 kilometers which are above the absolute majority of clouds [1]. Unlike common lightnings these flashes go up to the ionosphere and not down to the ground. Up to now physical models of sprites, elves and jets remain the subject of violent disputes. One can already proceed to researches of finer features of the structure and dynamics of high-altitude discharges and its role in the global electric circuit and balance of small components of the atmosphere though a stage of accumulation of data which describe these phenomena morphology is in no way completed. Dynamical space-time features and the sprites morphology can be in particular explained by the discharges fractal geometry or by percolation [2]. Here we have one more example of selforganized criticality when the high-altitude discharge dynamics is determined by reaching a threshold of percolation which is defined by forming fractal conductive channels over the whole sprite body. At statistical processing of such data they traditionally use classical methods at present. It does not allow to extract all information about such newest atmospherical structures. The author showed [3–7] that application of the mathematical theory of fractional measure, fractals and the physical scaling reveals an entire series of new methodological principles for physicists.

References

1. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges // NATO Science Series. V.225 / Eds. M. Fullekrug, E. Mareev, M. Rycroft. – Dordrecht, The Netherlands, 2006. – 398 pp.
2. Potapov A.A. Fractals in Radio Physics and Radio Location: The Sampling Topology. A second revised and enlarged edition. – М.: Universitetskaya kniga, 2005. – 848 pp.
3. Potapov A. A. Estimates of fractal characteristics of the atmosphere thermal radio radiation // Abstracts Int. Conf. «Turbulence and Wave Processes», dedicated to the centenary of Mikhail D. Millionshchikov (1913–1973) (November 26–28, 2013, Moscow, MSU). – М.: INTUIT.RU Ltd., 2013. P. 155–158.
4. Potapov A. A. Research of the fractal and scaling properties of tropospheric and ionospheric turbulence with artificial perturbations // Proc. of Int. Conf. «Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence: MSS – 14» (Moscow, Space Research Institute of RAS, November 24–27, 2014). – М.: ЛЕНАНД, 2014. P. 334–339.

5. Podosenov S. A., Potapov A. A., Foukzon J., Men'kova E. R. Nonholonomic, fractal and related structures in relativistic continuous media, electrodynamics, quantum mechanics and cosmology. 3 vols / Ed. Potapov, A. A. – Moscow: LENAND Publ. 2015. – 1128 pp.
6. Potapov Alexander A. Fractal Radar: Towards 1980 – 2015 // Proc. of CHAOS 2015 Int. Conf. (26–29 May 2015, France). – Paris: Henri Poincaré Institute, 2015. P. 559–573.
7. Potapov Alexander A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. Chapter 12 in the book: The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / Ed. C. Skiadas. – Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. P. 195–218.

6-56

**ПРИМЕНЕНИЕ
ЦЕНТРАЛЬНО-ПРОТИВОПОТОЧНЫХ СХЕМ
В ЛАГРАНЖЕВЫХ МАССОВЫХ КООРДИНАТАХ
ДЛЯ СРЕД С КОНТАКТНЫМИ РАЗРЫВАМИ**

А. В. Приданников

АО «Государственный ракетный центр
имени академика В. П. Макеева», Миасс, Россия

E-mail: bugs001@mail.ru

В настоящее время для численного моделирования ударно-волновых процессов в механике сплошных сред широкое распространение получили противопоточные схемы, явно введенные Годуновым. При этом, применение этих методов для случаев сложных уравнений состояния является весьма нетривиальной задачей [1]. Наряду с противопоточными методами, для моделирования ударно-волновых процессов применяются так называемые центральные схемы [2, 3]. Основным их преимуществом перед вышеупомянутыми методами является отсутствие необходимости в решении задачи о распаде произвольного разрыва. При применении центральных схем к моделированию процессов, в которых имеются контактные разрывы, возникает проблема так называемой «общей ячейки», расположенной в месте контакта.

В работе рассмотрено применение центрально-противопоточных схем [3] для моделирования ударно-волновых процессов в средах с контактными разрывами. Предлагается следующий алгоритм расчета параметров на контактном разрыве. А именно, в случае прохождения через этот разрыв ударной волны применяется метод Куропатенко [4]. При прохождении волны разрежения используется специальная процедура раздельного интегрирования. Следует заметить, что предлагаемый алгоритм не накладывает каких-либо ограничений на форму уравнений состояния. Проведены тестовые расчеты для одномерного пространства в лагранжевых массовых координатах и показано, что предлагаемый алгоритм не уступает в точности существующим противопоточным схемам при уменьшении вычислительных затрат для сложных уравнений состояния.

Литература

1. Прокопов Г. П. К вопросу о приближенных реализациях метода Годунова // Препринт ИПМ. – № 4, 2011. – 31 с.
2. Chang S. C. To W. M. A new numerical framework for solving conservation laws – The method of space-time conservation element and solution element // NASA TM-104495, 1991. – 115 p.
3. Kurganov A, Noelle S., Petrova G. Semi-discrete central-upwind schemes for hyperbolic conservation laws and Hamilton-Jacobi equations // SIAM Journal on Scientific Computing. – Vol. 23, 2001. – 707–740 pp.
4. Куропатенко В. Ф. Метод расчета ударных волн // ДАН СССР. – Том 3(4), 1960.

**CENTRAL-UPWIND SCHEMES
IN MASS LAGRANGIAN COORDINATES
FOR MEDIA WITH CONTACT
DISCONTINUITIES**

A. V. Pridannikov

Joint Stock Company «Academician V. P. Makeyev State
Rocket Centre», Miass, Russia

E-mail: bugs001@mail.ru

At present upwind schemes explicitly introduced by Godunov are widely used to numerically simulate shock-wave processes in mechanics of continua. In so doing, the application of the schemes for complex equations of state is a rather nontrivial task [1]. In addition to the upwind methods the so-called central schemes are used to simulate shock-wave processes [2, 3]. Their key advantage as against the above mentioned methods is no need in Riemann solvers (which are physics-specific). When central schemes are used to simulate processes with contact discontinuity, there occurs a problem of the so-called «mixed cell» in a place of contact.

This work deals with the application of central-upwind schemes [3] for simulation of 1D shock wave processes in media with contact discontinuities. The following algorithm is proposed to compute parameters in contact discontinuity. In particular, when a shock wave passes through the contact, Kurapatenko's method [4] is applied. When a rarefaction wave passes by, a special projection procedure is implemented. It should be noted that the proposed algorithm imposes no limits on a type of equations of state. Test runs are performed for the 1D environment in mass Lagrangian coordinates and proved that the proposed algorithm does not yield to available upwind schemes in accuracy and has less computational efforts for complex equations of state.

References

1. Prokopov G.P. On approximation of implementation of Godunov's method // Preprint IPM. – № 4, 2011. – 31 p.
2. Chang S. C. To W. M. A new numerical framework for solving conservation laws – The method of space-time conservation element and solution element // NASA TM-104495, 1991. – 115 p.

3. Kurganov A., Noelle S., Petrova G. Semi-discrete central-upwind schemes for hyperbolic conservation laws and Hamilton-Jacobi equations. – Vol. 23, 2001. – 707–740 pp.
4. Kuropatenko V. F. The method of shock wave calculation // Doklady Akademii Nauk SSSR. – Volume 3(4), 1960.

6-57

ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ В ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Е. Ю. Просвиряков

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия
Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: evgen_pros@mail.ru

В данной работе мы хотим обсудить вопрос, как распространяются возмущения давления в несжимаемой среде и возможно ли их самоподдерживающееся движение в вязкой жидкости. Такие гипотетические движения в принципе вполне возможны, так как в несжимаемой жидкости давление определяется скоростью, которая неизбежно появляется при наличии градиента давления. Трудность состоит в том, что в системе уравнений Навье–Стокса, описывающих движения вязкой несжимаемой жидкости нет эволюционного уравнения для давления, а общая зависимость его от компонент скорости известна только для потенциальных течений. Для того, чтобы оставаться на нужном уровне строгости, в данной работе ограничимся рассмотрением движений вблизи оси, вдоль которой распространяется возмущение давления. В этом случае можно использовать известный класс точных решений уравнений движения, применяемый при описании течений между параллельными пластинами. В этом классе решений вблизи оси, соединяющей середины пластин, перпендикулярные оси компоненты скорости малы и могут быть представлены в виде линейных разложений по поперечным координатам, с коэффициентами, зависящими от продольной координаты и времени, что приводит нас к замкнутой системе дифференциальных уравнений.

WAVES OF PRESSURE IN VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID

E. Yu. Prosviryakov

Kazan National Research Technical University
named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia
Institute of Engineering Science, Ural Branch of The Russian
Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

E-mail: evgen_pros@mail.ru

The motivation for this study is the desire to answer the question of how pressure perturbations propagate through the incompressible medium and whether a self-

propelled perturbation of pressure can exist in a viscous fluid. In principle, such hypothetical motions are quite possible because pressure in incompressible fluids is defined by velocity, which inevitably appears due to the pressure gradient. The difficulty about this statement is that the system of the Navier–Stokes equations describing motion in a viscous incompressible fluid does not involve the evolutionary equation for pressure. Moreover, its general dependence on the velocity components is known only for potential flows. In order to ensure the desired level of the rigor, we restrict ourselves to consideration of the motion in the vicinity of the axis, along which the perturbed pressure is spread. In this case, we can use a known class of exact solutions to the equation of motion generally applied for describing flows between parallel plates. For this class of solutions, in the vicinity of the axis, connecting the plate centers, the velocity components normal to this axis are small and can be represented as a linear expansion in terms of transverse coordinates with the coefficients depending on the longitudinal coordinate and time. The result of this transformation is a closed system of differential equations.

6-58

ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ АТОМОВ В ТРОЙНОЙ СИСТЕМЕ FE-SI-C

Я. М. Ридный, А. А. Мирзоев

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

E-mail: ridnyiim@susu.ru

Углеродистая сталь – это наиболее распространенный материал, используемый в настоящее время. Кремний, растворенный в железе, повышает растворимость углерода в нем. Для построения надежных моделей, верно описывающих термодинамику сплавов Fe-Si-C, необходимы точные значения энергии взаимодействия между атомами кремния и углерода, растворенными в матрице ОЦК-железа.

Расчеты проводились из первых принципов полнопотенциальным методом LAPW, в программном пакете WIEN2k. Параметры моделирования составили: суперячейка из 54 атомов железа, $N_k = 4 \times 4 \times 4$ точки; $K_{\max} = 5$ а.е.⁻¹; $R_m(\text{Fe}) = 2,0$ а.е.; $R_m(\text{Si}) = 2,0$ а.е.; $R_m(\text{C}) = 1,2$ а.е. [1]. Для расчетов использовался вычислительный комплекс ЮУрГУ-Торнадо [2].

В данной работе произведен расчет энергий взаимодействия между парами атомов углерода, кремния, и кремний-углерод в ОЦК-железе для разных расстояний между ними. Проведено сопоставление полученных значений энергии с литературными данными.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 16-19-10252.

Литература

1. Ридный, Я. М. Определение оптимальных параметров моделирования для максимально точных расчетов энергий в ОЦК-железе / Я. М. Ридный, А. А. Мирзоев, Д. А. Мирзаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 63–69.
2. <http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/tornado/>

AB INITIO COMPUTER SIMULATION INTERACTION ATOMS IN THE TERNARY SYSTEM FE-SI-C.

Ya. M. Ridnyi, A. A. Mirsoev

South-Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russia

E-mail: ridnyiim@susu.ru

Carbon steels are the most common construction materials. Silicon dissolved iron increases the solubility of carbon in it. To build robust models, truly describe the thermodynamics alloys Fe-Si-C, requires accurate value of the interaction energy between silicon and carbon atoms dissolved in bcc iron matrix.

Calculations will be carried out by the first principle full potential methods LAPW with software package WIEN2k [1]. Simulation parameters are as follows: supercell of 54 iron atoms, $N_k = 4 \times 4 \times 4$ points; $K_{\max} = 5$ a.e.⁻¹; $R_{mt}(\text{Fe}) = 2,0$ a.e.; $R_{mt}(\text{Si}) = 2,0$ a.e.; $R_{mt}(\text{C}) = 1,2$ a.e. [1]. For calculations used computer complex SUSU-Tornado [2].

In this work were calculated energy interaction between pairs atoms of carbon, silicon, and silicon-carbon in bcc iron for different distances between them. A comparison of the energy values with the literature data.

The study was performed by a grant from the Russian Science Foundation № 16-19-10252.

References

1. Ridnyi Ya. M., Mirzoev A. A., Mirzaev D. A. Determining the optimal modeling parameters for maximum presize calculations of energy in bcc-iron. Bulletin of South Ural State University. Series of «Mathematics. Mechanics. Physics», 2016, Vol. 8, no. 4, pp. 63–69. (in Russ.).
2. <http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/tornado/>

6-59

О ТОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

В. Н. Робук

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна,
Россия

E-mail: robuk@jinr.ru, VRobuk@gmail.com

I. Рассмотрим сумму бесконечного в обе стороны ряда:

$$U(x, \alpha, b) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(k+\alpha+1)} (x-b)^{k+\alpha}. \quad (1)$$

Здесь x – действительная переменная ($-\infty < x < +\infty$); b – произвольное комплексное число; α – произвольное комплексное число при условии $\alpha \neq m \in (-1, -2, -3, \dots)$. При дифференцировании по x выражение (1) превращается само в себя. Иными словами:

$$\frac{dU}{dx} = U \quad (2)$$

При $\alpha = n \in (0, 1, 2, 3, \dots)$ выражение (1) превращается в классическую экспоненту. ВОПРОС: Можно ли называть выражение (1) точным решением уравнения (2)? ОТВЕТ: Если найдутся приложения (а они давно уже есть, см. например [1]), то называть можно как угодно, в том числе и точным решением.

За исключением уравнения Эйлера, решениями типа (1) обладают практически все обыкновенные линейные однородные дифференциальные уравнения с полиномиальными по x коэффициентами. Изложение техники построения таких решений и составляет основную часть настоящего сообщения.

II. Вопрос о точности точных решений остается даже тогда, когда мы рассматриваем только классические экспоненты в качестве решений линейного однородного обыкновенного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами. Действительно, для того что бы решить такое уравнение нам необходимо решить соответствующее алгебраическое уравнение с заданными постоянными коэффициентами и затем возвести трансцендентное число e в степень представляющую из себя приближенно вычисленную величину. Точность вычисления характеристических чисел не должна быть меньше точности задания коэффициентов. В настоящем сообщении будет представлена новая редакция работы [2], в которой было показано, как обойтись и без числа e и без решения алгебраического уравнения. На базе работы [2] можно строить соответствующие численные алгоритмы, см. например [3].

III. Для нелинейного уравнения (см. [4]):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a_0 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + (a_1 + a_2 U) \frac{\partial U}{\partial x} + a_3 + a_4 U + a_5 U^2$$

построен ряд аналитических решений с помощью обобщения понятия линеаризующей подстановки Коула-Хопфа. Начало обобщенного метода линеаризации заложено в [5] и частично развито в [6, 7]. Одной из целей работ, представленных на конференциях [8, 9, 10], было расширение и изучение множества решений линейных уравнений с последующим использованием в нелинейных задачах посредством этого метода.

Литература

1. John P. Costella, « $[p, q] \neq i\hbar$ », arXiv: quant-ph/9505014v1, 24 May 1995.

2. V. N. Robuk, A constructive formula for function of matrix. Alternative to the Lagrange-Sylvester formula, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 534, pp 319–323, 2004.
3. М. В. Старов, Об алгоритме Робука вычисления матричных функций, Вестник ТГУ, т. 12, вып. 1, стр. 135–136, 2007.
4. Я. Б. Зельдович, Горение: нелинейная температурная волна в веществе, выделяющем тепло, в сб. Нелинейные волны. Распространение и взаимодействие, под ред. акад. А. В. Гапонова-Грехова, стр. 30–41, «НАУКА», 1981.
5. В. Н. Робук, «О классификации эволюционных уравнений второго порядка» – В сб. Операторные пространства и функциональный анализ, под ред. акад. В. А. Марченко, «Наукова Думка», Киев, стр. 58–66, 1987 г.
6. В. Н. Робук, Алгоритмы построения конечно представленных алгебр Ли и их применение в анализе точной интегрируемости нелинейных дифференциальных уравнений, Автореферат диссертации к. ф.-м. н., ОИЯИ, г. Дубна, 1995 г.
7. В. П. Гердт, В. Н. Робук, В. М. Северьянов, Построение конечно представленных алгебр Ли, Журнал вычислительной математики и математической физики, № 11, стр. 20–34, 1996 г.
8. В. Н. Робук, Многопараметрическое решение параболического уравнения, Сб. тезисов Международной конференции «XVIII Харитоновские научные чтения по проблемам физики энергий высокой плотности», стр. 120–121, г. Саров, 19–22 апреля 2016 г.
9. В. Н. Робук, Многопараметрическое решение параболического уравнения, Труды Международной конференции «XVIII Харитоновские научные чтения по проблемам физики энергий высокой плотности», г. Саров, 19–22 апреля 2016 г.
10. В. Н. Робук, Анализ многопараметрических решений параболического уравнения, Сб. тезисов XVI международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», стр. 98-99, г. Саров, 3–7 октября 2016 г.

ON EXACT SOLUTIONS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS

V. N. Robuk

Joint Institute for nuclear research, Dubna, Russia
E-mail: robuk@jinr.ru , VRobuk@gmail.com

I. Consider a sum of serious infinite on both hands:

$$U(x, \alpha, b) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(k+\alpha+1)} (x-b)^{k+\alpha}. \quad (1)$$

Where x – real variable ($-\infty < x < +\infty$); b – arbitrary complex parameter; α – arbitrary complex parameter if $\alpha \neq m \in (-1, -2, -3, \dots)$. When differentiated by x expression (1) is transferred in to itself. In other words:

$$\frac{dU}{dx} = U \quad (2)$$

When $\alpha = n \in (0, 1, 2, 3, \dots)$ – expression (1) turns into a classical exponent. QUESTION: Is it possible to call expression (1) the exact solution of equation (2)?

ANSWER: If there are any applications (and they do already exist; see e.g. [1]) they can be given any name, including the exact solution). The solutions of type (1) are possible with practically all ordinary linear homogenous differential equations with polynomial on x coefficients, excluding Euler equation. The calculation method for these solutions is the basic part for this report.

II. The precision of exact solutions remains even when we consider only classical exponents as solutions of linear homogenous ordinary differential equation with constant coefficients. It is true, that to solve such an equation we must solve corresponding algebraic equation with given constant coefficients. And then we must raise transcendental value e to a power which is an approximately calculated value. The exactness of eigenvalues must be as exact as given coefficients. In this report a new edition of [2] is presented. It is demonstrated what to do without value e and without solution of algebraic equation. On the basis of [2] corresponding numerical algorithms can be built e.g. [3].

III. For the nonlinear equation [4]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a_0 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + (a_1 + a_2 U) \frac{\partial U}{\partial x} + a_3 + a_4 U + a_5 U^2$$

a number of analytical solutions is obtained by generalization Cole-Hopf substitution. The beginning of this generalization method is presented in [5] and partially developed in [6, 7]. One of the goals of the works presented at the conferences [8, 9, 10] was to expand and study a set of linear equations with subsequent use in nonlinear models by this method.

References

1. John P. Costella, « $[p, q] \neq ih$ », arXiv: quant-ph/9505014v1, 24 May 1995.
2. V. N. Robuk, A constructive formula for function of matrix. Alternative to the Lagrange-Sylvester formula, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 534, pp 319–323, 2004.
3. М. В. Старов, Об алгоритме Робука вычисления матричных функций, Вестник ТГУ, т. 12, вып. 1, стр. 135–136, 2007.
4. Я. Б. Зельдович, Горение: нелинейная температурная волна в веществе, выделяющем тепло, в сб. Нелинейные волны. Распространение и взаимодействие, под ред. акад. А. В. Гапонова-Грехова, стр. 30–41, «НАУКА», 1981.
5. В. Н. Робук, «О классификации эволюционных уравнений второго порядка» - В сб. Операторные пространства и функциональный анализ, под ред. акад. В. А. Марченко, «Наукова Думка», г. Киев, стр. 58–66, 1987 г.
6. В. Н. Робук, Алгоритмы построения конечно представленных алгебр Ли и их применение в анализе точной интегрируемости нелинейных дифференциальных уравнений, Автореферат диссертации к. ф.-м. н., ОИЯИ, г. Дубна, 1995 г.
7. В. П. Гердт, В. Н. Робук, В. М. Северьянов, Построение конечно представленных алгебр Ли, Журнал вычислительной математики и математической физики, № 11, стр. 20–34, 1996 г.
8. V. N. Robuk, MULTI-PARAMETER SOLUTIONS OF THE PARABOLIC EQUATION, Abstracts of International conference «XVIII Khariton's topical scientific readings on problems

of the physics of high-density energies», pp. 120–121, Sarov, 19–22 April, 2016.

9. В. Н. Робук, Многопараметрическое решение параболического уравнения, Труды международной конференции «XVIII Харитоновские научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергий», г. Саров, 19–22 апреля, 2016.

10. В. Н. Робук, Анализ многопараметрических решений параболического уравнения, Сб. тезисов XVI Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», стр. 98–99, г. Саров, 3–7 октября, 2016 г.

6-60

О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛОСКИМ СЛОЕМ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ТРЕХ СЛУЧАЕВ ВНЕШНЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

Представлено развитие разрабатываемой авторами методики численного моделирования взаимодействия излучения с плоским слоем смеси веществ [1]. Рассматриваются три случая внешнего излучения: 1) излучение падает на слой с одной стороны, а на другой стороне выходит свободно [1]; 2) на обе границы падает внешнее излучение; 3) излучение падает с одной стороны, другая граница слоя – зеркальная стенка.

Математическая модель представляет собой систему уравнений, включающую уравнения кинетики для населенностей уровней с коэффициентами, зависящими от интенсивности излучения, уравнение переноса для интенсивности излучения с коэффициентами, вычисляемыми по населенностям уровней и электронной температуре, и граничными условиями, соответствующими рассматриваемому случаю, уравнение энергобаланса для электронной температуры с надлежащими краевыми условиями. Обсуждаются физическая, математическая и вычислительная модели, результаты численного моделирования. Особенностью разрабатываемой авторами методики является учет вклада каждой, включенной в модель спектральной линии, что создает дополнительные трудности, но позволяет получать более детальную картину. Разработаны параллельные алгоритмы и программы. Алгоритмы построения расчетной сетки по каждой из трех переменных учитывают априорную информацию – наличие пограничных слоев, дельтаобразное поведение некоторых величин, характерные масштабы, как областей определения, так и областей значения функций, симметрию, в случаях, если из физических соображений ясно, что она есть, и т. п. Использование таких сеток позволило увеличить количество рассмат-

риваемых спектральных линий и существенно сократить время вычислений. Сравнение результатов, полученных по двум, существенно отличающимся друг от друга, методам, продемонстрировало достоверность результатов.

Работа поддержана проектом УрО РАН 15-7-1-13.

Литература

1. Рубина Л. И., Ульянов О. Н., Чашин М. А. О развитии двух параллельных алгоритмов численного моделирования взаимодействия излучения с веществом // Вестник. УГАТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. Т.17, № 2(55). С. 64–74.

ON MODELING THE INTERACTION OF RADIATION WITH A FLAT LAYER OF SUBSTANCE FOR THREE CASES OF EXTERNAL RADIATION

M. A. Chaschin, L. I. Rubina, O. N. Ulyanov

Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: cma@imm.uran.ru, rli@imm.uran.ru,
secretary@imm.uran.ru

The technique of numerical simulation of the interaction of radiation with a flat layer of a mixture of substances is presented [1]. We consider the cases: 1) radiation falls on the layer on the one side, while on the other side goes free [1]; 2) radiation incidents on the layer on the one side, and other boundaries of the layer is a mirror wall; 3) external radiation falls on both borders.

The mathematical model includes system of level kinetics equations with coefficients depending on the intensity of radiation, the radiative transfer equation with coefficients calculated on level populations and electron temperature, the energy balance equation for electron temperature. The system of equations is supplemented by appropriate for considered case boundary conditions. The physical, mathematical and computational models also the results of numerical calculations are discussed. A feature of the technique developed is account the contribution of each spectral line that included in the model. This creates additional difficulties, but allows us to get a more detailed picture. Parallel algorithms and codes were designed.

Algorithms for constructing computational grids take into account a priori information, e.g. boundary-layer behavior of some values, characteristic scales of domains or images of functions, symmetry, and so on. The use of such nets has increased the number of considered spectral lines, and significantly reduces the computation time. Comparison of the results of numerical calculations obtained in two different from each other methods demonstrated the reliability of the results.

The work was supported by the project of UB RAS 15-7-1-13.

References

1. Rubina L. I., Ulyanov O. N., Chaschin M. A. O razvitií dvukh parallel'nikh algoritmov chislennogo modelirovaniya vzaimodeistviya izlucheniya s veshestvom (On the development of two parallel algorithms of numerical simulation of the interaction of radiation with matter) // Vestnik UGATU. Ser. Control, computers, and information. 2013. T.17, № 2 (55). С. 64–74. (In Russian)

6-61

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОНТЕЙНЕРА АППАРАТУРНОГО С БЛОКОМ МНОГОКАДРОВОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

А. А. Рякин, О. В. Койнов,
М. В. Никульшин, О. С. Путилин

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

E-mail: artemryakin@mail.ru

В докладе представлены результаты расчетных исследований температурных полей и полей скоростей воздуха внутри контейнера аппаратурного. Цель работы: определение необходимого количества термоэлектрических кондиционеров OverFrost 40 и калорифера Schroff CR 027 для поддержания оптимального значения температуры воздуха внутри контейнера, при работе блока многокадровой системы регистрации линейного индукционного ускорителя электронов при отрицательных и положительных температурах окружающей среды.

Расчетные исследования проводились в несколько этапов на трехмерной конечно элементной модели, в газодинамическом модуле инженерной программы, реализующей метод конечных элементов.

На первом этапе определялись температурные поля и поля скоростей воздуха внутри контейнера, для одного кондиционера и калорифера, расположенных на задней стенке внутри контейнера аппаратурного. Расчеты проводилось для режимов работы при отрицательной и положительной температуре внешней среды.

На втором этапе определялось необходимое количество кондиционеров для достаточного охлаждения воздуха внутри контейнера до оптимального значения температуры на режиме работы блока при положительной температуре внешней среды.

THERMAL ANALYSIS OF THE INSTRUMENTATION CONTAINER FOR THE MULTI-FRAME RECORDING SYSTEM IN THE LINEAR INDUCTION ACCELERATOR OF ELECTRONS

A. A. Ryakin, O. V. Koinov,
M. V. Nikulshin, O. S. Putilin

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

E-mail: artemryakin@mail.ru

Both temperature and air-velocity fields inside the instrumentation container were calculated and results of these computational studies are presented. The goal of this work was to determine the number of OverFrost 40 thermoelectric air conditioners and Schroff CR 027 air heaters needed to maintain the optimal air temperatures inside the container when the multi-frame recording system in the linear induction accelerator of electrons functions in conditions of negative and positive ambient temperatures.

Calculations were carried out in several stages in the 3D finite element model, in the gas dynamic module of the engineering program that implements the finite element method.

The first stage determined temperature fields and air-velocity fields inside the container for one air conditioner and one heater, both located at the rear wall inside the instrumentation container. Calculations were performed for operational conditions of positive and negative ambient temperatures.

The second stage determined the number of conditioners needed to ensure sufficient cooling of the air inside the container down to the optimal temperature in the positive temperature operational environments.

6-62

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА НЬЮТОНА С КВАДРАТИЧНОЙ ПОПРАВКОЙ И ТЕОРЕМА О ЕГО ЛОКАЛЬНОЙ СХОДИМОСТИ

М. В. Саликова, П. Ю. Емельянов, М. В. Пчелинцев

Снежинский Физико-Технический Институт
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
«МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: marina.salikova.95@mail.ru, mvpchelintsev@mail.ru

Модификация метода Ньютона с квадратичной поправкой анонсирована в [1]. Его идея состоит в том, что для не-линейного отображения $F: X \subseteq R^n \rightarrow Y \subseteq R^n$ решения уравнения $F(x) = 0$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ являются асимптотически устойчивыми узлами системы дифференциальных уравнений второго порядка, которые описывают геодезические линии в римановой метрике на X , индуцированной из Y отображением F (при произвольном задании вектора начальной скорости

в виде $x'(t_0) = -\alpha [DF(x(t_0))]^{-1} F(x(t_0))$, $\alpha > 0$. Эти уравнения, как хорошо известно, имеют вид

$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} = - \sum_{i,j=1}^n \Gamma_{ij}^k(x) \frac{dx_i}{dt} \frac{dx_j}{dt}, k = 1, 2, \dots, n,$$

где $\Gamma_{ij}^k(x)$ – коэффициенты связности (они же символы Кристоффеля). В [2] эта теорема доказана при минимальных в определенном смысле условиях, предъявляемых к отображению F . При заданном векторе скорости $x'(t) = dx/dt$ указанные уравнения позволяют непосредственно рассчитать вектор ускорения $x''(t) = (d^2x)/(dt^2)$. Модификация метода Ньютона с квадратичной поправкой получается, если в разложении решения $x(t)$ в ряд Тейлора

$$x(t_0 + \Delta t) = x(t_0) + x'(t_0)\Delta t + \frac{1}{2}x''(t_0)\Delta t^2 + \dots$$

взять в правой части первые три слагаемых. Эффективность данной модификации в сравнении с методом Ньютона проиллюстрирована на модельном примере в [3].

Первоначально коэффициенты связности вычислялись по известным формулам через частные производные от компонент метрического тензора. Однако объем вычислений можно существенно уменьшить, если воспользоваться тем фактом, что эти коэффициенты являются коэффициентами разложения вторых производных от отображения F по натуральному реперу. Эта возможность реализована в настоящей работе.

Так же в настоящей работе получена теорема о локальной сходимости метода, которая до сих пор не анонсировалась.

Литература

1. Пчелинцев М. В., Скоркин Н. А. Геометрический смысл метода Ньютона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, механика, физика». 2009. Вып. 1. № 22(159). С. 4–11.
2. Пчелинцев М. В., Скоркин Н. А. Теорема существования и единственности решения для одной специальной системы дифференциальных уравнений и ее приложения // Вестник НИЯУ МИФИ. Прикладная математика и математическая физика. 2013. Т. 2. № 1. С. 59–62.
3. Саликова М. В., Емельянов П. Ю., Пчелинцев М. В. Одна модификация метода Ньютона // IX Ассамблея студентов и школьников «Молодежь – будущее атомной промышленности России». Аннотации докладов. Снежинск, 29 ноября 2014.

OPTIMIZATION OF THE NEWTON'S METHOD WITH QUADRATIC CORRECTION AND THE THEOREM OF ITS LOCAL CONVERGENCE

M. V. Salikova, P. Y. Emelyanov, M. V. Pchelintsev

Snezhinsk Physics and technology Institute National Research Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia

E-mail: marina.salikova.95@mail.ru, mvpchelintsev@mail.ru

The modification of the Newton's method with quadratic correction is announced in [1]. Its concept is as follows. For a nonlinear image $F: X \subseteq R^n \rightarrow Y \subseteq R^n$ solutions of an equation $F(x) = 0$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ are asymptotically stable nodes of a set of second order differential equations, which describe geodesic lines in Riemann metric on X , induced from Y by an image F (with the initial velocity vector randomly given as $x'(t_0) = -\alpha [DF(x(t_0))]^{-1} F(x(t_0))$, $\alpha > 0$). These equations, as is widely known, take the form

$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} = - \sum_{i,j=1}^n \Gamma_{ij}^k(x) \frac{dx_i}{dt} \frac{dx_j}{dt}, k = 1, 2, \dots, n,$$

where $\Gamma_{ij}^k(x)$ are coupling coefficients (or Christoffel's symbols). In [2] this theorem is proved with in a certain sense minimal requirements to an image F . With the given velocity vector $x'(t) = dx/dt$ said equations allow to directly calculate an acceleration vector $x''(t) = (d^2x)/(dt^2)$. We get the modification of the Newton's method with quadratic correction, if we take first three summands from the right part in the expansion of solution $x(t)$ in Taylor series

$$x(t_0 + \Delta t) = x(t_0) + x'(t_0)\Delta t + \frac{1}{2}x''(t_0)\Delta t^2 + \dots$$

Efficiency of this modification in comparison with the Newton's method is illustrated on a model example in [3].

Coupling coefficients were initially calculated by known formulas through partial derivatives from components of the metric tensor. However, the amount of computation can be significantly reduced by using the fact, that these coefficients are coefficients of the expansion of second derivatives from image F in the natural frame. This feature is implemented in the present work.

Also in the present work is obtained a theorem of the local convergence of the method, which yet has not been announced.

References

1. Pchelintsev M. V., Skorkin N. A. The Geometrical Meaning of the Newton's Method // SUSU Herald. «Mathematics, mechanics, physics» series. 2009. Ed. 1. № 22 (159). P. 4–11
2. Pchelintsev M. V., Skorkin N. A. The Theorem of Existence and Uniqueness of a Solution for a Special Set of Differential Equations and its Applications // NRNU MEPhI Herald. Applied mathematics and mathematical physics. 2013. V. 2. № 1. P. 59–62.
3. Salikova M. V., Emelyanov P. Y., Pchelintsev M. V. A Modification of the Newton's Method // IX Assembly of students and pupils «Youth is Russian atomic industry future». Abstracts. Snezhinsk, November 29, 2014.

6-63

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ДВУХФАЗНЫХ СРЕДАХ
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕЧЕНИЙ**

А. А. Серёжкин, И. С. Меньшов

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

E-mail: aaserezhkin@gmail.com

При моделировании процессов течения двухфазных гетерогенных сред прежде всего возникает вопрос связанный с выбором модели. На сегодняшний день существует два типа математических моделей для расчетов течений двухфазных сред. Это модель Баера-Нунзиато, описывающая двухфазную гранулированную среду плотной упаковки, и модель разреженных мелких частиц (облако частиц). Эти модели, как правило, основываются на законах сохранения консервативных параметров, выписанных для каждой фазы, и отличаются замыкающими соотношениями. Вид замыкающих соотношений диктуется особенностями структуры среды, которая может быть представлена в виде разреженных твердых частиц в газе, связанного твердого скелетона, образованного спрессованными частицами твердой фазы, или сильно пористым твердым телом. Каждая модель работает для определенного режима течения, и при расчетах других режимов дает нефизичные численные эффекты. Мы предлагаем модель, позволяющую в единой манере проводить расчет процессов, связанных с переходами режимов течения. Например, разгрузка спрессованных гранул твердого тела с последующим их разлетом в пространство, или наоборот, ударное компактирование взвешенных частиц в газе в плотный слой. Модель замкнута, удовлетворяет условию возрастания энтропии и хорошо вписывается в основную концепцию расчета течений многофазных сред, реализованную в среде программного комплекса ТИС. В комплексе реализован численный метод С. К. Годунова, адаптированный для уравнений двухфазной гидродинамики на произвольно движущихся эйлеровых сетках.

В докладе приводится подробное описание модели и численного метода. Обсуждается вопрос о правильности учета неконсервативной части системы уравнений в дискретной модели. Проводится верификация модели на ряде тестовых задач по расчету ударно-волновых процессов в двухфазных средах в широком диапазоне режимов течений.

**MODELING OF SHOCK WAVE PROCESSES
IN TWO-PHASE MEDIUM IN WIDE RANGE
OF REGIMES OF FLOW.**

А. А. Serezhkin, I. S. Menshov

Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: aaserezhkin@gmail.com

In modeling of processes of multiphase heterogeneous medium flow emerge the problem of choosing the mathematical model of medium. We can separate all known models on two types. First type is models based on Baer-Nunziato approach, that describes two-phase granular medium in close-bed structure. Second type is cloud of particles models, that describes two-phase granular medium when particles of solid phase are separated in gas and do not interact. All models are based on conservation laws for each phase and differ by closing relations. Closing relations defines by structure of medium. Structure can be presented by rarefied particles of solid phase in gas or by solid skeleton in gas. Skeleton is formed by compressed particles or by porous solid material. Each known model works only for appointed regime of flow defined by structure of medium, in simulations of another regimes gives non-physical effects. We propose new model that allows to simulate all regimes of flow in unique way, even regimes when structure of medium changes. For example, unloading of compressed grains of solid material with ejection of grains in the air. Or shock compaction of cloud of particles to the layer of compressed solid porous material. Proposed model is closed and satisfy entropy inequality. Model realized in complex of applied programs TIS. In complex we use Godunov-type method for non-conservative system of equations on arbitrary moving euler grids.

We propose detailed description of model and numerical method in lecture. Also we propose results of verification on test problems of shock wave processes simulation in two-phase medium in wide range of regimes of flow.

6-64

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ
КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА**

Е. М. Сорокина, А. Г. Обухов

Тюменское высшее военно-инженерное командное
училище, Тюмень, Россия
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

E-mail: cemaia@mail.ru, aobukhov@tsogu.ru

Для описания сложных течений упругой сплошной среды, обладающей диссипативными свойствами – вязкостью и теплопроводностью, используется полная система уравнений Навье–Стокса с учетом действия силы тяжести [1].

В работе математически и численно моделируются два конкретных физических процесса: возникновение свободной конвекции в атмосфере Земли при локальном круговом нагреве ее поверхности и возникновение свободного конвективного течения газа в замкнутой теплоизолированной емкости при локальном кольцевом нагреве ее нижней поверхности.

В модели сжимаемой сплошной среды предложены конкретные начально-краевые условия [2, 3] для

полной системы уравнений Навье–Стокса, позволяющие численно строить решения для описания течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа в начальной стадии теплового конвективного потока, инициированного локальным прогревом подстилающей поверхности в условиях действия силы тяжести.

Предложены математические модели локального кругового и кольцевого нагрева вязких сжимаемых теплопроводных газов, которые в условиях действия силы тяжести приводят к возникновению конвективных потоков.

Численными методами впервые построены трехмерные нестационарные течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа в разномасштабных конвективных потоках при условии действия силы тяжести.

Показано, что при отсутствии учета действия силы Кориолиса в конвективных потоках не возникает осевая закрутка газа. Движение газа в этом случае имеет только радиальный характер.

С помощью явных разностных схем и предложенных двух конкретных начально-краевых условий построены приближенные решения полной системы уравнений Навье–Стокса, определены термодинамические, газодинамические, скоростные и энергетические характеристики трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа в возникающих конвективных потоках.

Численными экспериментами проведено исследование зависимости скоростей течений в возникающем конвективном потоке сжимаемого вязкого теплопроводного газа от температуры нагрева.

Основным результатом данной работы является то, что численное решение в нестационарном случае полной системы уравнений Навье–Стокса с корректно поставленными начальными и краевыми условиями позволяет получить известное стационарное конвективное течение, вызванное нагревом придонной части. Именно такой механизм формирования стационарного радиального течения в придонной части с дополнительным учетом силы Кориолиса, предложенный в [4] и более детально исследованный в [5], лежит в основе возникновения и функционирования природных восходящих закрученных потоков.

Поддержано Министерством образования и науки РФ (проект № 2014/229).

Литература

1. Баутин С. П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике. – Новосибирск: Наука, 2009. – 368 с.
2. Баутин С. П., Обухов А. Г. Одно точное стационарное решение системы уравнений газовой динамики // Известия вузов. Нефть и газ. – 2013. – № 4. – С. 81–86.
3. Баутин С. П., Обухов А. Г. Об одном виде краевых условий при расчете трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа // Известия вузов. Нефть и газ. – 2013. – № 5. – С.55–63.
4. 123. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. – Новосибирск: Наука, 2008. – 96 с.
5. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г., Баутин К. В. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты – Новосибирск: Наука; Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. – 215 с.

MATH MODELING INITIAL STAGE CONVECTIVE GAS FLOW

T. M. Sorokina, A. G. Obukhov

Tyumen Higher Military Engineering Command School,
Tyumen, Russia

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

E-mail: cemaia@mail.ru, aobukhov@tsogu.ru

In order to describe complex flows elastic continuous medium having dissipative properties – viscosity and thermal conductivity, using the full Navier–Stokes equations with the force of gravity [1].

The work mathematically and numerically simulated two specific physical process: the emergence of free convection in the Earth's atmosphere at a local heating of the surface of the circular and the emergence of free convective flow of gas in a closed heat-insulated tank at a local ring heating its lower surface.

In the model of compressible continuum proposed specific initial and boundary conditions [2, 3] for the full Navier–Stokes equations numerically allowing to build solutions for the flows of a compressible viscous heat-conducting gas in the initial stage of the thermal convection flow initiated by local heating of the land surface under the action gravity.

The mathematical model of the local heating of the circular and annular viscous compressible thermally conductive gas, which under the force of gravity give rise to convection currents.

Numerical methods for the first time constructed three-dimensional unsteady viscous compressible heat-conducting gas in a different scale convective flows subject to the force of gravity.

It is shown that in the absence of taking into account the Coriolis force in the convective flows arise axial spin gas. Gas flow in this case has only a radial character.

With the help of explicit difference schemes and proposed two specific initial and boundary conditions are constructed approximate solutions of the complete system of Navier–Stokes equations, the thermodynamic, gas dynamics, speed and power characteristics of three-dimensional non-stationary flows of a compressible viscous heat-conducting gas in the convective flows arise.

Numerical experiments carried out according to a study in the current velocities arising convective flow of a compressible viscous heat-conducting gas from the heating temperature.

The main result of this work is that a numerical solution to the nonstationary case the complete system of Navier–Stokes equations with a well-posed initial and boundary conditions provides a known steady convective flow caused by the heating of the bottom part. This is the mechanism of formation of steady radial flow in the

bottom portion with an additional view of the Coriolis force, as proposed in [4] and investigated in more detail in [5], is the basis of the origin and functioning of the natural upward swirling flows.

Supported by the Ministry of Education and Science (Project № 2014/229).

References

1. Bautin S. P. The characteristic Cauchy problem and its application to gas dynamics. - Novosibirsk: Nauka, 2009. – 368 p.
2. Bautin S. P., Obukhov A. G. One exact stationary solution of the system of gas dynamics equations // Proceedings of the universities. Oil and gas. – 2013. – № 4. – P. 81–86.
3. Bautin S. P., Obukhov A. G. A form of the boundary conditions in the calculation of three-dimensional non-stationary flows of a compressible viscous heat-conducting gas // Proceedings of the universities. Oil and gas. – 2013. – № 5. – S. 55–63.
4. Bautin S. P. Tornado and the Coriolis force. – Novosibirsk: Nauka, 2008. – 96 p.
5. Bautin S. P., Krutova I. Y., Obukhov A. G., Bautin K. V. Destructive atmospheric vortices: theorem calculations, experiments – Novosibirsk: Science; Ekaterinburg: Izd USURT, 2013. – 215 p.

6-65

ПОЛУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ

О. Д. Ступина

Уральский государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург, Россия

E-mail: anidgelo@mail.ru

В работах [1, 2] предложена методика построения одномерных решений полной системы уравнений Навье–Стокса с помощью бесконечных тригонометрических рядов. Эти решения моделируют соответствующие течения сжимаемого вязкого теплопроводного газа. В данной работе с помощью предложенной методики строятся двумерные нестационарные решения этой нелинейной системы уравнений с частными производными.

Рассматривается следующая газодинамическая задача. В начальный момент времени газ находится в состоянии однородного покоя. В связи с соответствующим внешним воздействием начинается движение газа, которое при $t \rightarrow +\infty$ переводит газ в состояние неоднородного покоя с линейным распределением температуры от x, y .

Для моделирования этого течения используются бесконечные тригонометрические ряды с гармониками, зависящими от x, y . Коэффициенты перед гармониками являются искомыми функциями от времени. Для этих коэффициентов с помощью операции прое-

цирования получена бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений. С помощью специальных тождественных преобразований в системе делается переход от двойных сумм к одинарным. Для построения решения численным методом в тригонометрических рядах оставляется конечное число слагаемых и получается конечная система обыкновенных дифференциальных уравнений. Приведены результаты конкретных расчетов.

Литература

1. Баутин С. П., Замыслов В. Е. Представление приближенных решений полной системы уравнений Навье–Стокса в одномерном случае // Вычислительные технологии. 2012. Том 17, № 3. С. 3–12.
2. Баутин С. П., Замыслов В. Е., Скачков П. П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. – Новосибирск: Наука, 2014. – 90 с.

GETTING A SYSTEM OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS NECESSARY FOR THE SOLUTION OF AN INITIAL-BOUNDARY VALUE PROBLEM WITH THE HELP OF TRIGONOMETRIC SERIES

O. D. Stupina

The Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg,
Russia

E-mail: anidgelo@mail.ru

In works [1, 2] the technique of creation of one-dimensional decisions of full system of the equations of Navier–Stokes by means of infinite trigonometrical series is offered. These decisions model the respective currents of the compressed viscous heat-conducting gas. In this work with the help of the offered technique two-dimensional non-stationary decisions of this nonlinear system of the equations with private derivatives are under construction.

The following gasdynamic task is considered. In an initial timepoint gas is in a condition of uniform rest. Due to the corresponding external influence gas flow which at $t \rightarrow +\infty$ transfers gas to a condition of non-uniform rest with linear distribution of temperature from x, y begins.

For modeling of this current infinite trigonometrical series with the harmonicas depending from x, y are used. Coefficients before harmonicas are required functions from time. For these coefficients by means of operation of projection the infinite system of the ordinary differential equations is received. By means of special identical transformations in system transition from the double sums to unary becomes. For creation of the decision in trigonometrical ranks the final number of the composed t is left a numerical method the final system of the ordinary differential equations turns out. Results of concrete calculations are given.

References

1. Bautin S. P., V. E. Plans. Submission of approximate decisions of full system of the equations of Navier-Stokes in a one-dimensional case // Computing technologies. 2012. Volume 17, No. 3. Page 3–12.
2. Bautin S. P., V. E. Plans, Jumps of Items. Mathematical modeling by trigonometrical ranks of one-dimensional currents I stuck whom heat-conducting gas. – Novosibirsk: Science, 2014. – 90 pages.

6-66

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЛЕНИЙ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ

К. А. Талала¹, К. В. Хищенко², А. П. Яловец³

1АО «Государственный ракетный центр имени академика
В. П. Макеева», Миасс, Россия

2Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

3Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: ktalala@yandex.ru

Композиты представляют широкий класс гетерогенных материалов. Использование различных типов наполнителей (полые микросферы, сферические частицы, волокна и нити) и различных типов связующих позволяет получать материалы с требуемыми механическими и теплофизическими характеристиками. Особый интерес представляют полимерные композиты конструкционного назначения, обеспечивающие высокую прочность конструкций и низкую плотность материала по сравнению с металлическими изделиями.

Поведение полимерных композитов при механических нагрузках определяется множеством факторов: механическими характеристиками полимера, которые сильно меняются с температурой, реологией полимера, типом, размером и объемной долей включений.

Разработана и реализована модель твердотельного композита на основе полимерного связующего, учитывающая теплопроводность, теплообмен и трение между сферическими включениями и связующим. Система уравнений включает в себя реологическое уравнение полимера, вязкоупругие свойства полимера, температурную зависимость упругих характеристик.

При рассмотрении течения все компоненты среды считаются равноправными и движутся в самосоглазованном поле напряжений, создаваемом всеми компонентами. Время релаксации отдельной компоненты к состоянию локального термодинамического равновесия каждой компоненты полагаем много меньше времени релаксации к равновесию смеси [1].

Проведены расчеты скорости звука и поля напряжения в композите на основе эпоксидной смолы для различных объемных долей и размеров сферических включений в эпоксидной смоле. Показано, что релаксация играет важную роль при больших размерах включений.

Литература

1. Н. Б. Волков, В. В. Погорелко, А. П. Яловец. Метод теоретического описания динамических процессов в гетерогенных средах // ЖТФ, 2013, том 83, вып. 7, с. 20–29.

SIMULATION OF DYNAMIC EFFECTS | IN POLYMER COMPOSITES

К. А. Talala¹, К. V. Khischenko², A. P. Yalovets³

¹Joint Stock Company «Academician V. P. Makeyev State
Rocket Centre», Miass, Russia

²Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

³South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: ktalala@yandex.ru

Composites are a wide class of heterogeneous materials. The use of different fillers (hollow microspheres, spherical particles, fibers and filaments) and different binders makes it possible to obtain materials with the required mechanical and thermophysical properties. The particular interest is structural polymer composites ensuring high structural strength and low material density in comparison with metal products.

The behavior of polymer composites under mechanical loads depends on a great number of factors: mechanical polymer properties varying a lot with temperature, polymer rheology, type, dimensions and volume fraction of inclusions.

The solid composite model was developed and created on the basis of a polymer binder with regard to thermal conductivity, heat transfer and friction between spherical inclusions and the binder. The system of equations includes a polymer rheological equation, polymer viscoelastic properties, temperature dependence of elastic responses.

When studying a flow all environment components are considered equal and move in a self-consistent stress field generated by all the components. The time of relaxation of a separate component to the state of local thermodynamic equilibrium of each component is believed to be much less than the time of relaxation to the mixture equilibrium [1].

The sound velocity and stress field were estimated in the epoxy-based composite for different volume fractions and dimensions of spherical inclusions in the epoxy. It was shown that relaxation was of great importance for large-sized inclusions.

References

1. N. B. Volkov, V. V. Pogorelko, A. P. Yalovets. The method of theoretical description of dynamical processes in heterogeneous media // Journal of technical physics, 2013, V. 83, Issue. 7, p. 20–29.
-

6-67

**МЕТОД РАСЩЕПЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ
МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ
С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ,
РЕШАЕМЫХ SPH-МЕТОДОМ**

Н. А. Скоркин, Е. З. Теляшова

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

E-mail: n.a.scorkin@gmail.com, leonsnz@mail.ru.

Решение осесимметричных задач механики сплошной среды естественно осуществлять в цилиндрических координатах. Использование цилиндрических координат в SPH-методе связано с трудностями, обусловленными отсутствием простых и надежных сглаживающих функций. По этой причине осесимметричные задачи решаются в трехмерной декартовой прямоугольной системе координат. Наличие в дифференциальных уравнениях в цилиндрических координатах выражения $1/r$, где r – радиальная координата, обуславливает особенность при r близких к нулю. Первая попытка использовать в цилиндрических координатах цилиндрическую сглаживающую функцию была осуществлена в работе [1]. При этом был привлечен сложный аппарат специальных функций, в результате были получены очень громоздкие выражения для сглаживающей функции. В работах [2, 3] были предложены всевозможные ухищрения в решении осесимметричных задач в цилиндрических координатах. Прорывом в решении данной проблемы стала работа [4], в которой для решения осесимметричных задач механики сжимаемой жидкости и газа SPH-методом предложена сглаживающая функция, выраженная эллиптическими интегралами. При этом дифференциальные уравнения механики сплошной среды рассматривались в декартовых координатах, т. е. без слагаемых, содержащих особенность $1/r$.

Для расчета осесимметричных задач в данной работе предложено к решению дифференциальных уравнений применять метод расщепления уравнений по физическим процессам [5] и использовать сглаживающую функцию, применяемую в декартовых координатах. Предлагаемая SPH-процедура реализована в двумерном вычислительном коде TWS&SPH. Верификация SPH-процедуры проведена путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными [6, 7].

Литература

1. Petschek A. G, Libersky L. D. Cylindrical smoothed particle hydrodynamics/ J. Comput. Phys., 1993, 109, p. 76–83.
2. Brookshaw L. Smooth particle hydrodynamics in cylindrical coordinates. Anziam J., 2003: 44: p. 114–139
3. Lee M. Characterization of ballistic limit curve for metallic Whipple shield. EPJ Web of Conferences 26,04039 (2012)

4. Omang M., Borve S., Trulsen J. SPH in spherical and cylindrical coordinates // J. of Comput. Phys. 2006, Vol 213, Issue 1, P. 391–412
5. Ковеня В. М., Яненко Н. Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. М.: Наука Сибирское отделение, 1981, 326 с.
6. Frew D. J., Forrestal M. J., Cargibe J. D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. Int. J. Impact Eng., 32 (2006); 1584–1594
7. Thigpen L. Penetration of projectile into continuous earth media. Research Report SC-RR-72-0204, May 1972, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

**SPLITTING METHOD IN PROBLEMS
OF THE CONTINUUM MECHANICS
WITH THE AXIAL SYMMETRY,
SOLVED BY A SPH-METHOD**

N. A. Scorkin, E. Z. Telyashova

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

E-mail: n.a.scorkin@gmail.com, leonsnz@mail.ru

The solution axial-symmetric problems of the continuum mechanics is searching in cylindrical coordinates. Use of cylindrical coordinates in SPH-method is difficult by reason of absence of simple and reliable smoothing functions. By this reason axial-symmetric problems are solving in three-dimensional Cartesian coordinate system. The presence of form $1/r$ (r – the radial co-ordinate) in the differential equations in cylindrical coordinates causes feature at r close to zero. The first attempt to use in cylindrical coordinates cylindrical smoothing function has been realized in work [1], where were attracted difficult special functions. As a result have been received very bulky expressions for smoothing function. In works [2, 3] different shifts in the solution axial-symmetric problems in cylindrical coordinates have been offered. Work [4] became a breakthrough in solving of the given problem. For the solution axial-symmetric problems of mechanics of compressible fluid and gas in the SPH-method offered the smoothing function expressed in elliptic integrals. Thus the differential equations of continuum mechanics were considered in Cartesian coordinates without component containing feature $1/r$.

In actually work for calculation axial-symmetric problems were offered to solution of the differential equations apply a splitting method for the equations on physical processes [5] and to use the smoothing function in Cartesian coordinates. Offered SPH-procedure is realized in two-dimensional computing code TWS&SPH. SPH-procedure verification is spent by comparison of results of calculations with experimental data [6, 7].

References

1. Petschek A. G, Libersky L. D. Cylindrical smoothed particle hydrodynamics/ J. Comput. Phys., 1993, 109, p. 76–83.
2. Brookshaw L. Smooth particle hydrodynamics in cylindrical coordinates. Anziam J., 2003: 44: p. 114–139

3. Lee M. Characterization of ballistic limit curve for metallic Whipple shield. EPJ Web of Conferences 26,04039 (2012)
4. Omang M., Borge S., Trulsen J. SPH in spherical and cylindrical coordinates // J. of Comput. Phys. 2006, Vol 213, Issue 1, P. 391–412
5. Kovenja V. M., Janenko N. N. A splitting method in problems of gas dynamics. M: the Science the Siberian branch, 1981, 326 p.
6. Frew D. J., Forrestal M. J., Cargibe J. D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. Int. J. Impact Eng., 32 (2006); 1584–1594
7. Thigpen L. Penetration of projectile into continuous earth media. Research Report SC-RR-72-0204, May 1972, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

6-68

ОБ АППРОКСИМАЦИОННОЙ ВЯЗКОСТИ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ И РАСЧЕТЫ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

О. О. Топорова, Ю. В. Янилкин, А. Л. Стадник

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

При учете молекулярной (физической) вязкости в расчетах возникает проблема, связанная с аппроксимационной (схемной) вязкостью разностной схемы расчета уравнений Эйлера и Навье–Стокса, то есть невязкой и вязкой жидкости (газа). В разностных схемах первого порядка аппроксимации ее величина может заметно влиять на получаемое численное решение. Влияние нефизической схемной вязкости на получаемое разностное решение во многом аналогично влиянию физической вязкости. Поэтому принципиально важно знать коэффициенты той и другой вязкости, при этом моделировать задачи с учетом физической вязкости имеет смысл только в случае малости схемной вязкости по сравнению с физической.

В докладе вопросы, связанные с указанной проблемой, рассматриваются на примере 3D методики кода ЭГАК [1]. Показано, что коэффициент схемной вязкости методики при аппроксимации невязких членов уравнений в случае квазистационарных течений прямо пропорционален размеру ячейки. В случае нестационарных течений, в частности, в ударноволновых течениях, величина схемной вязкости определяется дополнительными членами, связанными с аппроксимацией по времени. Отсюда следует, что в конкретной задаче всегда можно построить такую сетку, для которой схемная вязкость будет сравнима или даже превалировать над физической вязкостью, и в этом случае для этой задачи не имеет особого смысла использовать такие сетки.

В докладе представлены исходные уравнения и разностная схема для моделирования вязких и невязких газодинамических течений многокомпонентной сре-

ды в эйлеровых переменных. Приведена теоретическая оценка аппроксимационной вязкости на основе рассмотрения первого дифференциального приближения [2] разностной схемы. Представлены результаты расчетов, которые показали корректность использования теоретической оценки схемной вязкости в расчетах конкретных задач.

Литература

1. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Бондаренко Ю. А. и др. Эйлеровы численные методики ЭГАК и ТРЭК для моделирования многомерных течений многокомпонентной среды // Труды РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2008, вып. 12, с. 54–65.
2. Яненко Н. Н., Шокин Ю. И. О первом дифференциальном приближении разностных схем для гиперболических систем уравнений // Сиб. матем. журнал, 1969, т. 10, № 5.

ON THE APPROXIMATION VISCOSITY OF DIFFERENCE SCHEMES AND VISCOUS FLUID FLOW SIMULATIONS

O. O. Toporova, Yu. V. Yanilkin, A. L. Stadnik

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

When taking into account molecular (physical) viscosity in simulations, we encounter the problem associated with the approximation (scheme) viscosity of a difference scheme used for Euler and Navier–Stokes equations, i. e. non-viscous and viscous fluid (gas) equations. In difference schemes of the first-order approximation, its value may noticeably affect the resultant numerical solution. The non-physical (scheme) viscosity effect on the obtained difference solution is similar, to a large extent, to the physical viscosity effect. Therefore, it's important, in principle, to know coefficients of the both viscosities and the simulation of problems with account of physical viscosity seems reasonable, if only the scheme viscosity is small in comparison with the physical viscosity.

The given paper considers the problem above by the example of the 3D technique implemented in the EGAK code [1]. It is shown that the scheme viscosity coefficient in this technique is proportional to a cell size in approximating non-viscous terms of equations in case of quasi-stationary flows. If we deal with non-stationary flows (in particular, with shock-wave flows), the scheme viscosity value is determined by additional terms associated with approximation in time. Hence, for a particular problem it is always possible to build a grid, for which the scheme viscosity will be comparable with, or higher than the physical viscosity and in this case it's not reasonable to use such grids for this problem.

The paper presents the original equations and difference scheme for the simulation of viscous and non-viscous gas dynamic multicomponent flows in Eulerian variables. The theoretical estimate of the approximation viscosity on the basis of the first differential approximation [2] of a difference scheme is given. Results of

simulations are presented and they demonstrate correctness of using the theoretical estimate of scheme viscosity in simulations for particular problems.

Reference

1. Yanilkin Yu. V., Belyaev S. P., Bondarenko Yu. A., et al. Eulerian numerical techniques EGAK and TREK for the simulation of multidimensional multimaterial flows // *Writings by RFNC – VNIIEF*, 2008, Issue 12, p. 54–65.
2. Yanenko N. N., Shokin Yu. I. First differential approximation of difference schemes for hyperbolic equation systems. // *Sib. Math. Journal*, 1969, V. 10, N 5.

краевых задач для систем ОДУ или получать точные решения задач. Данные решения могут использоваться в качестве тестов при создании численных методик решения соответствующих задач на ЭВМ.

Литература

1. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. Об одном методе решения систем нелинейных уравнений в частных производных // *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2014. Т. 20. № 1. С. 238–246.
2. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. О решении некоторых уравнений нелинейной акустики // *Акустический журнал*, 2015. Т. 61, № 5, С. 576–582.

6-69

О ДВУХ ПОДХОДАХ К ЗАДАЧЕ ОБ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ ИДЕАЛЬНЫМ ГАЗОМ

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

Для системы уравнений Эйлера, описывающей установившиеся движения идеального политропного газа, рассматривается задача об обтекании тела в классе дважды непрерывно дифференцируемых функций. Используются подходы геометрического метода, развиваемого авторами [1, 2].

В рамках первого подхода изучается класс течений со специальным видом вектора скорости. Для этого класса система уравнений Эйлера сводится к системе трех дифференциальных уравнений с частными производными для трех неизвестных функций, при этом уравнение неразрывности выполняется тождественно. Показано, используя подходы геометрического метода, что даже в том случае, когда одна из этих функций, а именно функция, задающая поверхность тела, выбрана, соответствующая переопределенная система оказывается совместной и для ее решений выполняется краевое условие непротекания на обтекаемом теле. Для этого класса получено точное решение.

В рамках второго подхода разработанный ранее метод сведения системы уравнений в частных производных к системе нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений применяется для уравнений Эйлера и используется при решении одной задачи об обтекании тела. Для системы ОДУ получено точное решение задачи при заданной на обтекаемом теле плотности. Рассмотрены примеры, демонстрирующие особенности полученных точных решений. Показано, что эти решения позволяют выделять на гладкой обтекаемой поверхности особые точки, в которых наблюдается обострение.

Предложенные методы построения течений газа вблизи тел с аналитически заданной поверхностью позволяют сводить задачи, которые описываются нелинейными уравнениями Эйлера, к решениям

ON TWO APPROACHES TO THE PROBLEM OF IDEAL GAS FLOW AROUND BODIES

L. I. Rubina, O. N. Ulyanov

Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: rli@imm.uran.ru, secretary@imm.uran.ru

For stationary Euler equations describing stationary flows of ideal polytropic gas the problem of flow around bodies is examined in class twice continuously differentiable functions. Two approaches of geometrical method developed by authors are used [1, 2].

In one approach, class of flows with a special kind of velocity vector is studied. For this class Euler equations reduced to a system of three partial differential equations for the three unknown functions, and the continuity equation is satisfied identically. It is shown, using the geometric method approaches, that even in the case where one of these functions, namely the function defining the surface of the body, was selected, corresponding overdetermined system has solutions. Exact solution of problem for this class is written.

In second approach, previously developed method of reducing system of partial differential equations to a system of nonlinear ordinary differential equations is applied to the Euler equations and is used to solve a problem of the flow around the body. For ODEs the exact solution of the problem at a given density on the body surface is obtained. The examples that demonstrate the features of found exact solutions are considered. It has been shown that these solutions allow us to find singularities on smooth body surface, in which the blow-up is observed.

The proposed methods of construction of gas flows near bodies with analytically given surface allow us to reduce the problems which described by non-linear Euler equations to the solutions of boundary problems for ODEs or to find exact solutions. These solutions can be used as a test of numerical methods of solving problems using a computer.

References

1. Rubina L. I., Ulyanov O. N. One Method for Solving Systems of Nonlinear Partial Differential Equations // *Proc. Steklov. Inst. Mathematics*. 2015. Vol. 288, Suppl. 1. P. S180–S188.

2. Rubina L. I., Ul'yanov O. N. On Solving Certain Nonlinear Acoustics Problems // *Acoustical Physics*. 2015. Vol. 61, No. 5. P. 527–533.

6-70

**О РАЗВИТИИ АЛГОРИТМОВ
ПОСТРОЕНИЯ СЕТОК В КОНСТРУКЦИЯХ,
ОБРАЗОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯМИ
ВРАЩЕНИЯ**

А. И. Анучина¹, Н. А. Артемова²,
В. А. Гордейчук¹, О. В. Ушакова^{2,3}

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

²Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского
УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: a.i.anuchina@vniitf.ru, ana@imm.uran.ru,
gordeychuk.v.a@vniitf.ru, uov@imm.uran.ru

Представлено развитие алгоритмов построения сеток в конструкциях, образованных поверхностями вращения. Алгоритмы предназначены для численного моделирования процессов многокомпонентной гидродинамики [1] и разработаны в рамках подхода [2]. Алгоритмы осуществляют построение структурированных оптимальных сеток (невыврожденных, близких к равномерным и ортогональным) [2], состоящих из шестигранных ячеек [1]. Программы написаны на языке C++. Первая группа развиваемых алгоритмов предназначена для построения сеток в объемах вращения, деформированных другими объемами вращения. Все алгоритмы данной группы (алгоритмы деформации [3], оптимизации [4], коррекции сетки к поверхностям вращения [5, 6]) реализованы в нестационарном алгоритме построения сеток в деформированных объемах вращения. Объем вращения образуется вращением на 180° плоской кривой, состоящей из отрезков прямых, дуг окружностей и эллипсов. Деформированный объем вращения образуется деформацией объема вращения (основного тела) другим объемом вращения (вспомогательным телом). Алгоритм представляет собой итерационный процесс, состоящий на каждой итерации из двух этапов. На первом этапе (деформация) основное тело и сетка в нем деформируются вспомогательным телом. Шаг деформации выбирается так, чтобы деформированная сетка не содержала вырожденных ячеек [7–9]. Вторым этапом (оптимизация) представляет собой оптимизацию деформированной сетки вариационным методом построения оптимальных сеток [4]. На этом этапе применяется специальный алгоритм коррекции узлов сетки к соответствующей поверхности вращения. Итерационный процесс применяется до тех пор, пока деформация основного тела не достигнет необходимой степени. Начальные сетки в основных и вспомогательных те-

лах строятся методом [10]. Вторая группа алгоритмов строит сетки в конструкциях, образованных поверхностями вращения с параллельными осями вращения. Это также специализированные алгоритмы построения начальных сеток, оптимизации сеток, коррекции сеток к поверхностям вращения. Целью описываемых разработок было повышение автоматизации, эффективности и экономичности алгоритмов. Приводятся примеры расчета сеток в конструкциях и результаты их тестирования согласно критериям [4, 5, 7–9].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-01-04146), УрО РАН (проекты 15-7-1-13, 15-16-1-10).

Литература

1. 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.
2. 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.
3. О. В. Ушакова, Н. А. Артемова, Т. Н. Бронина, А. И. Анучина, В. И. Гордейчук. Построение сеток в деформированных объемах вращения // *Актуальные пробл. вычисл. и прикл. математики (АМСА-2015): Междунар. конф.* (19–23 окт. 2015, Академгородок, Новосибирск, Россия), посв. 90-летию со дня рожд. акад. Г. И. Марчука: тезисы. Новосибирск: Академиздат, 2015. С. 162–163.
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. Алгоритм коррекции сетки к области вращения. // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов*. 2016. Вып. 1. С. 16-27.
6. Ушакова О. В. Применение алгоритма коррекции сетки к области вращения // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов*. 2016. Вып. 2. С. 31–37.
7. Ушакова О. В. Классификация шестигранных ячеек // *Журнал выч. матем. физики*. Т. 48. 8. С. 1426–1428.
8. Прохорова М. Ф. Проблемы гомеоморфизма, возникающие в теории построения сеток // *Труды института математики и механики*. 2008. Т. 14. 1. С. 112–129.
9. Ushakova O. V. Nondegeneracy tests for hexahedral cells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 200 (2011) 1649–1658.
10. Бронина Т. Н. Алгоритмы построения начальных трехмерных структурированных сеток для областей вращения // *Труды института математики и механики*. 2008. Т. 14. 1. С. 3–10.

**ON THE DEVELOPMENT
OF GRID GENERATION ALGORITHMS
FOR CONSTRUCTIONS OBTAINED
BY THE SURFACES OF ROTATION**

A. I. Anuchina¹, N. A. Artemova²,
V. A. Gordeichuk¹, O. V. Ushakova^{2,3}

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

²Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics,
Yekaterinburg, Russia

³Ural Federal University named after the first President of
Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

E-mail: a.i.anuchina@vniitf.ru, ana@imm.uran.ru,
gordeychuk.v.a@vniitf.ru, uov@imm.uran.ru

The development of grid generation algorithms for constructions formed by the surfaces of rotation is presented. Algorithms have been designed for numerical modeling the processes of multicomponent hydrodynamics [1] and have been developed within the approach [2]. Algorithms generate structured optimal grids (nondegenerate, closed to uniform and orthogonal ones) [2], composed of hexahedral cells [1]. Computer codes are written in C++. The first group of algorithms is for generation of grids in the volumes of rotation deformed by the other volumes of rotation. All algorithms of this group (deformation [3], optimization [4] and correction to the surfaces of rotation [5, 6]) are realized in non-stationary grid generation algorithm for the deformed volume of rotation. The volume of rotation is formed by the rotation through 180° of the planar curve composed of straight line segments, arcs of circles and ellipses. The deformed volume of rotation is formed after the deformation of the volume of rotation (main body) by the other volume of rotation (additional body). The algorithm represents the non-stationary iterative process consisting on each iteration of two stages. At the first stage (deformation), the main body and the grid in it are deformed by the additional body. The step of deformation is chosen so that degenerate cells do not arise. The second stage is the optimization of a deformed grid by the variational method [4]. At this stage, the special algorithm of correction of nodes to the corresponding surface of rotation is applied. The iterative process is carried out up to necessary degree of deformation. Initial grids for main and additional bodies are constructed by method [10]. The second group of algorithms is for generating grids in the constructions formed by the surfaces of rotations with parallel axes of rotation. These algorithms are also the specialized algorithms for generating initial grids, grid optimization and correction of grids to the surfaces of rotations. The aim of described investigations is the increase of automation and effectiveness of algorithms. Examples of calculations of grids in constructions and their testing according to criteria [4, 5, 7–9] are given.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-01-04146), Ural Branch of RAS (projects 15-7-1-13, 15-16-1-10).

References

1. Anuchina N. N., Volkov V. I., Gordeychuk V. A., Es'kov N. S., Ilyutina O. S., and Kozyrev O. M. Numerical simulation of 3D multi-component vortex flows by MAH-3 code // *Advances in Grid Generation*. ed by Ushakova O. V. Novascience Publishers. 2007.
2. 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.
3. Anuchina A. I., Artemova N. A., Bronina T. N., Gordeychuk V. A., Ushakova O. V. Grid generation in deformed volumes of revolution // «Advanced Mathematics, Computations and Applications 2015» (AMCA-2015), dedicated to the 90th anniversary of the birthday of Academician Guri. I. Marchuk, Novosibirsk. P. 782–788.
4. Ushakova O. V. Optimization algorithms for three-dimensional grids in domains of rotations // *Proc. Steklov Inst. Math. Suppl.* 1. 2008. S228–S259.
5. Ushakova O. V. An algorithm of correcting a grid with respect to the surface of revolution. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki*, series Mathematical Modeling of Physical Processes, 1, 16–27.
6. Ushakova O. V. Application of correcting a grid with respect to the surface of revolution. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki*, series Mathematical Modeling of Physical Processes, 2, 31–37.
7. Ushakova O. V. Classification of hexahedral cells // *Comput. Math. Math. Phys.* 48 (8). 1327–1348.
8. Prohorova M. P. Problems of homeomorphism arising in the theory of grid generation // *Proc. Steklov Inst. Math. Suppl.* 1. 2008. S165–S182.
9. Ushakova O. V. Nondegeneracy tests for hexahedral cells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 200. 2011. 1649–1658.
10. Bronina T. N. Algorithm for constructing initial three-dimensional structured grids for the domains of revolution // *Proc. Steklov Inst. Math. Suppl.* 1. 2008. S36–S43.

6-71

**ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ
ДИНАМИКИ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ**

В. Е. Фёдоров, Н. В. Филин

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: kar@csu.ru, nikolay_filin@inbox.ru

Рассмотрена система уравнений

$$\rho_t + u\rho_x + \rho u_x = 0;$$

$$\sigma_t + v\sigma_x + \sigma v_x = 0;$$

$$u_t\rho + u_x u\rho + P_\rho\rho_x m + P_\sigma\sigma_x m + P_m m_x m + bm\sigma(u-v) = 0;$$

$$v_t\sigma + v_x v\sigma + Q_\rho\rho_x(1-m) + Q_\sigma\sigma_x(1-m) +$$

$$+ Q_m m_x(1-m) + (P-Q)m_x - bm\sigma(u-v) = 0;$$

$$m_t + vm_x = am(1-m)(P-Q),$$

описывающая течение двухфазной смеси с различными давлениями компонентов [1, 2]. Найдена алгебра Ли групп преобразований эквивалентности этой системы, базис которой состоит из операторов

$$Y_1 = \frac{\partial}{\partial t}, \quad Y_2 = \frac{\partial}{\partial x}, \quad Y_3 = t \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial u} + \frac{\partial}{\partial v}.$$

Оптимальные системы Θ_1, Θ_2 одномерных и двумерных подалгебр этой алгебры Ли состоят из подалгебр [3]

$$\{\langle Y_2 \rangle, \langle Y_3 \rangle, \langle Y_1 + cY_3 \rangle\}, \quad \{\langle Y_2 \rangle, \langle Y_3 \rangle, \langle Y_1 + cY_3 \rangle\},$$

Найдены инвариантные решения и подмодели системы уравнений. К примеру, для двумерной подалгебры $\langle Y_2, Y_3 \rangle$ найдено решение

$$\begin{aligned} \rho(t) &= \frac{C_1}{t+C_3}, \quad \sigma(t) = \frac{C_2}{t+C_3}, \\ u(t) &= \frac{x}{t+C_3} + \frac{b}{t+C_3} \int (t+C_3) C(t) m(t) dt + \\ &+ \frac{1}{t+C_3} + C_5 e^{-\int \left(1 + \frac{C_2 m}{C_1}\right) + \frac{1}{t+C_3} dt}, \\ v(t) &= \frac{x}{t+C_3} + \frac{b}{t+C_3} \times \\ &\times \int (t+C_3) C_5 e^{-\int \left(1 + \frac{C_2 m}{C_1}\right) + \frac{1}{t+C_3} dt} m(t) dt + \frac{1}{t+C_3}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m(t) &= \\ &= \frac{(a_1 C_2 + C_1)(2\Phi_1(t) - a C_4 \Psi_1(t) + 2a\Phi_2(t) + 2\Psi_2(t))}{(a_1 C_2 + C_1)(2\Phi_1(t) - a C_4 \Psi_1(t) - 2a\Phi_2(t) - 2\Psi_2(t))}, \end{aligned}$$

где использованы функции Куммера первого и второго рода φ и ψ

$$\begin{aligned} \Phi_1(t) &= \varphi\left(1 - \frac{1}{2}(a_1 C_2 + C_1)a, 1, -2(1-a_1 r)(t+C_3)\right), \\ \Psi_1(t) &= \psi\left(1 - \frac{1}{2}(a_1 C_2 + C_1)a, 1, -2(1-a_1 r)(t+C_3)\right), \\ \Phi_2(t) &= \varphi\left(-\frac{1}{2}(a_1 C_2 + C_1)a, 1, -2(1-a_1 r)(t+C_3)\right), \\ \Psi_2(t) &= \psi\left(-\frac{1}{2}(a_1 C_2 + C_1)a, 1, -2(1-a_1 r)(t+C_3)\right). \end{aligned}$$

Литература

1. Жилин А. А., Федоров А. В. Распространение ударных волн в двухфазной смеси с различными давлениями компонентов // Приклад. механика и техн. физика. 1999. Т. 40, № 1. С. 55–63.
2. Жилин А. А., Федоров А. В. Отражение ударной волны от жесткой стенки в смеси жидкого металла и твердых частиц // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 4. С. 97–107.
3. Панов А. В., Федоров В. Е. Инвариантные и частично инвариантные решения системы уравнений механики двухфазной среды // Вестник Челяб. гос. ун-та. № 38 (253). Физика. 2011. Вып. 11. С. 65–68.

EXACT SOLUTIONS FOR EQUATIONS SYSTEM OF TWO-PHASE MIXTURE DYNAMICS

N. V. Filin, V. E. Fedorov

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: kar@csu.ru, nikolay_filin@inbox.ru

The system of equations

$$\begin{aligned} \rho_t + u\rho_x + \rho u_x &= 0; \\ \sigma_t + v\sigma_x + \sigma v_x &= 0; \\ u_t \rho + u_x u \rho + P_\rho \rho_x m + P_\sigma \sigma_x m + P_m m_x m + bm\sigma(u-v) &= 0; \\ v_t \sigma + v_x v \sigma + Q_\rho \rho_x (1-m) + Q_\sigma \sigma_x (1-m) + \\ + Q_m m_x (1-m) + (P-Q)m_x - bm\sigma(u-v) &= 0; \\ m_t + vm_x &= am(1-m)(P-Q), \end{aligned}$$

describing two-phase mixture dynamics with two different pressures of the components is considered. Lie group of equivalence transformations is found for the system. Its basis consists of operators

$$Y_1 = \frac{\partial}{\partial t}, \quad Y_2 = \frac{\partial}{\partial x}, \quad Y_3 = t \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial u} + \frac{\partial}{\partial v}.$$

The optimal system Θ_1, Θ_2 of one-dimensional and two-dimensional subalgebras of the Lie algebra consists of subalgebras [1]

$$\{\langle Y_2 \rangle, \langle Y_3 \rangle, \langle Y_1 + cY_3 \rangle\}, \quad \{\langle Y_2, Y_3 \rangle, \langle Y_2, Y_1 + cY_3 \rangle\}.$$

Invariant and partially invariant solutions and submodels of the system are found. For example, for a two-dimensional subalgebra $\langle Y_2, Y_3 \rangle$ the solution

$$\begin{aligned} \rho(t) &= \frac{C_1}{t+C_3}, \quad \sigma(t) = \frac{C_2}{t+C_3}, \\ u(t) &= \frac{x}{t+C_3} + \frac{b}{t+C_3} \int (t+C_3) C(t) m(t) dt + \\ &+ \frac{1}{t+C_3} + C_5 e^{-\int \left(1 + \frac{C_2 m}{C_1}\right) + \frac{1}{t+C_3} dt}, \\ v(t) &= \frac{x}{t+C_3} + \frac{b}{t+C_3} \times \\ &\times \int (t+C_3) C_5 e^{-\int \left(1 + \frac{C_2 m}{C_1}\right) + \frac{1}{t+C_3} dt} m(t) dt + \frac{1}{t+C_3}, \\ m(t) &= \\ &= \frac{(a_1 C_2 + C_1)(2\Phi_1(t) - a C_4 \Psi_1(t) + 2a\Phi_2(t) + 2\Psi_2(t))}{(a_1 C_2 + C_1)(2\Phi_1(t) - a C_4 \Psi_1(t) - 2a\Phi_2(t) - 2\Psi_2(t))}, \end{aligned}$$

is calculated. Here the Kummer's function of the first and second kind φ and ψ are used:

$$\begin{aligned} \Phi_1(t) &= \varphi\left(1 - \frac{1}{2}(a_1 C_2 + C_1)a, 1, -2(1-a_1 r)(t+C_3)\right), \\ \Psi_1(t) &= \psi\left(1 - \frac{1}{2}(a_1 C_2 + C_1)a, 1, -2(1-a_1 r)(t+C_3)\right), \end{aligned}$$

$$\Phi_2(t) = \varphi\left(-\frac{1}{2}(a_1 C_2 + C_1) a, 1, -2(1 - a_1 r)(t + C_3)\right),$$

$$\Psi_2(t) = \psi\left(-\frac{1}{2}(a_1 C_2 + C_1) a, 1, -2(1 - a_1 r)(t + C_3)\right).$$

References

1. Zhilin A. A., Fedorov A. V. Propagation of shock waves in a two-phase mixture with different pressures of the components // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1999. Vol. 40, № 1. P. 46–53.
2. Zhilin A. A., Fedorov A. V. Reflection of a shock wave from a rigid wall in a mixture of a liquid metal and solid particles // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2000. Vol. 36, № 4. P. 506–515.
3. Panov A. V., Fedorov V. E. The invariant and partially invariant solutions of systems of equations of mechanics two-phase medium // Bulletin of Chelyabinsk State University № 38 (253). Physics. 2011. Vol. 11. P. 65–68.

6-72

КОД 3DLINE И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ФАЗОВОЙ ПЛАСТИНЫ

А. Ю. Круковский¹, А. А. Миронов²,
С. В. Попруженко², И. П. Цыгвинцев¹

¹ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН», Москва, Россия

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

E-mail: iliatsygvintsev@gmail.com

Трёхмерный комплекс программ 3DLINE [1], разработанный в ИПМ им. М. В. Келдыша, предназначен для моделирования динамики плазмы, образующейся под воздействием лазерного импульса умеренной интенсивности (10^9 – 10^{15} Вт/см²) на холодную мишень. В основу физико-математической модели положено приближение одножидкостной двухтемпературной плазмы. Для электронной компоненты используются широкодиапазонные уравнения состояния [2, 3], учитывающие влияние излучения на параметры вещества. Гибридная модель переноса лазерного излучения [4] позволяет проводить моделирование динамики мишени с холодного старта. Для численного решения уравнений модели используется классическая полностью консервативная конечноразностная схема с перестраиваемой сеткой. Распараллеливание с использованием библиотеки OpenMP позволяет эффективно применять код на современной вычислительной технике.

В работе представлено подробное описание физико-математической модели, численных методов и алгоритмов, на основе которых был разработан код 3DLINE. Вкратце рассматривается набор тестовых задач, на которых проводилась верификация.

Основное внимание уделено приложению кода к проблеме моделирования динамической фазовой плазменной пластины [5]. В расчетах воспроизводится экспериментально наблюдаемый эффект гомогенизации спеклованного лазерного импульса при прохождении его через нестационарную плазму. Обсуждаются перспективы практического приложения этого эффекта в перспективных мегаджоульных лазерных установках.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 14-11-00699).

Литература

1. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Новиков В. Г. Трёхмерное численное моделирование воздействия нецентрального лазерного импульса на сферическую оловянную мишень // Математическое моделирование. 2016. Т. 28, № 7. С. 81–95.
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. KIAM_DB: база атомных данных для расчетов спектральных свойств плазмы / И. Ю. Вичев [и др.]. – Москва: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. – 94 с. doi:10.20948/mono-2016-vicev.
4. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Гасилов В. А. и др. Сеточно-лучевая модель и методика расчета поглощения лазерного излучения // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 12. С. 96–108.
5. Voronich I. N., Garanin S. G., Derkach V. N. et al. Control of Laser Radiation Parameters: Spatiotemporal smoothing of a laser beam employing a dynamic plasma phase plate // Quantum Electronics. 2001. Vol. 31. P. 970–972.

3DLINE CODE AND ITS APPLICATIONS FOR DYNAMIC PLASMA PHASE PLATE SIMULATION

A. Yu. Krukovskiy¹, A. A. Mironov²,
S. V. Popruzhenko², I. P. Tsygvintsev¹

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

E-mail: iliatsygvintsev@gmail.com

Three-dimensional RHD code 3DLINE [1] was developed in KIAM for simulation of the laser plasma dynamics. Its range of applicability includes plasma generated under the influence of the moderate intensity laser pulse (10^9 – 10^{15} W/cm²) on a cold target. The physical and mathematical model is based on the one-fluid two-temperature hydrodynamics' approach. For electronic component of plasma we use wide-range equation of state [2, 3], which are taking into account the influence of radiation on the parameters of the substance. For laser transfer we use the hybrid model [4], which allows us to simulate the dynamics of the target from a cold start. For the numerical solution the classical completely conservative finite-difference scheme with adjustable grid is used.

Parallelization using OpenMP library allows to use code on modern computing systems.

The paper provides a detailed description of the physical and mathematical models, numerical methods and algorithms used in 3DLINE code. The set of test problems in which the verification was carried out is briefly considered.

We make focus on the application code for the dynamic plasma phase plate [5] simulation. Our calculations are reproducing the experimentally observed effect of laser pulse homogenization as it passes through a non-stationary plasma. We discuss the prospects of practical application of this effect in perspective megajoule laser facilities.

The work was supported by the RNF (project № 14-11-00699).

References

1. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Новиков В. Г. Трехмерное численное моделирование воздействия нецентрального лазерного импульса на сферическую оловянную мишень // Математическое моделирование. 2016. Т. 28, № 7. С. 81–95.
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. KIAM_DB: база атомных данных для расчетов спектральных свойств плазмы / И. Ю. Вичев [и др.]. – Москва: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. – 94 с. doi:10.20948/mono-2016-vichev.
4. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Гасилов В. А. и др. Сеточно-лучевая модель и методика расчета поглощения лазерного излучения // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 12. С. 96–108.
5. Voronich I. N., Garanin S. G., Derkach V. N. et al. Control of Laser Radiation Parameters: Spatiotemporal smoothing of a laser beam employing a dynamic plasma phase plate // Quantum Electronics. 2001. Vol. 31. P. 970–972.

6-73

НЕЯВНЫЕ КОНЕЧНО-ОБЪЕМНЫЕ МЕТОДЫ С TVD-РЕКОНСТРУКЦИЕЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В P_1 -ПРИБЛИЖЕНИИ

А. Д. Гаджиев, И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков

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

E-mail: i.s.chubareshko@mail.ru

P_1 -приближение играет важную роль в переносе излучения. Оно удешевляет расчет по сравнению с кинетической постановкой, сохраняет симметрию в сферически-симметричных задачах, а также может выступать как эффективный метод ускорения итера-

ций. Для разностных методов решения P_1 -уравнения требуется: консервативность, второй порядок аппроксимации и монотонность. Поскольку P_1 -уравнения представляют собой гиперболическую систему, то согласно теореме С. К. Годунова в классе линейных разностных схем невозможно совместить монотонность и второй порядок аппроксимации. Поэтому решение этой проблемы надо искать среди нелинейных схем. В данной работе создана монотонная схема с TVD-реконструкцией повышенного порядка аппроксимации для решения двумерного уравнения переноса в P_1 -приближении.

IMPLICIT FINITE-VOLUME TVD METHODS FOR SOLVING THE 2D HEAT TRANSFER EQUATION IN P_1 APPROXIMATION

A. D. Gadzhiev, I. S. Chubareshko, A. A. Shestakov

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

E-mail: i.s.chubareshko@mail.ru

The P_1 approximation plays an important role in solving radiative heat transfer. It makes the calculation cheaper compared to its kinetic treatment, preserves symmetry in spherically symmetric problems, and can effectively accelerate iterations. For solving P_1 equations by finite differences, the approximation is required to be conservative, second order and monotone. Since the P_1 equations are hyperbolic, it is impossible to meet the last two requirements within the class of linear difference schemes, as Godunov's theorem states. A non-linear scheme is then needed. The paper presents a monotone higher order TVD scheme for solving the 2D heat transfer equation in P_1 approximation.

6-74

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СМЕШАННЫХ ЯЧЕЕК И РАЗРУШЕНИЯ В МЕТОДИКЕ ГРАД

М. М. Шатов

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

Комплекс программ ГРАД [1, 2] предназначен для численного моделирования задач газодинамики с учетом процессов детонации, упругопластичности и разрушения в лагранжевой и лагранжево-эйлеровой постановке методом концентраций. При решении задач с использованием метода концентраций, контактные границы между веществами не выделяются, расчетные ячейки могут содержать больше одного вещества (смешанные ячейки).

Рассматривается задача об определении тензора напряжений в смешанной ячейке, исходя из тензора

скоростей деформации ячейки, уравнений состояния, моделей упругопластичности и разрушения веществ. Существует несколько способов решения этой задачи. В комплексе ГРАД используется следующий алгоритм: из некоторых условий замыкания, определяются тензоры скоростей деформации, а затем и тензоры напряжений веществ. Тензор напряжений в смешанной ячейке является некоторым осреднением полученных тензоров напряжений веществ.

Обсуждается новая модель смеси, обобщающая известные изотропные модели замыкания в смешанных ячейках (равенство напряжений, равенство приращений напряжений, равенство скоростей деформации), а также описывающая анизотропные модели замыкания (равенство напряжений в заданных направлениях), которые могут быть полезны для более точного описания свойств веществ в окрестности контактных границ.

Новая модель смеси нашла применение не только при описании смешанных ячеек, она была положена в основу новой модели разрушения ячейки, которая учитывает микро-(пористость) и макро-(трещиноватость) уровни повреждения веществ, а также отрыв контактных границ в смешанных ячейках.

Описание разрушения в лагранжево-эйлеровой постановке представляет собой не тривиальную задачу: с одной стороны разрушение дискретно и означает мгновенное изменение свойств вещества, а с другой – в некотором объеме может оказаться вещество, состоящее из разрушенной и неразрушенной частей, так как существует поток вещества между счетными ячейками. В связи с этим необходимо вводить некоторые предположения о взаимодействии разрушенной и неразрушенной частей одного и того вещества, а также дополнительный механизм, препятствующий численной диффузии состояния разрушения. В докладе обсуждается решение этой проблемы.

Литература

1. V. A. Suchkov, A. S. Shnitko. Technique and set of program GRAD for solution of nonstationary problems of continua mechanics. Third joint conference on computational mathematics. Los Alamos, NM, USA, January 23–27, 1995.
2. Брагин А. А., Сучков В. А., Шнитко А. С. Методика и комплекс программ ГРАД для решения нестационарных задач механики сплошной среды. Тезисы докладов. Конференция пяти лабораторий по вычислительной математике. Вена, 19–23 июня 2005 г.

IMPROVEMENTS IN THE MIXED CELL AND FAILURE SIMULATION ALGORITHM OF THE GRAD CODE

M. M. Shatov

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

The GRAD [1, 2] code solves hydrodynamic problems with account for detonation, elasticity, plasticity, and failure in Lagrangian and Lagrangian-Eulerian references

with the method of concentrations which does not reconstruct interfaces in mixed cells.

The paper considers the determination of stress tensor in a mixed cell from the strain rate tensor of the cell, the equation of state, and elastoplasticity and failure models. The problem can be solved in several ways. GRAD exploits the following algorithm: stress tensors are found from strain rate tensors found from a closure condition. The stress tensor of the mixed cell is an average of the resulted stress tensors for individual materials.

A new mixture model is discussed. It generalizes the known isotropic closure models (equality of stresses, stress increments, and strain rates) and describes the anisotropic closure models (equality of stresses in specified directions) which can be used for more accurate description of material properties near interfaces.

The new model has been used for not only the description of mixed cells, but also as a basis for a new cell failure model which treats material failure on micro(pores)- and macro(cracks)-levels with allowance for interface separation.

Failure description in the Lagrangian-Eulerian reference is not trivial. On the one hand, failure is discrete meaning that material properties change instantaneously, and on the other hand, failed and non-failed material can be present in a volume because of material flow between cells. That is why it is necessary to introduce certain assumptions for the interaction of failed and non-failed portions of one material, and an additional mechanism preventing numerical diffusion in the failure state. The paper proposes a solution to this problem.

References

1. V. A. Suchkov, A. S. Shnitko. Technique and set of program GRAD for solution of nonstationary problems of continua mechanics. Third joint conference on computational mathematics. Los Alamos, NM, USA, January 23–27, 1995.
2. A. A. Bragin, V. A. Suchkov, and A. S. Shnitko, GRAD technique and code for non-stationary continuum mechanics. Book of Abstracts, Five Laboratory Computing Conference, Vienna, June 19–23, 2005.

6-75

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В ЗОНЕ ОТРЫВА ПЕРЕД ЩИТКАМИ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ В КОРМОВОЙ ЧАСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Ю. В. Грахов¹, Ю. А. Мокин^{1,2},
В. И. Хлыбов^{1,2}, Р. К. Швалева^{1,2}

¹АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева», Миасс, Россия
²Отдел фундаментальных проблем аэрокосмических технологий Челябинского Научного Центра УрО РАН, Челябинск, Россия

E-mail: src@makeyev.ru

Необходимость осуществления торможения спускаемых летательных аппаратов (СЛА) в атмосфере для задействования систем спасения, а также обеспечения возможности спуска с орбиты с приземлением в заданной точке требуют, совершенствования их аэродинамических компоновок. Для решения этих задач СЛА должен быть оснащен органами управления, способными изменять по заданной программе траекторию его спуска.

В авиационно-космической технике широко применяются аэродинамические органы управления – щитки. Характер обтекания щитков в зависимости от их конструкции может быть безотрывным или с отрывом набегающего на них потока. Отрыв потока перед щитками характерен для щитков, расположенных перпендикулярно или под большим углом к набегающему потоку.

Для исследования дополнительных аэродинамических сил, возникающих при воздействии гиперзвукового внешнего потока на щитки, расположенные в кормовой части СЛА с использованием средств вычислительной аэродинамики на основе решения уравнений Навье–Стокса разработана методика создания математической модели и управления процессом решения, включающая построение расчетной сетки, соответствующей выбранной модели турбулентности, задание граничных условий, адаптацию расчетной сетки. Адаптация проводится с применением комплекса параметров течения: давления, числа Маха и скорости сдвиговых напряжений – для более точного выделения скачков, разрывов и зон отрыва.

На основе разработанной методики проведены параметрические расчеты аэродинамических характеристик ЛА с отрывными зонами перед щитками и представлены результаты оценки локальных параметров течения в зонах отрыва и на поверхности щитков. Проведены исследования картины течения перед щитками. Визуализация расчетного течения позволяет определить границы зоны отрыва, зону возвратного течения, положение внутренних скачков уплотнения.

Результаты численного моделирования подтвердили, в частности, справедливость утверждения (ЦНИИмаш) о том, что на лобовой поверхности элементов, расположенных на боковой поверхности скоростных ЛА вблизи кормы под большим углом к потоку возможна реализация повышенных величин давления, превышающих давление торможения в критической точке ЛА после прямого скачка уплотнения. В частности, получено, что при числах Маха ~20–25 среднее давление на лобовой поверхности щитка может превышать указанное давление торможения в 1,5–2,5 раза.

RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF FLOW PARAMETERS IN SEPARATION ZONE IN FRONT OF FLAPS IN BOTTOM OF FLIGHT VEHICLES

Yu. V. Grakhov¹, Yu. A. Mokin^{1,2},
V. I. Khlybov^{1,2}, R. K. Shvaleva^{1,2}

¹Joint Stock Company «Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre», Miass, Russia

²Department of Fundamental Problems of Aerospace Technologies of Chelyabinsk Scientific Centre of Ural Division of the Russian Academy of Sciences, Chelyabinsk, Russia

E-mail: src@makeyev.ru

The needed braking of Re-entry Vehicles (RVs) in the atmosphere to activate their Descent and Landing Systems and also to de-orbit them for landing in a given point asks for upgrading of their aerodynamic configurations. For the tasks an RV should have control organs capable to change its descent trajectory under a special program.

Aerodynamic control organs, e. g., flaps, are widely used in aerospace hardware. Depending upon their design, the behavior of free stream flow around the flaps can be without or with separation. The free stream is typically separated in front of flaps that are perpendicular or at a high angle to free stream.

A methodology for the creation of a math model and the control of solving was developed to study additional aerodynamic forces appeared when flaps in bottom of flight vehicles are exposed to supersonic flow using the CFD software based on the Navier-Stokes equations. The methodology includes the generation of a computational grid corresponding to a chosen turbulence model, the input of boundary conditions, the adaptation of the computational grid. The grid is adapted using a set of flow parameters - pressure, Mach number and shear stress velocity – to segregate more precisely shocks, discontinuities and separation zones.

Based on the developed methodology parametric analyses of RV aerodynamic characteristics with separated zones in front of flaps are made; and the estimated results of local flow parameters in separation zones and on the surface of flaps are presented. The flow pattern in front of flaps was investigated. The visualization of the estimated flow permits identifying boundaries of a separation zone, a zone of reverse flow, positions of internal shock waves.

In particular, the resulted numerical simulation confirmed the TsNIImash's statement that face surfaces of components located near bottom on side surface of high-speed FVs at a high angle to flow can be exposed to increased pressure higher than stagnation pressure in FV critical point after the direct shock wave. In particular, we found out that at Mach numbers ~20–25 the average pressure on a face surface of the flap can exceed the specified stagnation pressure by 1.5–2.5 times.

6-76

МЕТОД ВДЭПФ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ

А. А. Шестаков

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

E-mail: a.a.shestakov2012@yandex.ru

Использование неявных схем в математическом моделировании переноса теплового излучения заставляет уделять серьезное внимание проблеме сходимости итерационного процесса, используемого для решения системы уравнений переноса фотонов и энергии. В данной работе рассмотрено применение итерационного метода ВДЭПФ для решения нелинейной системы, состоящей из уравнения энергии и уравнения переноса фотонов в различных приближениях. Проводится теоретическое исследование скорости сходимости итераций.

THE CDE METHOD FOR SOLVING THE RADIATIVE TRANSFER EQUATION IN DIFFERENT APPROXIMATIONS

А. А. Shestakov

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

E-mail: a.a.shestakov2012@yandex.ru

The application of implicit schemes to the mathematical modeling of heat transfer requires thorough investigation into the convergence of iterations used to solve the energy and photon transport equations. The paper considers the use of a Corrected Diagonal Element (CDE) method for solving a non-linear system of energy and photon transport equations in different approximations.

6-77

О МОНОТОННОЙ АППРОКСИМАЦИИ СИСТЕМЫ P_1 -УРАВНЕНИЙ

А. А. Шестаков

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

E-mail: a.a.shestakov2012@yandex.ru

Для нестационарной задачи переноса излучения P_1 -приближение приводит к гиперболической системе уравнений, при решении которой приходится сталкиваться со значительными трудностями при

построении монотонной разностной схемы второго порядка аппроксимации. Сложность построения монотонных схем для P_1 -приближения объясняется тем, что метод сферических гармоник обладает волновым эффектом и может давать отрицательные решения в криволинейных и многомерных геометриях для любого P_n -разложения. В данной работе исследованы возможные варианты построения монотонных разностных аппроксимаций для системы P_1 -уравнений на примере двух схем.

A MONOTONE P_1 APPROXIMATION

А. А. Shestakov

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

E-mail: a.a.shestakov2012@yandex.ru

The use of the P_1 approximation for solving nonstationary radiative transfer gives hyperbolic equations for which it is very difficult to derive a monotone second-order difference scheme because the method of spherical harmonics has a wave effect and can produce negative solutions in curvilinear and multidimensional geometries for any P_n expansion. The paper investigates different options of constructing the monotone difference approximations for P_1 equations by the example of two schemes.

6-78

МЕТОДЫ И СХЕМЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ, СОЗДАНИЕ В РФЯЦ – ВНИИТФ

А. А. Шестаков

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

E-mail: a.a.shestakov2012@yandex.ru

Одной из наиболее трудных задач теории переноса является решение спектрального уравнения переноса теплового излучения, сложность которого определяется большой размерностью рассматриваемого пространства, необходимостью иметь для решения монотонную схему второго порядка аппроксимации и эффективный метод совместного решения уравнений переноса и энергии. В связи с этим, там, где это приемлемо, применяют различные приближения, сводящие задачу переноса излучения к более простой. К таким приближениям относятся многогрупповое приближение, метод сферических гармоник, диффузионное и квазидиффузионное приближения, приближение лучистой теплопроводности и другие. Пробле-

мой создания эффективных методик для численного решения уравнения переноса излучения в различных приближениях занимаются во многих вычислительных центрах как у нас так и за рубежом.

Настоящий доклад посвящен разработанным в РФЯЦ – ВНИИТФ численным методам решения уравнения переноса лучистой энергии в различных приближениях.

METHODS AND SCHEMES DEVELOPED AT RFNC – VNIITF FOR SOLVING THE RADIATIVE TRANSFER EQUATION IN DIFFERENT APPROXIMATIONS

A. A. Shestakov

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

E-mail: a.a.shestakov2012@yandex.ru

One of the most difficult problems in transport theory is the solution of the continuous-energy heat transfer equation because of its large space dimensionality and the necessity of having a monotone second-order approximating scheme and an effective method to solve jointly the transport and energy equations. That is why approximations which simplify radiative transfer are user where possible. They include the multi-group approximation, spherical harmonics, diffuse and quasidiffuse approximations, the radiative heat transfer approximation and others. The effective techniques for solving the radiation transport equation are under development at different computer centers both in out country and abroad. The paper is devoted to the numerical methods of solving the radiation head transfer equation in different approximations, developed at RFNC – VNIITF.

6-79

РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ РЕШЕНИЙ С ЧАСТИ ГРАНИЦЫ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

С. И. Кабанихин, М. А. Шишленин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: kabanikhin@sscc.ru, mshishlenin@ngs.ru

Рассматриваются задачи продолжения решений всех типов уравнений математической физики, приложения которых возникают в геофизике, томографии.

В качестве примеров рассмотрены задачи продолжения теплового поля в недоступную для наблюдений зону, продолжения электромагнитного поля (данные георадара), задачи продолжения тепловых полей.

Разработаны численные методы решения. Приведены результаты численных расчетов.

Задачи продолжения являются некорректными и формулируются в виде операторного уравнения $Aq = f$, для решения которого применяется метод минимизации целевого функционала и метод сингулярного разложения. Исследуются свойства оператора A и приводится алгоритм минимизации функционала $J(q) = \|Aq - f\|^2$ методом сопряженных градиентов. На серии численных экспериментов показано, что метод позволяет восстановить граничные условия на недоступной части границы, а также получить информацию о неоднородностях (количество, расположение примерные объемы), расположенных в области недоступности.

Изучены свойства сингулярных чисел оператора продолжения, что позволило регуляризовать задачу продолжения методом сингулярного разложения с учетом погрешности в данных.

Георадар «Лоза» использовался нами при проведении исследований в плотины ущелье Медео, древних захоронений на юго-западе Казахстана, аэродромов и дорог в Алматинской области.

Показано, что продолжение решения с доступной для измерений части границы в область позволяет идентифицировать и локализовать неоднородности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-01-00755, 16-29-15120, 17-51-540004), Министерства образования и науки Российской Федерации и Международного математического центра Новосибирского государственного университета.

REGULARIZATION OF THE SOLUTION CONTINUATION OF EQUATIONS FOR PDE FROM THE PART OF THE BOUNDARY

S. I. Kabanikhin, M. A. Shishlenin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Novosibirsk State University, Russia

E-mail: kabanikhin@sscc.ru, mshishlenin@ngs.ru

We consider the continuation of the solutions for all types of PDE of mathematical physics that arise in Geophysics, tomography.

We investigate the continuation of the thermal field from the part of the boundary, continuation of electromagnetic field (Ground Penetrating Radar data). We develop the numerical methods and present the results of numerical calculations.

Continuation problems are ill-posed and are formulated as an operator equation $Aq = f$, for which we apply the method of minimizing the objective functional and the method of singular value decomposition. We study the properties of the operator A and the algorithm of minimization of functional $J(q) = \|Aq - f\|^2$ by the gradient methods. In series of numerical experiments

shows that the method allows to recover the boundary conditions on the inaccessible part of the boundary, and to obtain information about inhomogeneities (the number, location, approximate volume), located in the region of inaccessibility.

We investigate the singular values of the operator, which allows to construct the regularization method based on truncated SVD taking into account the errors in the data.

GPR «Loza» was used in conducting research at the Medeo gorge, ancient tombs in the South-West of Kazakhstan, airfields and roads in Almaty region.

It is shown that the continuation of the solution with data given on the part of the boundary allows us to identify the heterogeneities.

The work is financial supported by RFBR (projects 16-01-00755, 16-29-15120, 17-51-540004), Ministry of education and science of the Russian Federation and the International mathematical center of Novosibirsk State University.

6-80

ЗАДАЧИ ТЕПЛОВОЙ ТОМОГРАФИИ

С. И. Кabanikhin, М. А. Шишленин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
 Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН,
 Новосибирск, Россия
 Новосибирский государственный университет,
 Новосибирск, Россия
 E-mail: kabanikhin@sscc.ru, mshishlenin@ngs.ru

Рассматриваются задачи тепловой диагностики, когда данные задаются на доступной для наблюдения части границы. В тепловых методах неразрушающего контроля в качестве пробной энергии используется тепловая энергия, распространяющаяся в объекте контроля. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от наличия внутренних или наружных дефектов. Под дефектом при этом понимается наличие скрытых раковин, полостей, трещин, инородных включений и т.д., всевозможных отклонений физических свойств объекта от нормы, наличия мест локального перегрева (охлаждения) и т. п.

Исследованы вопросы разрешимости обратных задач по определению тепловых характеристик среды.

Разработаны численные методы определения одного и двух параметров среды в зависимости от количества измеряемых данных.

На основе метода сингулярного разложения исследована некорректность различных постановок линеаризованных обратных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-01-00755, 16-29-15120, 17-51-540004), Министерства образования и науки Россий-

ской Федерации и Международного математического центра Новосибирского государственного университета.

THE INVERSE PROBLEMS OF HEAT TOMOGRAPHY

S. I. Kabanikhin, M. A. Shishlenin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
 Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, Novosibirsk, Russia
 Novosibirsk State University, Russia
 E-mail: kabanikhin@sscc.ru, mshishlenin@ngs.ru

We investigate the problem of thermal diagnostics when the data are given on the observable part of the boundary. In thermal methods of nondestructive testing as an energy are used thermal energy propagating in the test object. The temperature field which are measured on the surface of an object contains the information about the features of the process of heat transfer which depend on the properties of internal or external defects. Under defective in this case we refer to the presence of hidden cavities, cracks, inclusions, etc., all kinds of deviations of the physical properties of the object from the norm, the availability of local overheating (cooling), etc.

We investigate the solvability of the inverse problems on determination of thermal characteristics of the environment. Numerical methods for determining the parameters of the medium are developed and presented.

We investigate the ill-posedness of the various statements of the linearized inverse problems based on the method of singular value decomposition.

The work is financial supported by RFBR (projects 16-01-00755, 16-29-15120, 17-51-540004), Ministry of education and science of the Russian Federation and the International mathematical center of Novosibirsk State University.

6-81

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЩЕПЛЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ

Н. Я. Моисеев, В. М. Шмаков

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия
 E-mail: nyamoiseyev@vniitf.ru, v.m.shmakov@vniitf.ru

Рассмотрен подход к модификации метода расщепления [1] для решения нестационарного кинетического уравнения переноса частиц (нейтронов) без итераций по интегралу столкновений. Суть модификации состоит в том, что решения интегро-диффе-

ренциальных уравнений первого этапа и интегралы столкновений находятся аналитическими методами, а не разностными [2]. Метод решения естественным образом обобщается на решение задач в многомерных пространствах и позволяет осуществить счет в режиме массового параллелизма.

Литература

1. Марчук Г. И., Яненко Н. Н. Решение многомерного кинетического уравнения методом расщепления // ДАН. 1964. Т. 157. № 6. С. 1291–1292.
2. Моисеев Н. Я., Шмаков В. М. Модифицированный метод расщепления для решения нестационарного кинетического уравнения переноса частиц // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2016. Т. 56. № 8. С. 110–120.

MODIFIED SPLITTING METHOD TO SOLVE THE UNSTEADY-STATE KINETIC EQUATION OF PARTICLE TRANSFER

N. Ya. Moiseev, V. M. Shmakov

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

Consideration is given to the approach how the splitting method can be modified [1] in order to solve the unsteady-state kinetic equation of particles (neutrons) transfer without the collision integral iterations. The main point of this modification is that analytical rather than finite difference methods are used to find solutions of the integro-differential equations at the first stage, as well as collision integrals. [2]. The solution method is directly extended to solve problems in multidimensional spaces and just allows computations in the massive parallelism mode.

References

1. G. I. Marchuk, N. N. Yanenko, Solution of the multidimensional kinetic equation by the splitting method // DAN (Proceeding of the Academy of Sciences. 1964. v.157, #6, pp.1291–1292.
2. N. Ya. Moiseev, V. M. Shmakov, Modified splitting method to solve the unsteady-state kinetic equation of particle transfer // J. “Computational mathematics and mathematical physics”, 2016. v. 56, #8, pp. 110–120.

6-82

АНИЗОТРОПНАЯ МОДЕЛЬ ЗАМКАНИЯ В СМЕШАННЫХ ЯЧЕЙКАХ

Ю. В. Янилкин, О. О. Топорова, В. Ю. Колобянин

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

Смешанные (многокомпонентные) ячейки, появляющиеся при разработке лагранжево-эйлеровых (ALE)

или эйлеровых численных методов решения уравнений газодинамики и упругопластики для многокомпонентных сред, содержат в себе контактные границы между различными веществами или же смесь веществ. Корректная аппроксимация уравнений в таких ячейках представляет собой проблему, от решения которой зависит точность и эффективность ALE кода.

Многие из этих методов при аппроксимации используют расщепление уравнений на два этапа, один из которых представляет собой решение уравнений в лагранжевых переменных. Смешанные ячейки могут содержаться даже в чисто лагранжевых методиках и проблемы, связанные с их наличием, должны решаться и в этом случае. От точности решения уравнений на лагранжевом этапе в значительной степени зависит общая точность ALE методов, это тем более справедливо в случае смешанных ячеек. Поэтому проблема аппроксимации уравнений в смешанных ячейках имеет важное практическое значение.

При использовании смешанных ячеек система уравнений газодинамики и упругопластики не замкнута, что вызывает необходимость введения дополнительных замыкающих соотношений, которые позволяют определить термодинамические параметры компонентов по имеющимся данным для смеси в целом. В работе будет приведен обзор методов замыкания, основанных на моделях, полученных при следующих предположениях относительно термодинамического состояния компонентов смеси:

1. метод Типтона,
2. метод IA-SSD,
3. равенство дивергенций скорости компонентов,
4. равенство давлений компонентов,
5. равенство приращений давлений компонентов,
6. равенство массовых скоростей компонентов после прохождения слабой волны,
7. метод, основанный на распаде разрыва в акустическом приближении.

Большинство этих моделей реализованы в 2D методике ЭГАК, в работе будут описаны конечно-разностные схемы методики на лагранжевом этапе. Подробно будут описаны методы расчета смешанных ячеек, достаточном для реализации этих методов в любом ALE коде.

В работе будут представлены новые анизотропные методы, основанные на разных моделях замыкания в зависимости от направления волны относительно контактной границы.

Будут приведены результаты верификации методов замыкания на нескольких тестовых задачах с аналитическими решениями: 1D задача Сода, 1D задача о прохождении ударной волны через границу вода-воздух, 2D задача о прохождении упругой волны по пластине, окруженной воздухом или вакуумом. Расчеты показали, что новые методы замыкания имеют такую же точность моделирования в 1D задачах, и значительно большую точность при моделировании 2D задачи. Это позволяет рекомендовать их для практического применения в существующих методиках для расчета смешанных ячеек.

ANISOTROPIC CLOSURE MODEL IN MIXED CELLS

Yu. V. Yanilkin, V. Yu. Kolobyenin, O. O. Toporova

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

E-mail: n.yanilkina@mail.ru

Mixed cells (multicomponent cells) emerging in the development of Lagrangian-Eulerian (ALE) or Eulerian numerical techniques for solving the gas dynamics and elasto-plasticity equations in multicomponent media contain either interfaces between materials or a mixture of materials. There is a problem of correct approximation of the equations in such cells and the ALE code accuracy and performance depend on how the problem is resolved.

Many approximation methods use the equation splitting into two stages, one of which consists in solving a given equation in Lagrangian variables. Mixed cells are possible even in the purely Lagrangian techniques and, therefore, the problems caused by their presence should be also resolved in such a case. The accuracy of ALE methods significantly depends on the accuracy of solutions found to the equations in the Lagrangian stage, this statement is all the more valid for mixed cells. Hence, the equation approximation problem in mixed cells is of great practical value.

If mixed cells are used, the system of equations describing the gas dynamics and elasto-plasticity is unclosed and there is a need in introducing additional closure models that will allow determining the thermodynamic parameters of components using the available data for the mixture of components, as a whole. The paper reviews the equation closure methods based on the models obtained with the following assumptions concerning the thermodynamic state of components in mixture:

1. the Tipton model,
2. equality of the component velocity divergencies,
3. equality of the component pressures,
4. equality of the component pressure increments,
5. equality of the component mass velocities upon a weak shockwave passage,
6. the method based on the Riemann problem in acoustic approximation,
7. the anisotropic method based on different closure models depending on the elastic wave direction relative to an interface.

The majority of these models have been implemented in the 2D EGAK code. The paper will describe the finite-difference schemes implemented in the Lagrangian stage of the code. There will be given a detailed description of the method used for the mixed cell calculation, which is sufficient for the implementation of these closure methods in any ALE code.

The paper presents new anisotropic methods based on different closure models depending on the wave direction relative to the interface.

The paper documents results of the closure methods verification using several test problems having analyti-

cal solutions: 1D Sod problem, 1D water-air shock tube problem, 1D mixed-material shock transition problem, and 2D problem of an elastic wave moving across a plate surrounded by air, or vacuum. The new closure methods are shown to provide the same accuracy in the 1D test simulations and significantly higher accuracy in the 2D simulation. This allows us to recommend these methods for practical implementation in existing mixed-cell codes.

6-83

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О ПРОХОЖДЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ СМЕСЬ ДВУХ ГАЗОВ

Ю. В. Янилкин, Л. Г. Королева

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

При численном моделировании часто возникает проблема моделирования сред, составляющих смесь разных веществ. Примерами таких сред являются грунт, композиты и др. Одним из основных подходов к моделированию таких сред являются методы, основанные на осредненном описании их термодинамических параметров. При этом эти осредненные модели среды зачастую трудно обосновать теоретически, особенно для ударноволновых течений. Один из подходов основан на прямом численном моделировании задачи.

Ранее в работе [1] была предложена задача о прохождении ударной волны через гетерогенную смесь двух газов с сильно различающимися сжимаемостями. Для задачи в работе [2] для скорости распространения волны было получено аналитическое решение. В работе [3] было проведено в 1D приближении прямое численное моделирование задачи в представленной смеси в виде перемежающихся слоев одинаковой толщины, которые показали, что расчетная скорость распространения ударной волны отличается от теоретического решения на ~2,5%.

В данной работе рассматривается задача о прохождении ударной волны через гетерогенную смесь двух газов с большим отношением сжимаемостей. Проведено численное исследование задачи не только в предположении слоистой структуры, но и других более реальных структур. Моделирование проводилось как в одномерном (для сравнения с данными другой работы), так и в двумерном и трёхмерном приближениях (в зависимости от взятых для моделирования структур) по коду ЭГAK в эйлеровых переменных на неподвижной сетке. В одномерном приближении были проведены сравнительные расчеты и в лагранжевых переменных. Результаты расчетов сравнивались с аналитическим решением, полученным при использовании предположений о равенстве давлений компонентов смеси и их однократном нагружении на фронте основной ударной волны. Расчеты показали,

что скорости ударной волны в трехмерных расчетах наиболее близки к аналитическому значению. Таким образом, трехмерные расчеты являются наиболее приближенными к реальной задаче с гетерогенной смесью двух идеальных газов.

Литература

1. Бондаренко Ю. А., Янилкин Ю. В. Расчет термодинамических параметров смешанных ячеек в газовой динамике // ВАНТ, сер. ММФП, вып. 4, с. 12–25, 2000.
2. Гончаров Е. А., Янилкин Ю. В. Новый метод расчета термодинамического состояния веществ в смешанных ячейках // ВАНТ, сер. ММФП, в. 3, с. 1–30, 2004.
3. Бондаренко Ю. А., Софронов В. Н. Прямое одномерное газодинамическое моделирование распространения волн в периодических двухслойных средах и волновое уравнение с дисперсией. Труды XV международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», Саров, 2015, с. 137–147.

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF A SHOCK WAVE PASSING TROUGH THE MIXTURE OF TWO GASES

Yu. V. Yanilkin, L. G. Koroleva

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

When doing numerical simulation there is often a problem to do it for a matter composed of a mixture of different materials. The examples of such matter are the soil, some composites etc. Some basic simulation methods for such matters are based on the averaged description of their thermodynamic parameters. And these averaged models of the matter are often difficult for theoretical substantiation, especially for the shockwave flows. One of the approaches is based on the direct numerical simulation of the problem.

In [1] earlier there was suggested a problem on a shock wave passing through a heterogeneous mixture of two gases strongly different in their compressibility. An analytical solution for the velocity of the shock wave propagation for the problem was produced in [2]. A direct numerical simulation of the problem in 1D approximation was carried out in [3], when the mixture was represented as alternating layers of the same thickness. It was shown that the calculated velocity of the shock wave propagation differs from the theoretical solution by ~2.5%.

This work describes numerical simulation of the problem not only basing on the presumption of the layered structure, but on the presumption of other more real structures. There was 1D simulation performed (to compare the results with the others published), and also simulations in 2D and 3D approximations (depending on the structures taken for the simulation) using EGAK code in Eulerian variables on a fixed mesh. In 1D approximation comparative computations in Lagrangian variables were also carried out. The computational results were compared to the analytical solution obtained when using the

presumption on the pressure equality of the components in the mixture and their one-time loading at the front of the main shock wave. The computations have shown that the velocities of the shock wave in 3D computations are closer to the analytical value. So, 3D computations are the closest to the real problem with the heterogeneous mixture of two ideal gases.

References

1. Bondarenko Yu. A., Yanilkin Yu. V. A Calculation of Thermodynamic Parameters for Mixed Cells in Gas Dynamics // VANT, ser. MMFP, issue 4, pp. 12–25, 2000. (in Russian)
2. Goncharov E. A., Yanilkin Yu. V. The New Computational Method for Thermodynamic State of Materials in Mixed Cells // VANT, ser. MMFP, Issue 3, pp. 16–30, 2004. (in Russian)
3. Bondarenko Yu. A., Sofronov V. N. Direct 1D Gas Dynamic Simulation of Wave Propagation in Periodic Two-Layer Matters and A Wave Equation with Dispersion. Proceedings of the XV International Conference «Supercomputing and Mathematical Simulation», Sarov, 2015, pp. 137–147. (in Russian)

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абдубакова Л. В. 287
Абдуллина Д. Н. 157
Авдеева А. В. 158
Авдонин В. В. 229
Аганин А. А. 43
Агафонцев М. В. 37
Агранат М. Б. 152
Адагуров А. Ю. 48
Адуев Б. П. 88
Алмазова К. И. 179
Алхимова М. А. 144
Амелин И. И. 15, 25
Ананьев С. Ю. 186, 234
Андреев А. А. 109
Андреев А. М. 56
Андреев В. Г. 152
Андреев Д. А. 152
Андрианов В. П. 102
Аникин Н. Б. 16, 159
Анисичкин В. Ф. 160
Антипова Т. В. 104, 105
Анучина А. И. 351
Анчаров А. И. 212, 220
Апороски А. В. 110, 288
Аракчеев А. С. 142, 160
Аристова А. Ю. 50
Артемова Н. А. 351
Астафьев В. В. 166
Астрелин В. Т. 142
Атлуханов М. Г. 142
Атрошенко С. А. 165, 217
Аульченко В. М. 160
Афанасьева С. А. 161
Ахлюстин И. А. 64, 92
Ахметов А. Р. 142

Б

Брук Саял М. 19
Бадьин Д. А. 111
Бадюков Д. Д. 58, 162
Байвэнь Ли 112
Бакаев В. П. 239, 254
Бакуркина Е. С. 38, 133
Баландина А. Н. 222
Бандуркин К. В. 189
Банникова И. А. 162, 164
Баранникова Д. Д. 289
Баранов В. К. 36, 163, 182
Барахвостов С. В. 114
Баренбаум А. А. 17
Бармина Е. В. 268
Баталова И. А. 104
Батуев С. П. 46, 291
Батьков Ю. В. 222

Баутин С. П. 18, 44, 302, 305
Баяндин Ю. В. 164
Бедарев И. А. 65, 66, 103
Безгодов Е. В. 239, 254, 273
Беленовский Ю. А. 64, 92
Белков С. А. 119
Белов И. А. 173
Белов Н. Н. 161
Белов О. В. 168
Белокуров Г. М. 88
Белоногова Е. А. 266
Белоногов А. Н. 179
Белоногов М. Н. 240
Бельков С. А. 163, 173
Беляев К. П. 319
Берегов Р. Ю. 291
Березовская М. Е. 132, 135
Берендеев Е. А. 304
Бивард Б. 241
Бинь Хэ 113
Блинников С. И. 111
Богомолов В. И. 126
Богомолов Г. Н. 88
Бодров А. С. 307
Бойко М. М. 180
Бокуняева А. О. 67, 292
Боровков В. В. 179
Бородин И. Н. 165, 200
Борщевский М. А. 117
Ботько Е. Н. 243
Бочкарева А. А. 244, 261
Брагин В. А. 95
Брагунец В. А. 222
Брантов А. В. 115, 116, 132
Брезгина Л. П. 293
Бричиков С. А. 32
Бродова И. Г. 166, 210, 211
Бугаенко И. Л. 16, 53
Бузюркин А. Е. 167
Буйко А. М. 22
Булатов М. У. 145
Бурдаков А. В. 142, 160
Бурдонов К. Ф. 144
Бурдонский И. Н. 57
Буркин В. В. 161
Бутусов Е. И. 224
Быченков В. Ю. 115, 116, 132

В

Важенин А. В. 262
Вазиев Э. М. 331, 333
Валеева О. В. 277
Валекжанин Р. В. 168
Валиев Х. Ф. 31
Ван Жуйли 285, 286
Ван Сян 55

Ванькевич В. А. 138, 139
 Васильев А. А. 160
 Васильев А. П. 10
 Васильев М. Е. 34
 Вей Као 63
 Вербицкая О. В. 266
 Вергелес С. С. 136
 Веретенников Л. М. 67
 Вихляев Д. А. 141, 149
 Вихорнова Т. Л. 169
 Власов А. Н. 51
 Власова С. С. 294
 Власов В. В. 295, 314
 Власов К. О. 296, 297, 298
 Влох Г. В. 280, 281
 Волкова Е. Г. 207
 Волкова К. А. 115
 Волков И. А. 244
 Волков Л. П. 246
 Волков Н. Б. 114, 170, 171
 Волков Р. Е. 18, 287
 Воробьев А. В. 68
 Воробьева М. А. 69
 Воронин А. Ю. 173
 Воронин Д. С. 172, 196
 Воронин М. С. 204
 Воронич И. Н. 119, 173
 Воропинов А. А. 331
 Вшивкова Л. В. 298
 Вшивков В. А. 304
 Вшивков К. В. 298
 Вэйпэн Яо 112
 Вячеславов Л. Н. 142, 160

Г

Гаан К. В. 54, 157, 225
 Габдулхаев В. Ф. 299, 305
 Гаврилов Д. С. 141, 149
 Гаврилов П. М. 20
 Гаджиев А. Д. 333, 355
 Галеева Л.-С. Д. 173
 Гамалий Е. Г. 21
 Гаранин С. Г. 119, 163
 Гаранин С. Ф. 22
 Гарифзянова Г. Г. 86
 Гармашев А. Ю. 64, 97
 Генрих Е. А. 300
 Герасимов А. В. 23
 Гижевский Б. А. 212
 Гинзбург В. Н. 144
 Гладков А. С. 99
 Глазырин И. В. 127, 134, 326
 Глазырин С. И. 111, 115
 Глухова Я. С. 90
 Глыбин А. М. 182
 Гнутов А. С. 115
 Гнутов И. С. 224
 Говрас Е. А. 116
 Голиков А. В. 152

Головкин С. Ю. 173
 Головнева Е. И. 203
 Головнев И. Ф. 203
 Голубев В. К. 70, 71, 72, 174, 175
 Голубинский А. Г. 163
 Гольшев А. А. 176, 178, 229
 Гордейчук В. А. 351
 Горелов Е. В. 179
 Городничев К. Е. 306
 Горохов С. А. 141, 149
 Гранский А. А. 157
 Грахов Ю. В. 356
 Грецова А. Н. 74, 97, 98, 105
 Григорьев А. Н. 117
 Григорьев А. Ю. 47, 218
 Гринберг Б. А. 179, 220
 Гроховский В. И. 42
 Грошев Е. В. 122
 Грязнов Е. Ф. 180
 Губин А. С. 75
 Губский К. В. 119
 Губский К. Л. 57, 197
 Губченко В. М. 118
 Гуо П. 25
 Гуськов С. Ю. 128, 130
 Гусяков В. К. 15, 25

Д

Дерборн Д. С. 26
 Давлетчин Ю. Ф. 277
 Давыдова О. Н. 262
 Давыдов В. Ю. 75
 Данилов В. В. 142
 Дарина Л. Н. 244
 Дацко И. М. 138, 139
 Да-Юань Гао 63
 Дегтярев А. А. 166, 187
 Дементьев О. Н. 301
 Дёмин В. М. 198
 Демченко Н. Н. 128
 Денисова В. А. 50
 Деркач В. Н. 119, 173
 Дерябин С. Л. 302
 Десятникова М. А. 222
 Дмитриев Ю. В. 126
 Добромыслов А. В. 181, 210, 221
 Доброцветов Д. М. 120
 Добрыгин В. В. 186
 Долгих С. М. 54, 225
 Долгобородов А. Ю. 186, 234
 Долголева Г. В. 121
 Донцов С. А. 115
 Доровских И. А. 277
 Дрёмов В. В. 188, 190
 Дреннов О. Б. 74
 Дрожжин В. С. 50
 Дубинов А. Е. 125
 Дубосарский В. Г. 244, 266
 Дудай П. В. 182

Дудин В. И. 182
 Дудникова Г. И. 298, 304
 Дудоров А. Е. 27, 303
 Дулатов А. К. 152
 Дулин О. Н. 102
 Душина Л. А. 173
 Дырда Н. Д. 247, 255, 275
 Дьячков С. А. 194
 Дэлун Сяо 146

Е

Евдоков О. В. 160
 Евстифеев М. Е. 97
 Егужова М. Ю. 121
 Елсуков В. П. 34, 48
 Елькин В. М. 183, 207
 Емельянов А. Н. 184
 Емельянов П. Ю. 342
 Еремеев А. А. 144
 Еретнова О. В. 27
 Ермичев С. Г. 250
 Ермолович Е. И. 97
 Ершов А. П. 76
 Еськов А. Н. 68
 Еськов Н. С. 328
 Ефимова А. А. 304

Ж

Жан Чонгъю 55
 Железкин Д. А. 51
 Жеребцов А. Л. 195
 Жерноклетов М. В. 185
 Жилыева Н. С. 32
 Жмайло В. А. 121, 122
 Жуков А. Н. 186, 234
 Жуланов В. В. 52, 160
 Журавлев Ю. Н. 91

З

Забабихин И. Е. 9
 Загрядцкий Ф. С. 75
 Зайков Ю. П. 264
 Зайцев А. В. 48
 Залялов А. Н. 122
 Замоздра С. Н. 28
 Замыслов В. Е. 305
 Захаров П. П. 306, 325
 Звере А. С. 86
 Зверев А. С. 77
 Зелепугин А. С. 307
 Зелепугин С. А. 307
 Зельдович В. И. 54, 157, 187, 225, 226
 Зенков Д. И. 228
 Зима В. П. 78
 Зименков А. А. 182
 Зимоглядова О. А. 85
 Зинченко А. Д. 101

Зорина И. Г. 124
 Зорина О. Д. 305
 Зубарева А. Н. 162, 217

И, Й

Иванова Г. Г. 222
 Иванов М. Ф. 248, 252
 Иванов М. Я. 29, 249
 Иванов Н. В. 122
 Ивановский А. В. 29, 182
 Ивашкин В. В. 25, 30
 Ивашко О. А. 234
 Ивлиев С. В. 123
 Игашов С. Ю. 271
 Игнатъев А. В. 58
 Игнатъев Н. Г. 126
 Изгородин В. М. 173
 Изюмова А. Ю. 210
 Ильгамов М. А. 43
 Ильякова Н. Н. 77, 86
 Илюшин М. А. 70
 Ионов Г. В. 188, 190
 Иосилевский И. Л. 124
 Ирничев Д. А. 163
 Ищенко А. Н. 161
 Йон Хань 63

К

Кабанихин С. И. 308, 359, 360
 Кадатский М. А. 188
 Казаков Д. Н. 191, 203, 210
 Казаковская Т. В. 250
 Казачинский А. О. 309
 Кай-Юань Тань 63
 Какшин А. Г. 141, 149
 Калашников Д. А. 224
 Каменев В. Г. 102, 189
 Кандоба И. Н. 310
 Караваев А. В. 188, 190
 Карачинский С. И. 85
 Карлыханов Н. Г. 38, 133
 Карнаухов Е. И. 117, 191
 Карпов С. А. 115, 334
 Карпунин В. О. 253, 267, 275
 Карташев А. Л. 317
 Касатов А. А. 160
 Касатов Д. А. 273
 Касымов Д. П. 78
 Катаева Н. В. 207
 Кашаева Е. А. 256
 Кашкаров А. О. 52, 76, 79, 94
 Киверин А. Д. 248, 252
 Кинеловский С. А. 199
 Кирьянова А. С. 311
 Киселев А. Б. 312
 Киселев А. И. 230
 Киселёв А. Н. 79, 92
 Кискин П. Е. 34

Клапётке Т. М. 71, 72
Клёнов А. И. 233
Клиначева Н. Л. 312
Кобенко С. В. 318
Ковалев А. Е. 185
Ковалев Ю. М. 89, 192, 312
Коваль А. В. 166, 187
Кожаева Ю. П. 125
Кожевников В. Г. 97
Козелков О. Е. 203, 210
Козлов А. Н. 125
Козлов Е. А. 32, 34, 42, 68, 162, 181, 192, 194, 221, 233
Козлов П. А. 305, 313
Козлов С. Г. 228
Козьмин И. В. 310
Койнов О. В. 342
Колесников П. А. 142
Колобянин В. Ю. 361
Колоколов И. В. 136
Колосов В. Ю. 67
Кольчугин С. В. 135, 295, 314
Комаров Р. В. 194, 233
Кондратьев А. Н. 194
Кондрохина И. Н. 222
Коновалов А. Б. 295, 314
Коновалов В. С. 125
Конюкова А. В. 230
Коржиманов А. В. 144
Королева Л. Г. 362
Королёв А. С. 132, 135
Коротаев П. Ю. 214
Коротков К. Е. 126
Косов А. В. 160
Косолапов И. Э. 79, 92
Костицын О. В. 64, 74, 85, 92, 97, 98, 99, 100, 104, 105
Костюченко В. И. 253, 267, 275
Костянко М. В. 86
Котова О. Г. 127, 134
Кочемасов Г. Г. 163
Кочетков А. А. 144
Кошелева Е. В. 218, 223
Кошкин Д. С. 197
Краев А. И. 182
Крайко А. Н. 31
Крапива П. С. 126
Красильников А. В. 32, 195, 196, 315
Красников В. С. 45, 172, 196, 200
Краснослабодцев Д. А. 34
Краснослабодцев Д. А. 48
Красюк И. К. 128, 197
Краус Е. И. 316
Краюхин А. А. 50
Кременко С. И. 34
Кречетов А. Г. 77
Кривоногов А. А. 317
Кривошеина М. Н. 318
Круковский А. Ю. 354
Крутова И. Ю. 18, 318

Ксенофонтов А. И. 198
Кубасов П. В. 102
Кузин В. М. 102
Кузмински Д. 253
Кузнецов А. В. 218
Кузнецова О. В. 244
Кузнецов А. П. 57, 119, 197
Кузнецов Ю. А. 145
Кузьменко А. Е. 142
Кузьмин А. А. 144
Кузьмин С. В. 179
Кукля М. М. 86
Куленко Я. В. 142
Кулешов А. А. 319
Куликов В. Н. 80
Куликов И. М. 129
Куражковский А. Ю. 15
Куратов С. Е. 194, 306
Курбатова Е. И. 198
Куриленков Ю. К. 130
Куркучеков В. В. 142
Куропатенко В. Ф. 35, 39, 55, 315
Куропаткин Ю. П. 228
Кустов Д. В. 168
Куценко Г. П. 99
Кучко Д. П. 32, 68, 194

Л

Лабецкая Н. А. 138, 139
Лавренюк И. В. 239, 254, 277
Лаврук С. А. 81
Лазарев В. В. 321
Лан А. 30
Лапина Н. Ф. 321
Ларин Д. Е. 322
Лебедев В. В. 136
Левашов П. Р. 150, 206
Левин В. А. 82, 83
Легоньков В. Д. 142
Лейви А. Я. 131
Лемешко Б. Д. 152
Леонов А. Г. 57
Лепёхин Н. М. 145, 268
Ли Е. С. 142
Лимонова М. В. 36
Линь Вэньчжоу 285, 286
Линь Чжун 285, 286
Липчак А. И. 114
Лисков И. Ю. 88
Лобода Е. А. 141, 149
Лобода Е. Л. 37
Лобода П. А. 132, 135, 147
Лобойко Б. Г. 74, 85, 92, 98, 99, 100
Лобок М. Г. 132
Ложков А. А. 262
Лузгарев С. В. 86
Лукин А. А. 95, 217, 218
Лунеев С. П. 99
Лу-Ся Као 63

Лушина Ю. Ю. 323
 Лыков В. А. 38, 133, 151
 Лысак В. И. 179

М

Магазов Ф. Г. 39
 Маевский К. К. 199
 Мазур А. С. 47
 Майер А. Е. 45, 165, 172, 196, 200, 202, 213, 216, 232
 Майер П. Н. 200, 202
 Майорова А. С. 191, 203, 207, 210
 Макальский Л. М. 145
 Макаров А. Н. 273
 Макаров К. Н. 57
 Макеева И. Р. 244, 247, 255, 266, 275
 Малахов Ю. И. 249
 Малышкин Г. Н. 256, 314
 Мальгин И. А. 85
 Малюгина С. Н. 191, 203, 207, 210
 Мамаев В. К. 29, 249
 Мануйлович И. С. 82, 83
 Мануковский К. В. 111
 Маошен Као 64
 Мареев Е. А. 40
 Марков В. В. 82, 83
 Мартынюк С. А. 85
 Марченко М. А. 324
 Матвеев А. А. 80
 Матвеев В. З. 250
 Матвиенко О. В. 37
 Межерицкий С. Э. 99
 Мезенцев А. В. 302
 Мелких А. В. 291, 292
 Меньшов И. С. 306, 325, 344
 Мержиевский Л. А. 85, 203, 204
 Меркулов К. Д. 325
 Мигдал К. П. 205
 Милёхин Ю. М. 80
 Минаков Д. В. 206
 Мирзоев А. А. 227, 338
 Миронов А. А. 354
 Мирошкин К. М. 64, 92
 Мисько В. В. 50
 Митрофанов А. Ю. 77, 86
 Митрофанов Е. И. 173
 Михайлов А. Л. 224
 Михайлова Т. Ю. 183, 207
 Михайлов В. Н. 183, 207
 Михайлов Н. А. 326
 Михайлов С. В. 36
 Михайлов Ю. В. 152
 Михайлюк А. В. 197
 Михайлюкова А. И. 97
 Модестов Д. Г. 257, 258, 275
 Моисеев Н. Я. 328, 360
 Мокин Ю. А. 356
 Мокрушин С. С. 53, 117, 191, 203, 207, 210
 Молодец А. М. 176, 178, 229
 Монтгомери Р. 241

Морозов В. А. 95, 217, 218
 Морозов И. В. 179
 Москаленко И. Н. 126
 Москвичев В. А. 126
 Музыря А. К. 52
 Мунтян А. Н. 120
 Муфтахетдинова Р. Ф. 42
 Мухамадиев Р. Ф. 314
 Муханов А. Э. 87

Н

Нагаев К. А. 114
 Надежин С. С. 182
 Назаров К. С. 127, 134
 Наймарк О. Б. 162, 164, 208
 Наумова М. Ю. 145
 Нелюбина Н. В. 88
 Нигматулин Р. И. 43
 Нижегородцев В. И. 228
 Никитина Е. В. 180
 Никитин О. А. 142
 Никитин О. Н. 32
 Никифоров М. В. 239, 254
 Никульшин М. В. 257, 277, 342
 Нин Дин 146
 Новаковский Н. С. 44
 Новикова Е. А. 121
 Ногин В. Н. 32, 34, 48, 196, 209
 Нурмухаметов Д. Р. 88

О

Обухов А. Г. 18, 287, 289, 344
 Овечкин А. А. 132, 135, 147
 Овчинников А. В. 152
 Огинов А. В. 130
 Огородников Л. Л. 136
 Опрышко А. Ф. 328
 Опрышко О. В. 18, 329
 Орешкин В. И. 138, 139
 Орлова Ю. Н. 88
 Орлов Г. В. 330
 Орлов М. Ю. 88
 Осавчук А. Н. 80, 169
 Оськин И. А. 95

П

Павленко А. В. 53, 56, 117, 159, 191, 203, 207, 210
 Павленко В. А. 16
 Пальниченко А. В. 229
 Пантелеев И. А. 210
 Панюков Ю. Г. 331
 Пасюков С. Д. 239, 254
 Пацелов А. М. 220
 Пашенцев В. А. 51
 Пашинин П. П. 197
 Пенвань Генъ 64
 Петрова А. Н. 210, 211

Петров Д. В. 48
 Петров С. И. 120
 Петровцев А. В. 192, 233
 Пешкичев И. В. 244, 261
 Пигасов Е. Е. 89
 Пикуз С. А. 144
 Пикуз Т. А. 144
 Пилогин В. П. 212, 220
 Пименова М. М. 262
 Писков С. С. 126
 Пискунов Ю. А. 16, 53
 Пластинин А. В. 76, 93
 Плотников А. В. 220
 Поварницын М. Е. 150
 Погорелко В. В. 45, 200, 213
 Погребов А. И. 101
 Подурец А. М. 185, 222
 Покаташкин П. А. 214
 Политов В. Ю. 142
 Половникова Т. Н. 331
 Пономарёва Т. В. 333
 Пономарёв Л. И. 263
 Поняев А. И. 90
 Попова В. В. 132, 135
 Попова Е. Н. 215
 Попова Т. В. 216
 Попов В. В. 215
 Попов Д. С. 333
 Попов И. А. 239, 254
 Попов С. С. 142
 Попруженко С. В. 354
 Потапенко И. Ф. 115, 334
 Потапов А. А. 137, 335
 Потапов А. М. 264, 265
 Празян Т. Л. 91
 Приданников А. В. 337
 Прокуратов И. А. 152
 Пронин Я. В. 328
 Просвирнин К. М. 52, 64, 79, 92
 Просвиряков Е. Ю. 294, 338
 Прууэл Э. Р. 52, 76, 79, 94, 160
 Пугачёв В. Ю. 244, 266
 Путилин О. С. 342
 Пхайко Н. А. 149
 Пчелинцева С. В. 255
 Пчелинцев М. В. 321, 323, 333, 342

Р

Радченко А. В. 46, 291
 Радченко П. А. 46, 291
 Разоренов С. В. 211
 Ральников М. А. 68, 194
 Рамазанов А. М. 57
 Рафейчик С. И. 93
 Рачкова Н. В. 104
 Рейно В. В. 37
 Рейновски Р. 253
 Ридный Я. М. 338
 Робук В. Н. 339

Рогаев К. С. 161
 Рогачёв В. Г. 11, 50
 Рогозкин Д. Б. 87, 194
 Роде А. В. 21
 Романова Н. М. 120
 Романов И. Н. 228
 Рубина Л. И. 46, 341, 350
 Рубцов И. А. 52, 76, 79, 94
 Рупасов А. А. 128
 Русинов Г. Л. 99
 Рыбка Д. В. 138, 139
 Рыкованов Г. Н. 38
 Рыкунова А. А. 255, 266
 Рыкунов А. А. 69, 140
 Рязанцев С. Н. 144
 Рязкин А. А. 342

С

Савельева Н. В. 164
 Савенков Г. Г. 47, 95, 217, 218
 Савиных А. С. 178
 Савченко К. В. 228
 Сагарадзе В. В. 207
 Садыков Н. Р. 110, 288
 Саликова М. В. 342
 Салюлев А. Б. 265
 Самарин С. И. 253, 256, 267, 275
 Сатонкина Н. П. 76, 96
 Сафронов К. В. 141, 149
 Сахаров М. Ю. 48
 Свиридов Е. В. 56
 Сдобнов В. И. 101
 Севастьянов А. Б. 97
 Седов С. Ю. 298
 Селемир В. Д. 179, 228
 Селифанов А. Н. 152
 Сельченкова Н. И. 218, 223
 Семенов А. Ю. 128, 197
 Серёжкин А. А. 194, 344
 Сиденко В. В. 145
 Сидоров К. С. 233
 Силантьева И. Ю. 257
 Симакин А. В. 268
 Симаков В. Г. 185, 222
 Симаков Ф. А. 97
 Симоненко В. А. 10, 16, 48, 239, 240, 244, 254, 255, 258, 270, 275
 Сингх П. 253
 Сеницкий С. Л. 142
 Синькова О. Г. 49, 58
 Скальоне Д. М. 241
 Скачков П. П. 305
 Скобелев И. Ю. 144
 Сковородин Д. И. 142
 Скоркин Н. А. 348
 Скорочкин Ю. В. 50
 Сладков А. Д. 144
 Слепухин П. А. 99
 Смирнов В. Н. 51, 52

Смирнов Е. Б. 52, 64, 92, 166, 187
 Смирнов Н. А. 219
 Соболев Д. В. 176
 Соколов Л. В. 38
 Соколов С. С. 223
 Соловьёв А. А. 144
 Соловьёв А. С. 271
 Соловьёва Ю. В. 212, 220
 Сорока А. И. 48
 Сорокина Е. М. 344
 Сорокин И. Н. 273
 Сорокин С. А. 143, 144
 Соснин О. В. 99
 Софронов В. Н. 121
 Стадник А. Л. 349
 Станкевич А. В. 74, 98, 99, 100
 Старенченко В. А. 220
 Старенченко С. В. 220
 Стародубцев К. В. 173
 Стародубцев М. В. 144
 Стародубцев П. В. 50
 Старостенко А. А. 142
 Старостенко Д. А. 142
 Стаценко В. П. 49, 58
 Стёпушкин С. Н. 50
 Стихно К. А. 25
 Столбиков М. Ю. 51, 52
 Столбовский А. В. 215
 Ступина О. Д. 346
 Стучебрюхов И. А. 128
 Суинхоу М. Т. 272
 Суинхоу М. 253
 Сухаревский Д. И. 145
 Сухова Л. Г. 99
 Сыролева К. Н. 262
 Сысков Д. В. 142
 Сысоев В. С. 40, 145
 Сяоцзянь Шу 146

Т

Табаченко А. Н. 161
 Тагиров Р. М. 182
 Тайбинов Н. П. 74, 97, 98, 99, 100, 104, 105
 Талала К. А. 347
 Талуц Н. И. 181, 210, 221
 Тан Тъеган 55
 Тараканов В. П. 130
 Таран С. С. 120
 Тарасов А. Ю. 97, 104, 105
 Таржанов В. И. 68, 101
 Таскаев С. Ю. 256, 273
 Теляшова Е. З. 348
 Темербеков В. М. 66
 Тен К. А. 34, 52, 79, 94
 Терешкина И. А. 222
 Терещенко М. Н. 75
 Тимофеев И. В. 142
 Тимофеев И. С. 57
 Тимофеев О. А. 85

Титов В. М. 94
 Тихов А. А. 189
 Ткачев О. В. 32, 194
 Ткаченко М. И. 222
 Толмачёв Т. П. 212, 220
 Толочко Б. П. 52, 160
 Томилов Ю. А. 273, 278
 Топорков Д. Ю. 43
 Топорова О. О. 349, 361
 Треллуэ Х. 272
 Тропин Д. А. 101
 Трунев Ю. А. 142
 Трунин И. Р. 222, 223
 Тупицын А. В. 77
 Туркин В. Н. 102, 189
 Турмышев И. С. 114
 Туч Е. В. 318
 Тучкова Н. П. 319
 Тюпанова О. А. 182
 Тяктев А. А. 16, 53

У

Уваров С. В. 162, 164
 Углов А. С. 253, 267, 275
 Ульянов О. Н. 46, 341, 350
 Урлин Е. В. 228
 Уткин А. В. 162, 180, 217, 234
 Учаев А. Я. 218, 223
 Ушакова О. В. 351
 Ушков А. В. 277

Ф

Фавалли А. 272
 Фалахутдинов Р. М. 215
 Фальков А. Л. 132, 147
 Фатиев Т. С. 152
 Федоров А. В. 224
 Фёдоров А. В. 65, 66, 81, 101, 103
 Фёдоров В. Е. 352
 Федюшкин В. Н. 239, 254, 277
 Филатов С. Ю. 203, 210
 Филин Н. В. 352
 Филиппов В. Г. 268
 Филиппов Е. Д. 144
 Финюшин С. А. 224
 Флегентов В. А. 141, 149
 Фокин В. Б. 150
 Фортов В. Е. 197
 Фролова Н. Ю. 54, 157, 187, 225, 226
 Фролова С. В. 280, 281

Х

Хазанов Е. А. 144
 Хайбрахманов С. А. 303
 Халдин К. В. 51
 Ханефт А. В. 77
 Хао Йинь 64

Хейфец А. Э. 54, 157, 187, 225, 226
 Химич И. А. 151
 Хищенко К. В. 128, 188, 197, 216, 226, 347
 Хлыбов В. И. 356
 Хмель Т. А. 81
 Хомская И. В. 42, 157, 187, 226
 Хренков С. Д. 142
 Христенко Ю. Ф. 307
 Ху Хайбо 55

Ц

Цветков А. В. 222
 Цельмович В. А. 15
 Цзижань Лю 63
 Цзин-Мин Ли 63
 Цзинь-Шань Ли 63
 ЦзяньГо Ван 113
 Цухуа Ду 64
 Цыгвинцев И. П. 354
 Цышевский Р. В. 86

Ч

Чайковский С. А. 138, 139
 Чайко К. В. 266
 Чашин М. А. 341
 Чемагина И. В. 97, 104, 105
 Чень Ёнтао 55
 Черепанова Е. А. 188
 Чернухин Ю. И. 258
 Черняков В. Е. 38, 133
 Чегонов О. В. 152
 Чигвинцев А. Ю. 124
 Чингина Е. А. 170
 Чирков П. В. 227
 Чуан Сюэ 146
 Чубарешко И. С. 355
 Чудаков Е. А. 224

Ш, Щ

Шабалин И. И. 316
 Шадрин А. А. 135
 Шайкин А. А. 144
 Шайкин И. А. 144
 Шалковский Д. М. 48, 233
 Шамро О. А. 179, 228
 Шаповалов В. И. 250
 Шарабуря Т. М. 262
 Шарафутдинов М. Р. 160
 Шаров Т. В. 168

Шатов М. М. 355
 Шафеев Г. А. 268
 Шахрай Д. В. 184, 229
 Шахторин Ю. А. 104, 105
 Швалева Р. К. 356
 Шевченко В. Г. 230
 Шереметьева У. Ф. 244, 247, 275
 Шестаков А. А. 358
 Шестаковская Е. С. 39, 55
 Шестаченко О. Е. 56
 Шехтман Л. И. 52, 160
 Шиберин И. В. 222
 Ширинкина И. Г. 166
 Ширококов А. Е. 68, 194, 233
 Широков А. Е. 122
 Шишкин В. Ю. 264, 265
 Шишленин М. А. 308, 359, 360
 Шишов Н. И. 80
 Шлюгаев Ю. В. 40
 Шмаков В. М. 360
 Шорохов Е. В. 54, 157, 187, 211, 215, 225, 226
 Шубин А. С. 102, 189
 Шугуров В. В. 138
 Шульц О. В. 244, 261, 276, 277
 Шункай Сунь 146
 Шушлебин А. Н. 38
 Щёголев Е. В. 133
 Щенникова Е. М. 273, 278
 Щербачков В. Н. 64
 Щудло И. М. 273

Э, Ю, Я

Эбель А. А. 232
 Югов Н. Т. 161
 Юдина Н. В. 110, 288
 Юй Хун 285, 286
 Юнин Д. А. 280, 281
 Юношев А. С. 76, 93
 Юсупов Д. Т. 233
 Юфа В. Н. 57
 Юшков А. А. 67
 Яблонских Т. И. 166
 Яковенко И. С. 248, 252
 Яковлев Г. А. 42
 Яковлев И. В. 144
 Якубов В. Б. 22
 Якушев В. В. 186, 234
 Яловец А. П. 131, 347
 Янилкин А. В. 205, 214
 Янилкин Ю. В. 49, 58, 349, 361, 362
 Ян Чжан 146

INDEX

A

Abdubakova L. V. 287
 Abdullina D. N. 157
 Adadurov A. Yu. 48
 Aduiev B. P. 88
 Afanas'eva S. A. 161
 Agafontsev M. V. 38
 Aganin A. A. 43
 Agranat M. B. 152
 Akhlyustin I. A. 64, 93
 Akhmetov A. R. 143
 Alkhimova M. A. 145
 Almazova K. I. 179
 Amelin I. I. 15, 26
 Ananiev S. Yu. 187, 235
 Ancharov A. I. 213
 Andreev A. A. 109
 Andreev A. M. 57
 Andreev D. A. 153
 Andreev V. G. 153
 Andrianov V. P. 103
 Anikin N. B. 16, 159
 Anisichkin V. F. 160
 Antipova T. V. 104, 105
 Anuchina A. I. 352
 Aporoski A. V. 110, 289
 Arakcheev A. S. 143, 161
 Aristova A. U. 51
 Artemova N. A. 352
 Astafiev V. V. 167
 Astrelin V. T. 143
 Atlukhanov M. G. 143
 Atroshenko S. A. 166, 217
 Aulchenko V. M. 161
 Avdeeva A. V. 158
 Avdonin V. V. 229

B

Badjin D. A. 111
 Badjukov D. D. 162
 Badyukov D. D. 59
 Baiwen Li 112
 Bakaev V. P. 239, 254
 Bakurkina E. S. 39, 134
 Balandina A. N. 223
 Bandurkin K. V. 190
 Bannikova I. A. 163, 165
 Barahvostov S. V. 114
 Barannikova D. D. 290
 Baranov V. K. 37, 164, 183
 Barenbaum A. A. 17
 Barmina E. V. 269
 Batalova I. A. 104
 Bat'kov Yu. V. 222
 Batuev S. P. 46, 291
 Bautin S. P. 19, 44, 303, 306

Bayandin Yu. V. 165
 Bedarev I. A. 65, 66, 103
 Belenovskiy Yu. A. 64, 93
 Belkov S. A. 164
 Belkov S. A. 120, 174
 Belokurov G. M. 88
 Belonogova E. A. 267
 Belonogov A. N. 179
 Belonogov M. N. 240
 Belov I. A. 174
 Belov N. N. 161
 Belov O. V. 169
 Belyaev K. P. 320
 Beregov R. U. 292
 Berendeiev E. A. 305
 Berezovskaya M. E. 132, 136
 Bevard B. 242
 Bezgodov E. V. 239, 254, 274
 Bin He 113
 Blinnikov S. I. 111
 Bochkareva A. A. 244, 245, 262
 Bodrov A. S. 307
 Bogomolov G. N. 89
 Bogomolov V. 127
 Bokunyaeva A. O. 67, 292
 Borodin E. N. 166, 201
 Borovkov V. V. 179
 Borschevskiy M. A. 118
 Botko E. N. 243
 Boyko M. M. 181
 Bragin V. A. 96
 Bragunets V. A. 222
 Brantov A. V. 115, 117, 133
 Brichikov S. A. 33
 Brodova I. G. 167, 211, 212
 Bruck Syal M. 19
 Bugaenko I. L. 16, 53
 Bulatov M. U. 146
 Burdakov A. V. 143, 161
 Burdonov K. F. 145
 Burdonskiy I. N. 57
 Burkin V. V. 161
 Butusov E. I. 225
 Buyko A. M. 23
 Buzyurkin A. E. 168
 Bychenkov V. Yu. 115, 117, 133

C

Chaiko K. V. 267
 Chaikovskiy S. A. 139, 140
 Chaschin M. A. 341
 Chefonov O. V. 152
 Chemagina I. V. 98, 104, 105
 Chen S. N. 144, 145
 Chen Yongtao 55
 Cherepanova E. A. 188
 Chernukhin Yu. I. 258

Chernyakov V. E. 39, 134
 Chigvintsev A. Yu. 124
 Chingina E. A. 170
 Chirkov P. V. 228
 Chubareshko I. S. 355
 Chudakov E. A. 225
 Ciardi A. 144, 145

D

Danilov V. V. 143
 Darina L. N. 244
 Datsko I. M. 139, 140
 Davletchin Y. F. 278
 Davydova O. N. 263
 Davydov V. Y. 75
 Dayuan Gao 63
 Dearborn D. S. 27
 Degtyarev A. A. 167, 187
 Demchenko N. N. 129
 Dementiev O. N. 302
 Denisova V. A. 51
 Derkach V. N. 120, 174
 Deryabin S. L. 303
 Desyatnikova M. A. 222
 Djachkov S. A. 194
 Dmitriev Yu. 127
 Dobromyslov A. V. 182, 210, 221
 Dobrotsvetov D. M. 120
 Dobrygin V. V. 187
 Dolgikh C. M. 54
 Dolgikh S. M. 225
 Dolgoborodov A. Yu. 187, 235
 Dolgoleva G. V. 121
 Dontsov S. A. 116
 Dorovskikh I. A. 278
 Dremov V. V. 188, 191
 Drennov O. B. 75
 Drozgin V. S. 51
 Dubinov A. E. 125
 Dubosarskiy V. G. 244, 267
 Duday P. V. 183
 Dudin V. I. 183
 Dudnikova G. I. 299, 305
 Dudorov A. E. 28, 304
 Dulatov A. K. 153
 Dulin O. N. 103
 Dushina L. A. 174
 Dyomin V. M. 199
 Dyrda N. D. 248, 255, 276

E

Ebel A. A. 233
 Efimova A. A. 305
 Eguzhova M. Yu. 122
 Elkin V. M. 183, 207
 Elsukov V. P. 34, 49
 Emelyanov A. N. 184
 Emelyanov P. Y. 343

Eremeev A. A. 145
 Eretnova O. V. 28
 Ermichev S. G. 251
 Ershov A. P. 76
 Eskov A. N. 68
 Eskov N. S. 329
 Evdokov O. V. 161

F

Falahutdinov R. M. 215
 Falkov A. L. 132, 148
 Fatiev T. S. 153
 Favalli A. 272
 Fedorov A. V. 65, 66, 82, 102, 103, 225
 Fedorov V. E. 353
 Fedyushkin V. N. 239, 254, 278
 Filatov S. Yu. 203, 210
 Filin N. V. 353
 Filippov E. D. 145
 Filippov V. G. 269
 Finyushin S. A. 225
 Flegentov V. A. 142, 149
 Fokin V. B. 150
 Fortov V. E. 197
 Frolova N. Yu. 54, 157, 187, 225, 227
 Frolova S. V. 280, 281
 Fuchs J. 144, 145

G

Gaan K. V. 54, 157, 225
 Gabdulhaev V. F. 306
 Gabdulkaev V. F. 300
 Gadzhiev A. D. 333, 355
 Galeeva L.-S. D. 173
 Gamaly E. G. 22
 Garanin S. F. 23
 Garanin S. G. 120, 164
 Garifzianova G. G. 86
 Garmashev A. Yu. 64
 Garmashev A. Yu. 98
 Gavrilov D. S. 142, 149
 Gavrilov P. M. 20
 Genrikh E. A. 301
 Gerasimov A. V. 24
 Ginzburg V. N. 145
 Gizhevskii B. A. 213
 Gladkov A. S. 100
 Glazyrin I. V. 128, 135, 327
 Glazyrin S. I. 111, 115
 Glukhova Y. S. 91
 Glybin A. M. 183
 Gnutov A. S. 116
 Gnutov I. S. 225
 Golikov A. V. 153
 Golovkin S. Yu. 174
 Golovneva E. I. 204
 Golovnev I. F. 204
 Golubev V. K. 70, 72, 73, 175, 176

Golubinsky A. G. 164
 Golyshev A. A. 177, 178, 229
 Gordeichuk V. A. 352
 Gorelov E. V. 179
 Gorodnichev K. E. 307
 Gorokhov S. A. 142, 149
 Goubin A. S. 75
 Govras E. A. 117
 Grakhov Yu. V. 357
 Granskii A. A. 157
 Greenberg B. A. 180
 Gretsova A. N. 74, 98, 105
 Grigor'ev A. Yu. 47
 Grigoriev A. N. 118
 Grokhovsky V. I. 42
 Groshev E. V. 122
 Gryaznov E. F. 181
 Gubchenko V. M. 119
 Gubskii K. L. 198
 Gubskiy K. L. 57
 Gubsky K. V. 120
 Guo P. 25
 Gusiakov V. K. 15, 26
 Guskov S. Y. 129
 Guskov S. Yu. 130

H, I, J

Hao Yin 64
 Hauri C. P. 152
 Hu Haibo 55
 Igashov S. Yu. 272
 Ignatiev A. V. 59
 Ignatiev N. 127
 Ilgamov M. A. 43
 Ilyakova N. N. 78, 86
 Ilyushin M. A. 70
 Ionov G. V. 188, 191
 Iosilevskiy I. L. 124
 Irinichev D. A. 164
 Ishchenko A. N. 161
 Ivanova G. G. 222
 Ivanov M. F. 249, 252
 Ivanov M. Ja. 29, 249
 Ivanov N. V. 122
 Ivanovskiy A. V. 30, 183
 Ivashkin V. V. 25, 31
 Ivashko O. A. 235
 Ivliev S. V. 123
 Izgorodin V. M. 174
 Izumova A. U. 211
 JianGuo Wang 113
 Jingming Li 63
 Jinshan Li 63

K

Kabanikhin S. I. 308, 359, 360
 Kadatskiy M. A. 189
 Kaiyuan Tan 63

Kakshin A. G. 142, 149
 Kalashnikov D. A. 225
 Kamenev V. G. 103, 190
 Kandoba I. N. 310
 Karachinsky S. I. 85
 Karavaev A. V. 188, 191
 Karlykhanov N. G. 39, 134
 Karnaukhov E. I. 118, 191
 Karpov S. A. 115, 335
 Karpunin V. O. 253, 268, 275
 Kartashev A. A. 317
 Kasatov A. A. 161
 Kasatov D. A. 273
 Kashaeva E. A. 256
 Kashkarov A. O. 53, 76, 95
 Kasymov D. P. 79
 Katayeva N. V. 208
 Kazachinsky A. O. 309
 Kazakov D. N. 191, 203, 210
 Kazakovskaya T. V. 251
 Khaibrakhmanov S. A. 304
 Khaldin K. V. 52
 Khanefit A. V. 78
 Khazanov E. A. 145
 Kheifets A. E. 54, 157, 187, 225, 227
 Khlar B. 144, 145
 Khimich I. A. 151
 Khishchenko K. V. 347
 Khishchenko K. V. 129, 189, 197, 216, 226
 Khlybov V. I. 357
 Khmel T. A. 82
 Khomskaya I. V. 42, 157, 187, 227
 Khrenkov S. D. 143
 Khristenko Yu. F. 307
 Kim V. V. 178
 Kinelovskii S. A. 200
 Kiryanova A. S. 311
 Kiselev A. B. 312
 Kiselev A. I. 231
 Kiselev A. N. 93
 Kiskin P. E. 34
 Kiverin A. D. 249, 252
 Klapötke T. M. 72, 73
 Kleynov A. I. 234
 Klinacheva N. L. 313
 Kobenko S. V. 318
 Kochemasov G. G. 164
 Kochetkov A. A. 145
 Koinov O. V. 342
 Kolchugin S. V. 136, 295, 315
 Kolesnikov P. A. 143
 Kolobyanin V. Yu. 362
 Kolokolov I. V. 136
 Kolosov V. Yu. 67
 Komarov R. V. 234
 Komarov R. V. 194
 Kondratjev A. N. 194
 Kondrokhina I. N. 222
 Konovalov A. B. 295, 315
 Konovalov V. S. 126

- Konukova A. V. 231
Koroleva L. G. 363
Korolev A. S. 132, 136
Korotaev P. Yu. 214
Korotkov K. 127
Korzhimanov A. V. 145
Kosheleva E. V. 219, 224
Koshkin D. S. 198
Kosolapov I. E. 93
Kosov A. V. 161
Kostistyn O. V. 74, 98, 99, 100
Kostitsyn O. V. 64, 85, 93, 98, 104, 105
Kostjuchenko V. I. 253, 268, 275
Kostyanko M. V. 86
Kotova O. G. 128, 135
Koval' A. V. 167
Koval' A. V. 187
Kovalev A. E. 186
Kovalev Yu. M. 90, 192, 313
Kozelkov O. E. 203, 210
Kozhayeva J. P. 125
Kozhevnikov V. G. 97
Kozlov A. N. 126
Kozlov E. A. 33, 34, 42, 68, 162, 182, 193, 194, 221, 234
Kozlov P. A. 306, 314
Kozlov S. G. 228
Kozmin I. V. 310
Kraev A. I. 183
Kraiko A. N. 32
Krapiva P. 127
Krasilnikov A. V. 33, 195, 196, 316
Krasnikov V. S. 45, 172, 197, 201
Krasnoslabodtsev D. A. 34
Krasnosolobodtsev D. A. 49
Krasnyuk I. K. 129, 197
Krauhin A. A. 51
Kraus E. I. 316
Krechetov A. G. 78
Krivonogov A. A. 317
Krivosheina M. N. 318
Krukovskiy A. Yu. 354
Krutova I. Y. 319
Krutova I. Yu. 19
Ksenofontov A. I. 199
Kubasov P. V. 103
Kuchko D. P. 33, 68, 194
Kuklja M. M. 86
Kulenko Ya. V. 143
Kuleshov A. A. 320
Kulikov I. M. 129
Kulikov V. N. 81
Kuratov S. E. 194
Kuratov S. E. 307
Kurazhkovsky A. Yu. 15
Kurbatova E. I. 199
Kurilenkov Yu. K. 130
Kurkuchekov V. V. 143
Kuropatenko V. F. 36, 40, 56, 316
Kuropatkin Yu. P. 228
Kustov D. V. 169
Kutsenko G. P. 100
Kuzin V. M. 103
Kuzmenko A. E. 143
Kuzmin A. A. 145
Kuzminski J. 254
Kuzmin S. V. 180
Kuznetsova O. V. 244
Kuznetsov A. P. 57, 120, 198
Kuznetsov A. V. 218
Kuznetsov Yu. A. 146
- ## L
- Labetskaya N. A. 139, 140
Lang A. 31
Lapina N. F. 322
Larin D. E. 323
Lavrenyuk I. V. 239, 254, 278
Lavruk S. A. 82
Lazarev V. V. 321
Lebedev V. V. 136
Legonkov V. D. 143
Lemeshko B. D. 153
Leonov A. G. 57
Lepekhin N. M. 146, 269
Levashov P. R. 150, 206
Levin V. A. 83, 84
Leyvi A. Ya. 131
Li E. S. 143
Limonova M. V. 37
Lin Wenzhou 285, 286
Lin Zhong 285, 286
Lipchak A. I. 114
Liskov I. Yu. 88
Loboda E. A. 142, 149
Loboda E. L. 38
Loboda P. A. 132, 136, 148
Loboiko B. G. 85, 93
Loboilko B. G. 74, 98, 99, 100
Lobok M. G. 133
Lozhkov A. A. 263
Lukin A. A. 96, 217, 218
Luneev S. P. 100
Luoxia Cao 63
Lushina Y. Y. 324
Luzgarev S. V. 86
Lykov V. A. 39, 134, 151
Lysak V. I. 180
- ## M
- Maevskii K. K. 200
Magazov F. G. 40
Maiorova A. S. 208
Makalsky L. M. 146
Makarov A. N. 273
Makarov K. N. 57
Makeeva I. R. 244, 267, 276
Makeyeva I. R. 248, 255
Malakhov Yu. I. 249

Malgin I. A. 85
 Malyshkin G. N. 256, 315
 Malyugina S. N. 191, 203, 208, 210
 Mamaev V. K. 29
 Mamaev V. R. 249
 Manukovskiy K. V. 111
 Manuylovich I. S. 83, 84
 Maosheng Cao 64
 Marchenko M. A. 325
 Mareev E. A. 41
 Markov V. V. 83, 84
 Martynyuk S. A. 85
 Matveev A. A. 81
 Matveev V. Z. 251
 Matvienko O. V. 38
 Mayer A. E. 45, 166, 172, 197, 214, 216
 Mayer P. N. 201, 202
 Mayer A. E. 201, 202, 233
 Mayorova A. S. 191, 203, 210
 Mazur A. S. 47
 Melkikh A. V. 292
 Menshov I. S. 307, 326, 344
 Merkulov K. D. 326
 Merzhievsky L. A. 85, 204, 205
 Mezentsev A. V. 303
 Mezheritsky S. E. 100
 Migdal K. P. 205
 Mikhailov A. L. 225
 Mikhailov S. V. 37
 Mikhailov Yu. V. 153
 Mikhaylova T. Yu. 183, 207
 Mikhaylov N. A. 327
 Mikhaylov V. N. 183, 207
 Mikhaylukova A. I. 97
 Mikhaylyuk A. V. 198
 Milekhin Yu. M. 81
 Minakov D. V. 206
 Mironov A. A. 354
 Miroshkin K. M. 64, 93
 Mirsoev A. A. 339
 Mirzoev A. A. 228
 Mis'ko V. V. 51
 Mitrofanov A. Y. 78, 86
 Mitrofanov Eu. I. 174
 Modestov D. G. 257, 258, 276
 Moiseev N. Ya. 361
 Mokin Yu. A. 357
 Mokrushin S. S. 53, 118, 191, 203, 208, 210
 Molodets A. M. 177, 178, 229
 Montgomery R. 242
 Morozov I. V. 179
 Morozov V. A. 96, 217, 218
 Moskalenko I. 127
 Moskvichev V. 127
 Muftakhedinova R. F. 42
 Mukhamadiev R. F. 315
 Mukhanov A. E. 87
 Muntyan A. N. 120
 Muzyrya A. K. 53

N

Nadezhin S. S. 183
 Nagaev K. A. 114
 Naimark O. B. 163, 165, 209
 Naumova M. Yu. 146
 Nazarov K. S. 128, 135
 Neljubina N. V. 88
 Nigmatulin R. I. 43
 Nikiforov M. V. 239, 254
 Nikitina E. V. 181
 Nikitin O. A. 33, 143
 Nikulshin M. V. 257, 278, 342
 Nizhegorodtsev V. I. 228
 Nogin V. N. 33, 34, 49, 196, 209
 Novakovskiy N. S. 44
 Novikova E. A. 122
 Nurmukhametov D. R. 88

O

Obuhov A. G. 19
 Obukhov A. G. 287, 290, 345
 Oginov A. V. 130
 Ogorodnikov L. L. 136
 Opryshko A. F. 329
 Opryshko O. V. 19
 Oreshkin V. I. 139, 140
 Orlova Yu. N. 89
 Orlov G. V. 330
 Orlov M. Yu. 89
 Osavchuk A. N. 81
 Osavchyuk A. N. 169
 Oskin I. A. 96
 Ovchinnikov A. V. 152
 Ovechkin A. A. 132, 136, 148

P

Palnichenko A. V. 229
 Panteleev I. A. 211
 Panyukov Y. G. 331
 Pashentsev V. A. 52
 Pashinin P. P. 197
 Pasyukov S. D. 239, 254
 Pavlenko A. V. 16, 53, 57, 118, 159, 191, 203, 208, 210
 Pchelintseva S. V. 255
 Pchelintsev M. V. 322, 324, 334, 343
 Pengwan Chen 64
 Peshkichev I. V. 244, 262
 Petrova A. N. 211, 212
 Petrov D. V. 49
 Petrov S. I. 120
 Petrovstev A. V. 193
 Petrovtsev A. V. 234
 Pigasov E. E. 90
 Pikuz S. A. 145
 Pikuz T. A. 145
 Pilyugin V. P. 213
 Pimenova M. M. 263

Piskov S. 127
 Piskunov Yu. A. 16, 53
 Pkhaiko N. A. 149
 Plastinin A. V. 76, 93
 Podurets A. M. 186, 222
 Pogorelko V. V. 45, 201, 214
 Pogrebov A. I. 101
 Pokatashkin P. A. 214
 Politov V. Yu. 143
 Polovnikova T. N. 332
 Ponomaryova T. V. 333
 Ponomaryov L. I. 264
 Ponyaev A. I. 91
 Popova E. N. 215
 Popova T. V. 216
 Popova V. V. 132, 136
 Popov D. S. 334
 Popov I. A. 239, 254
 Popov S. S. 143
 Popov V. V. 215
 Popruzhenko S. V. 354
 Potapenko I. F. 115, 335
 Potapov A. A. 138, 336
 Potapov A. M. 264, 265
 Povarnitsyn M. E. 150
 Prazyan T. L. 92
 Pridannikov A. V. 337
 Prokuratov I. A. 153
 Pronin Y. V. 329
 Prosvirmin K. M. 53, 64, 93
 Prosviryakov E. Yu. 294, 338
 Pruel E. R. 53, 76, 95, 160
 Pugachev V. Yu. 267
 Pugachyov V. Yu. 244
 Putilin O. S. 342

Q, R

Qiuhua Du 64
 Rachkova N. V. 104
 Radchenko A. V. 46, 291
 Radchenko P. A. 46, 291
 Rafeichik S. I. 93
 Ralnikov M. A. 68, 194
 Ramazanov A. M. 57
 Razorenov S. V. 212
 Reinovsky R. 254
 Revet G. 144, 145
 Reyno V. V. 38
 Ridnyi Ya. M. 339
 Robuk V. N. 340
 Rode A. V. 22
 Rogachev V. G. 12, 51
 Rogaev K. S. 161
 Rogozkin D. B. 87, 194
 Romanova N. M. 120
 Romanov I. N. 228
 Rubina L. I. 47, 341, 350
 Rubtsov I. A. 53, 76, 95
 Rupasov A. A. 129

Rusinov G. L. 99
 Ryakin A. A. 342
 Ryazantsev S. N. 145
 Rybka D. V. 139, 140
 Rykounov A. A. 141
 Rykounov A. A. 69
 Rykovanov G. N. 39
 Rykunova A. A. 267
 Rykunova A. A. 255

S

Sadykov N. R. 110, 289
 Safronov K. V. 142, 149
 Sagaradze V. V. 208
 Sakharov M. Yu. 48
 Salikova M. V. 343
 Salyulev A. B. 265
 Samarin S. I. 253, 256, 268, 275
 Satonkina N. P. 76, 97
 Savchenko K. V. 228
 Saveleva N. V. 165
 Savenkov G. G. 47, 96, 217, 218
 Savinykh A. S. 178
 Scaglione J. M. 242
 Scorkin N. A. 348
 Sdobnov V. I. 101
 Sedov S. Yu. 298
 Selchenkova N. I. 219, 224
 Selemir V. D. 179, 228
 Selifanov A. N. 153
 Semenov A. Yu. 129, 197
 Serezhkin A. A. 194, 344
 Sevastyanov A. B. 97
 Shabalin I. I. 316
 Shaburova T. M. 263
 Shadrin A. A. 132, 136
 Shafeev G. A. 269
 Shahray D. V. 184
 Shakhray D. V. 229
 Shakhtorin Yu. A. 104, 105
 Shalkovsky D. M. 48, 234
 Shamro O. A. 179, 228
 Shamro O. A. 169
 Shapovalov V. I. 251
 Sharafutdinov M. R. 161
 Sharov T. V. 169
 Shatov M. M. 356
 Shaykin A. A. 145
 Shaykin I. A. 145
 Shchegolev E. V. 134
 Shchennikova E. M. 274, 279
 Shcherbakov V. N. 64
 Shchudlo I. M. 273
 Shekhtman L. I. 53, 95, 161
 Sheremetyeva U. F. 245, 248, 276
 Shestachenko O. E. 57
 Shestakov A. A. 355, 358, 359
 Shestakovskaya E. S. 40, 56
 Shevchenko V. G. 231

Shiberin I. V. 223
Shirinkina I. G. 167
Shirobokov A. E. 68, 194, 234
Shirokov A. E. 122
Shishkin V. Yu. 264, 265
Shishlenin M. A. 308, 359, 360
Shishov N. I. 81
Shmakov V. M. 361
Shorohov E. V. 215
Shorokhov E. V. 54, 157, 187, 212, 225, 227
Shubin A. S. 103, 190
Shugurov V. V. 139
Shults O. V. 244, 262, 277, 278
Shushlebin A. N. 39
Shvaleva R. K. 357
Sidenko V. V. 146
Sidorov K. S. 234
Silantieva I. Yu. 257
Simakin A. V. 269
Simakov F. A. 98
Simakov V. G. 186, 222
Simonenko V. A. 11, 16, 49, 239, 240, 245, 246, 248, 254, 255, 258, 271, 276
Singh P. 254
Sin'kova O. G. 50, 58
Skachkov P. P. 306
Skobelev I. Yu. 145
Skorochkin U. V. 51
Skovorodin D. I. 143
Sladkov A. D. 145
Slepukhin P. A. 99
Smirnov E. B. 53, 64, 93, 167, 187
Smirnov N. A. 219
Smirnov V. N. 52, 53
Sobolev D. V. 177
Sofronov V. N. 122
Sokolov L. V. 39
Sokolov S. S. 224
Solov'eva Yu. V. 213
Soloviev A. A. 145
Solovyev A. S. 272
Soroka A. I. 49
Sorokina T. M. 345
Sorokin I. N. 273
Sorokin S. A. 143, 144
Sosnin O. V. 100
Stadnik A. L. 349
Stankevich A. V. 74, 98, 99, 100
Starodubcev P. V. 51
Starodubtsev M. V. 145
Starodybtsev K. V. 174
Starostenko A. A. 143
Starostenko D. A. 143
Statsenko V. P. 50, 58
Stepushrin S. N. 51
Stikhno C. A. 25
Stolbikov M. Yu. 52, 53
Stolbovsky A. V. 215
Stuchebryukhov I. A. 129
Stupina O. D. 346

Sukharevsky D. I. 146
Sukhova L. G. 100
Sviridov E. V. 57
Swinhoe M. 254
Swinhoe M. T. 272
Syiskov D. V. 143
Synitskiy S. L. 143
Syroleva K. N. 263
Sysoev V. S. 146

T

Tabachenko A. N. 161
Tagirov R. M. 183
Taibinov N. P. 74, 98, 99, 100, 104, 105
T'aktev A. A. 16
Talala K. A. 347
Taluts N. I. 182, 210, 221
Tang Tiegang 55
Tarakanov V. P. 130
Taran S. S. 120
Tarasov A. Yu. 98, 104, 105
Tarzhanov V. I. 68, 101
Taskaev S. Yu. 256, 273
Telyashova E. Z. 348
Temerbekov V. M. 66
Ten K. A. 53, 95
Tereshchenko M. N. 75
Tereshkina I. A. 222, 223
Tikhov A. A. 190
Timofeev I. S. 57
Timofeev I. V. 143
Timofeev O. A. 85
Titov V. M. 95
Tkachenko M. I. 222, 223
Tkachev O. V. 33, 194
Tolmachev T. P. 213
Tolochko B. P. 53, 95, 161
Tomilov U. A. 274
Tomilov Yu. A. 279
Toporkov D. Y. 43
Toporova O. O. 349, 362
Trellue H. 272
Tropin D. A. 102
Trunev Yu. A. 143
Trunin I. R. 222, 223, 224
Tsel'movich V. A. 15
Tsvetkov A. V. 222
Tsygvintsev I. P. 354
Tsyshevsky R. V. 86
Tuch E. V. 318
Tuchkova N. P. 320
Tupitsyn A. V. 78
Turkin V. N. 103, 190
Turmyshev I. S. 114
Tyaktev A. A. 53
Tyupanova O. A. 183

U

Uchaev A. Ya. 219, 224
 Uglov A. S. 253, 268, 275
 Ulyanov O. N. 47, 341, 350
 Urlin E. V. 228
 Ushakova O. V. 352
 Ushkov A. V. 278
 Utkin A. V. 163, 181, 217, 235
 Uvarov S. V. 163, 165

V

Valekzhanin R. V. 169
 Valeyeva O. V. 278
 Valiyev Kh. F. 32
 Vankevich V. A. 139, 140
 Vasiliev A. P. 10
 Vasiliev M. E. 34
 Vasilyev A. A. 161
 Vazhenin A. V. 263
 Vaziev E. M. 331, 333
 Verbitzkaya O. V. 267
 Veretennikov L. M. 67
 Vergeles S. S. 136
 Vicario C. 152
 Vihljaev D. A. 149
 Vikhlyaet D. A. 142
 Vikhornova T. L. 169
 Vlasov A. N. 52
 Vlasova S. S. 294
 Vlasov K. O. 296, 297, 298
 Vlasov V. V. 295, 315
 Vlokh G. V. 280, 281
 Volkova K. A. 116
 Volkova Y. G. 208
 Volkov I. A. 245
 Volkov L. P. 246
 Volkov N. B. 114, 170, 171
 Volkov R. E. 19, 287
 Vorobyova M. A. 69
 Vorobyov A. B. 68
 Voronich I. N. 120, 174
 Voronin A. Yu. 174
 Voronin D. S. 172, 197
 Voronin M. S. 205
 Voropinov A. A. 332
 Vshivkova L. V. 299
 Vshivkov K. V. 299
 Vshivkov V. A. 305
 Vyacheslavov L. N. 143, 161

W

Wang Ruili 285, 286
 Wang Xiang 55
 Wei Cao 63
 Weipeng Yao 112

Y

Yablonskikh T. I. 167
 Yakovenko I. S. 249, 252
 Yakovlev G. A. 42
 Yakovlev I. V. 145
 Yakubov V. B. 23
 Yakushev V. V. 187, 235
 Yalovets A. P. 131
 Yalovets A. P. 347
 Yanilkin A. V. 205, 214
 Yanilkin Yu. V. 50, 58, 349, 362, 363
 Yermolovich Ye. I. 97
 Yevstifeev M. Ye. 97
 Yong Han 63
 Yudina N. V. 110, 289
 Yufa V. N. 57
 Yugov N. T. 161
 Yu Hong 285, 286
 Yunin D. A. 280, 281
 Yunoshev A. S. 76, 93
 Yushkov A. A. 67
 Yusupov D. T. 234

Z

Zababakhin I. E. 9
 Zagryadtskiy F. S. 75
 Zaharov P. P. 326
 Zaikov Yu. P. 264
 Zaitsev A. V. 49
 Zakharov P. P. 307
 Zalyalov A. N. 122
 Zamozdra S. N. 28
 Zamyslov V. E. 306
 Zel'dovich V. I. 187, 225
 Zeldovich V. I. 54, 157, 227
 Zelepugin A. S. 307
 Zelepugin S. A. 307
 Zenkov D. I. 228
 Zhang Chongyu 55
 Zhelezkin D. A. 52
 Zherebtsov A. L. 195
 Zhernokletov M. V. 186
 Zhilyaeva N. S. 33
 Zhmailo V. A. 122
 Zhukov A. N. 187, 235
 Zhulanov V. V. 53, 95, 161
 Zhuravlev Yu. N. 92
 Zijian Lyu 63
 Zima V. P. 79
 Zimenkov A. A. 183
 Zimoglyadova O. A. 85
 Zinchenko A. D. 101
 Zorina I. G. 124
 Zorina O. D. 306
 Zubareva A. N. 163, 217
 Zverev A. S. 78, 86

СОДЕРЖАНИЕ

СЛОВО О ЗАБАБАХИНЕ	3
ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ PLENARY SESSION	
РАБОТЫ Е. И. ЗАБАБАХИНА В ОБЛАСТИ КУМУЛЯЦИИ	9
<i>И. Е. Забабахин</i>	
E. I. ZABABAKHIN'S RESEARCH INTO CUMULATION	9
<i>I. E. Zababakhin</i>	
ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ	10
<i>А. П. Васильев</i>	
NUCLEAREXPLOSIVETECHNOLOGIESINPEACEFULNUCLEAREXPLOSIONS	10
<i>A. P. Vasiliev</i>	
ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ И КУМУЛЯТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ	10
<i>В. А. Симоненко</i>	
HIGH-INTENSIVE AND CUMULATIVE PROCESSES AND PHENOMENA	11
<i>V. A. Simonenko</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ	11
<i>В. Г. Рогачев</i>	
HIGH POWER LASERS APPLICATION FOR THE SUBSTANCES RHEOLOGICAL PROPERTIES RESEARCH	12
<i>V. G. Rogachev</i>	
Секция 1 КОСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЗЕМЛИ, ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ Section 1 SPACE PROTECTION OF THE EARTH, HIGH-INTENSITY PROCESSES AND TURBULENCE	
ЭКСПЕДИЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЙОНА ПАДЕНИЯ УЧУРСКОГО МЕТЕОРИТА	15
<i>И. И. Амелин, В. К. Гусяков, В. А. Цельмович, А. Ю. Куражковский</i>	
EXPEDITION STUDY OF AREA OF BIG METEORITE FALLING IN UCHUR RIVER BASIN	15
<i>I. I. Amelin, V. K. Gusiakov, V. A. Tsel'movich, A. Yu. Kurazhkovsky</i>	
ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА БЕДНЫЕ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫЕ ПЛАМЕНА	16
<i>Н. Б. Аникин, В. А. Симоненко, А. В. Павленко, А. А. Тяктев, И. Л. Бугаенко, Ю. А. Пискунов</i>	
INSTABILITIES EFFECT ON LEAN HYDROGEN-AIR FLAMES	16
<i>N. B. Anikin, V. A. Simonenko, A. V. Pavlenko, A. A. T'aktev, I. L. Bugaenko, Yu. A. Piskunov</i>	
ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМЕТ С ПЛАНЕТАМИНА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ М. А. ЛАВРЕНТЬЕВА	17
<i>А. А. Баренбаум</i>	
STUDY OF MECHANISM INTERACTION OF HIGH-SPEED GALACTIC COMETS WITH PLANETS BASED ON THE HYDRODYNAMIC MA LAVRENTIEV THEORY	17
<i>A. A. Varenbaum</i>	
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ, СКОРОСТНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ТОРНАДО И ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА	18
<i>С. П. Баутин, Р. Е. Волков, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов, О. В. Опрышко</i>	
GEOMETRICAL, SPEED AND ENERGY CHARACTERISTICS IN THE BOTTOM PART OF THE TORNADOES AND TROPICAL CYCLONES	19
<i>S. P. Bautin, R. E. Volkov, I. Yu. Krutova, A. G. Obuhov, O. V. Opryshko</i>	
ОТКЛОНЕНИЕ АСТЕРОИДОВ КИНЕТИЧЕСКИМ СТОЛКНОВЕНИЕМ	19
<i>М. Брук-Саял</i>	

KINETIC IMPACT DEFLECTION OF ASTEROIDS	19
<i>M. Bruck-Syal</i>	
ПРЕДЕЛЬНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ УСКОРЕНИЯ ТЕЛ	20
<i>П. М. Гаврилов</i>	
GRAVITATIONAL ACCELERATION LIMITS OF BODIES	20
<i>P. M. Gavrilov</i>	
ИНИЦИИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРОМ МИКРО-ВЗРЫВ, ЗАКЛЮЧЕННЫЙ ВНУТРИ ПРОЗРАЧНОГО КРИСТАЛЛА: НОВЫЙ МЕТОД ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ, ПРЕВЫШАЮЩИХ 10 МЕГАБАР.	21
<i>Е. Г. Гамалий, А. В. Роде</i>	
LASER-INDUCED MICRO-EXPLOSION CONFINED IN THE BULK OF A TRANSPARENT CRYSTAL: NEW TOOL FOR FORMATION OF NOVEL HIGH-PRESSURE MATERIALS AT MULTI-MEGABAR PRESSURES	22
<i>E. G. Gamały, A. V. Rode</i>	
РЭЛЕЙ-ТЕЙЛОРОВСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЛАЙНЕРОВ	22
<i>С. Ф. Гаранин, А. М. Буйко, В. Б. Якубов</i>	
RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY OF HIGH-VELOCITY CONDENSED-MATTER LINERS	23
<i>S. F. Garanin, A. M. Buiyko, V. B. Yakubov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРНИКОВ	23
<i>А. В. Герасимов</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF PROTECTION OF SPACECRAFT AND GROUND FACILITIES FROM HIGH-SPEED PROJECTILES	24
<i>A. V. Gerasimov</i>	
АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРОЯТНОЙ ОБЛАСТИ ПАДЕНИЯ АСТЕРОИДА АРОПНИС НА ЗЕМЛЮ В 2036 г.	25
<i>В. В. Ивашкин, П. Гуо, К. А. Стихно</i>	
AN ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF THE ASTEROID APOPHIS' POSSIBLE IMPACT AREA ON THE EARTH IN 2036	25
<i>V. V. Ivashkin, P. Guo, C. A. Stikhno</i>	
КАТАЛОГ БОЛИДНЫХ ВЗРЫВОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С 1908 ГОДА	25
<i>И. И. Амелин, В. К. Гусяков</i>	
CATALOG OF BOLIDE EXPLOSIONS IN THE EARTH ATMOSPHERE SINCE 1908.	26
<i>I. I. Amelin, V. K. Gusiakov</i>	
ОТКЛОНЕНИЕ АСТЕРОИДОВ С ПОМОЩЬЮ ЯДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АСТЕРОИДОВ	26
<i>Д. С. Дерборн</i>	
NUCLEAR DEFLECTION AND THE PHYSICAL PROPERTIES OF ASTEROIDS.	27
<i>D. S. Dearborn</i>	
ЧАСТОТА ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ И БОЛИДОВ	27
<i>А. Е. Дудоров, О. В. Еретнова</i>	
FREQUENCY OF METEORITE AND BOLIDE FALLS.	28
<i>A. E. Dudorov, O. V. Eretnova</i>	
НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ДВОЙНЫХ АСТЕРОИДНЫХ СИСТЕМ	28
<i>С. Н. Замоздра</i>	
INSTABILITY OF BINARY ASTEROIDS	28
<i>S. N. Zamozdra</i>	
ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИСУТСТВИИ КОСМИЧЕСКОГО ТЕРМОСТАТА С ТЕХНИЧЕСКИМИ ПРИЛОЖЕНИЯМИ	29
<i>М. Я. Иванов, В. К. Мамаев</i>	

HIGH INTENSIVE PROCESSES AT THE SPACE THERMOSTAT PRESENCE WITH TECHNICAL APPLICATIONS.	29
<i>M. Ja. Ivanov, V. K. Mataev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ.	29
<i>A. B. Ивановский</i>	
STUDY OF PHYSICAL PROCESSES AT HIGH ENERGY DENSITIES WITH THE USE OF EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS.	30
<i>A. V. Ivanovskiy</i>	
АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ЭКСПЕДИЦИИ ЗЕМЛЯ-АПОФИС-ЗЕМЛЯ	30
<i>B. B. Ивашкин, A. Лан</i>	
AN ANALYSIS OF SPACE TRAJECTORIES FOR THE EARTH-ASTEROID-EARTH MISSION	31
<i>V. V. Ivashkin, A. Lang</i>	
НОВАЯ МОДЕЛЬ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА И РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ	31
<i>X. Ф. Валиев, A. H. Крайко</i>	
A NEW MODEL OF THE BIG BANG AND THE UNIVERSE EXPANSION	32
<i>A. N. Kraiko, Kh. F. Valiyev</i>	
НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЛОСКИХ СЛОЕК Е. И. ЗАБАБАХИНА	32
<i>E. A. Kozlov, A. B. Krasильников, Д. П. Кучко, B. H. Ногин, O. B. Ткачев, С. А. Бричиков, H. С. Жилыева, O. H. Никитин</i>	
NEW EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION METHODIC CAPABILITIES TO STUDY ZABABAKHIN'S PLANE STRATIFIED STRUCTURES	33
<i>E. A. Kozlov, A. V. Krasilnikov, D. P. Kuchko, V. N. Nogin, O. V. Tkachev, S. A. Brichikov, N. S. Zhilyaeva, O. A. Nikitin</i>	
ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ШАРОВ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ СЛОЯ ВВ. ВЗРЫВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РАСЧЕТНЫЕ ПРОГНОЗЫ ПО ДВУМЕРНОЙ ПРОГРАММЕ МЕЧ	34
<i>E. A. Kozlov, M. E. Васильев, B. П. Елсуков, П. Е. Кискин, Д. А. Краснослабодцев, B. H. Ногин</i>	
HIGH-RATE STRAIN AND FRACTURE RESPONSE OF STEEL TO AXIALLY SYMMETRIC HE DETONATION: EXPERIMENTAL RESULTS AND PREDICTIONS BY MECH CODE.	34
<i>E. A. Kozlov, M. E. Vasiliev, V. P. Elsuikov, P. E. Kiskin, D. A. Krasnoslabodtsev, V. N. Nogin</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ ВДОЛЬ МИКРОСТРУЙ	34
<i>С. И. Кременко, К. А. Тен</i>	
MEASUREMENT OF MASS DISTRIBUTION ALONG MICROJET.	35
<i>К. А. Тен, S. I. Kremenko</i>	
КУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЛАПСЕ КАВЕРН И СХОЖДЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН И ОБОЛОЧЕК.	35
<i>B. Ф. Куропатенко</i>	
ENERGY CUMULATION IN CAVITY COLLAPSE AND SHOCK AND SHELL CONVERGENCE.	36
<i>V. F. Kuropatenko</i>	
О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ РАСПАДА НА КАПЛИ ТОНКИХ СЛОЕВ РАСПЛАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ	36
<i>С. В. Михайлов, M. B. Лимонова, B. K. Баранов</i>	
DROPLET FRAGMENTATION REGULARITIES IN THIN LAYERS OF METAL MELTS	37
<i>S. V. Mikhailov, M. V. Limonova, V. K. Baranov</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ТОПЛИВ И СВЯЗЬ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ С МАСШТАБАМИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ.	37
<i>E. Л. Лобода, O. B. Матвиенко, M. B. Агафонцев, B. B. Рейно</i>	
THERMOGRAPHY APPLICATION FOR DETERMINING FIELD TEMPERATURE FLAME BURNING OF SOME TYPES OF FUELS AND RELATION PULSATIONS TEMPERATURE SCALE OF TURBULENCE.	38
<i>E. L. Loboda, O. V. Matvienko, M. V. Agafontsev, V. V. Reyno</i>	

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ СЖАТИИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ОБОЛОЧЕК В ОПЫТАХ, ПРОВЕДЕННЫХ НА УСТАНОВКЕ NIF	38
<i>В. А. Лыков, Е. С. Бакуркина, Н. Г. Карлыханов, Г. Н. Рыкованов, Л. В. Соколов, В. Е. Черняков, А. Н. Шушлебин</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF HYDRODYNAMIC INSTABILITIES AND MIXING UNDER COMPRESSION OF GAS-FILLED SHELLS IN EXPERIMENTS ON NIF LASER	39
<i>V. A. Lykov, E. S. Bakurkina, N. G. Karlykhanov, G. N. Rykovanov, L. V. Sokolov, V. E. Chernyakov, A. N. Shushlebin</i>	
О ФОКУСИРОВКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ГАЗЕ	39
<i>В. Ф. Куропатенко, Ф. Г. Магазов, Е. С. Шестаковская</i>	
FOCUSING CYLINDRICALLY SYMMETRIC SHOCK WAVE IN A GAS.	40
<i>V. F. Kuropatenko, F. G. Magazov, E. S. Shestakovskaya</i>	
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ГРОЗОПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ, МОЛНИЕЗАЩИТЫ И ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ	40
<i>Е. А. Мареев, В. С. Сысоев, Ю. В. Шлюгаев</i>	
IMPROVEMENT OF METHODS OF THE PREVENTION OF THE THUNDER-STORM, LIGHTNING PROTECTION AND EXPEDITIOUS MONITORING OF THE DANGEROUS GEOPHYSICAL PHENOMENA	41
<i>E. A. Mareev, V. S. Sysoev, Yu. V. Shlugaev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ЖЕЛЕЗНОМ МЕТЕОРИТЕ ПОСЛЕ УДАРНО-ИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ	42
<i>Р. Ф. Муфтахетдинова, В. И. Гроховский, Е. А. Козлов, И. В. Хомская, Г. А. Яковлев</i>	
STUDY OF DEFORMATION CHANGES AND PHASE TRANSFORMATIONS IN IRON METEORITE AFTER SHOCK-ISENTROPIC LOADING.	42
<i>R. F. Muftakhetdinova, V. I. Grokhovsky, E. A. Kozlov, I. V. Khomskaya, G. A. Yakovlev</i>	
КОЛЛАПС КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА В ТЯЖЕЛОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ЖИДКОСТЯХ	43
<i>Р. И. Нигматулин, А. А. Аганин, М. А. Ильгамов, Д. Ю. Топорков</i>	
COLLAPSE OF CAVITATION BUBBLES IN HEAVY-MOLECULE LIQUIDS	43
<i>R. I. Nigmatulin, A. A. Aganin, M. A. Ilgmatov, D. Y. Toporkov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ БЕЗУДАРНОГО СИЛЬНОГО СЖАТИЯ ОДНОМЕРНЫХ СЛОЕВ ГАЗА С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКЕ	44
<i>С. П. Баутин, Н. С. Новаковский</i>	
NUMERICAL SOLUTION OF THE ONE DIMENSIONAL IDEAL GAS SHOCK-FREE ULTRAHIGH COMPRESSION PROBLEM SUBJECT TO THE CONDITIONS ON CHARACTERISTIC	44
<i>S. P. Bautin, N. S. Novakovskiy</i>	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕДИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ АЛЮМИНИЯ	45
<i>В. В. Погорелко, А. Е. Майер, В. С. Красников</i>	
MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS OF THE HIGH-SPEED COPPER NANOPARTICLES INTERACTION WITH THE ALUMINUM SURFACE	45
<i>V. V. Pogorelko, A. E. Mayer, V. S. Krasnikov</i>	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОРАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ С РАЗНЕСЕННЫМИ ПРЕГРАДАМИ И КУМУЛЯТИВНЫМИ БОЕПРИПАСАМИ	46
<i>П. А. Радченко, С. П. Батуев, А. В. Радченко</i>	
INTERACTION OF THE STRIKING ELEMENTS WITH THE SPACED BARRIERS AND CUMULATIVE AMMUNITION	46
<i>P. A. Radchenko, S. P. Batuev, A. V. Radchenko</i>	
ОБ АНАЛОГИЯХ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ЯВЛЕНИЙ КОНИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ	46
<i>Л. И. Рубина, О. Н. Ульянов</i>	

ABOUT ANALOGIES IN THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PHENOMENA CONICAL REFRACTION AND TURBULENCE ON THE EXAMPLE OF THE CURRENT OF VISCOUS INCOMPRESSIBLE LIQUID.	47
<i>L. I. Rubina, O. N. Ulyanov</i>	
ФРАГМЕНТАЦИЯ ПРЕГРАД ПЛОСКИМИ УДАРНИКАМИ С ОТВЕРСТИЯМИ	47
<i>A. С. Мазур, А. Ю. Григорьев, Г. Г. Савенков</i>	
FRAGMENTATION OF BARRIERS-DRUMS WITH HOLES	47
<i>A. S. Mazur, A. Yu. Grigor'ev, G. G. Savenkov</i>	
РАСЧЕТ ЭВОЛЮЦИИ СХОДЯЩИХСЯ УДАРНЫХ ВОЛН В СТАЛЬНОМ ШАРЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ	48
<i>М. Ю. Сахаров, А. Ю. Ададунов, Д. М. Шалковский</i>	
SIMULATION OF CUMULATIVE SHOCK WAVES EVOLUTION IN STEEL SPHERE UNDER NON-SYMMETRIC INITIATION.	48
<i>М. Ю. Sakharov, A. Yu. Adadurov, D. M. Shalkovsky</i>	
К ИЗУЧЕНИЮ ПЛАНЕТОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АСТЕРОИДОВ И ЯДЕР КОМЕТ	48
<i>А. В. Зайцев, Д. В. Петров, В. Н. Ногин, В. П. Елсуков, Д. А. Краснослободцев, В. А. Симоненко, А. И. Сорока</i>	
TOWARDS THE STUDY OF PLANET PHYSICS PROPERTIES OF ASTEROIDS AND COMET CORES	49
<i>A. V. Zaitsev, D. V. Petrov, V. N. Nogin, V. P. Elsuikov, D. A. Krasnosolobodtsev, V. A. Simonenko, A. I. Soroka</i>	
3D ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА ПРИ ВСПЛЫВАНИИ ТЕРМИКА В АТМОСФЕРЕ	49
<i>О. Г. Синькова, В. П. Стаценко, Ю. В. Янилкин</i>	
3D NUMERICAL SIMULATIONS OF VORTEX RING FORMATION BY A THERMAL PLUME RISING IN THE ATMOSPHERE	50
<i>О. G. Sin'kova, V. P. Statsenko, Yu. V. Yanilkin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ЛУЧ» КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ АСТЕРОИДОПОДОБНЫХ ТЕЛ РАЗНОЙ ФОРМЫ, СОСТАВА, МИКРОСТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	50
<i>А. Ю. Аристова, В. А. Денисова, В. С. Дрожжин, А. А. Краюхин, В. В. Мисько, В. Г. Рогачёв, П. В. Стародубцев, С. Н. Стёпушкин, Ю. В. Скорочкин</i>	
RESEARCH ON LASER AGGREGATE «LUCH» CRITERION OF DESTRUCTION BODY SUCH AN ASTEROID WITH VARIOUS OF IT'S FORMS, COMPOSITION, MICROSTRUCTURE AND STRENGTH BY COERCION ON IT POWERFUL PULSE EMISSION	51
<i>A. U. Aristova, V. A. Denisova, V. S. Drozgin, A. A. Krauhin, V. V. Mis'ko, V. G. Rogachev, P. V. Starodubcev, S. N. Stepushrin, U. V. Skorochkin</i>	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ КВАНТОВ ДО 3,8 МЭВ С ТОНКИМИ (≤ 1 ММ) МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛЕНКАМИ.	51
<i>В. Н. Смирнов, М. Ю. Столбиков, А. Н. Власов, Д. А. Железкин, В. А. Пашенцев, К. В. Халдин</i>	
INTERACTION OF UP TO 3.8 MEV QUANTUM-ENERGY RADIATION WITH THIN METAL FILMS (≤ 1 MM).	52
<i>V. N. Smirnov, M. Yu. Stolbikov, A. N. Vlasov, D. A. Zhelezkin, V. A. Pashentsev, K. V. Khaldin</i>	
ИЗУЧЕНИЕ ВЫБРОСА МИКРОЧАСТИЦ ИЗ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	52
<i>К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, А. О. Кашкаров, И. А. Рубцов, Л. И. Шехтман, В. В. Жуланов, Б. П. Толочко, А. К. Музыря, К. М. Просвирнин, Е. Б. Смирнов, В. Н. Смирнов, М. Ю. Столбиков</i>	
STUDYING THE SYNCHROTRON EMISSION-INDUCED EJECTA OF MICROPARTICLES FROM INHOMOGENUITIES IN SHOCK-LOADED METALS	53
<i>К. А. Ten, E. R. Prueel, A. O. Kashkarov, I. A. Rubtsov, L. I. Shekhtman, V. V. Zhulanov, B. P. Tolochko, A. K. Muzyrya, K. M. Prosvirnin, E. B. Smirnov, V. N. Smirnov, M. Yu. Stolbikov</i>	
ЭВОЛЮЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ ГАЗОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЭЙЛОРА.	53
<i>А. А. Тяктев, А. В. Павленко, Ю. А. Пискунов, И. Л. Бугаенко, С. С. Мокрушин</i>	

DEVELOPMENT OF PERIODIC PERTURBATIONS AT THE GASES INTERFACE UNDER RAYLEIGH-TAILOR INSTABILITY.	53
<i>A. A. Tyaktev, A. V. Pavlenko, Yu. A. Piskunov, I. L. Bugaenko, S. S. Mokrushin</i>	
ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СХОЖДЕНИИ СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ.	54
<i>A. Э. Хейфец, В. И. Зельдович, Н. Ю. Фролова, С. М. Долгих, К. В. Гаан, Е. В. Шорохов</i>	
EFFECTS OF TEMPERATURE AND STRAIN AT CONVERGENCE OF THE CYLINDRICAL STEEL SHELL	54
<i>A. E. Kheifets, V. I. Zeldovich, N. Yu. Frolova, S. M. Dolgikh, K. V. Gaan, E. V. Shorokhov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН И ФОРМИРОВАНИЯ НОЖКИ МАХА В МЕТАЛЛАХ	55
<i>Жан Чонгъю, Ху Хайбо, Ван Сян, Чень Йонтао, Тан Тьеган</i>	
EXPERIMENTAL STUDY ON COLLIDING SHOCK WAVES AND MACH STEM FORMATION IN METALS	55
<i>Hu Haibo, Zhang Chongyu, Wang Xiang, Chen Yongtao, Tang Tiegang</i>	
О СХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНЕ В ГАЗЕ ДЛЯ БОЛЬШИХ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ	55
<i>В. Ф. Куропатенко, Е. С. Шестаковская</i>	
CONVERGENT SHOCK IN A GAS FOR LARGE VALUES OF A SELF-SIMILAR COEFFICIENT	56
<i>V. F. Kuropatenko, E. S. Shestakovskaya</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОСТИ В ЗОНЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ С ВЫСОКИМИ ЧИСЛАМИ РЕЙНОЛЬДСА В ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ	56
<i>A. В. Павленко, О. Е. Шестаченко, Е. В. Свиридов, А. М. Андреев</i>	
RESEARCH INTO HETEROGENEITY IN TURBULENT MIXING ZONE AT HIGH REYNOLDS NUMBERS IN REFLECTED SHOCK WAVE	57
<i>O. E. Shestachenko, A. V. Pavlenko, E. V. Sviridov, A. M. Andreev</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МИШЕНЕЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ СТРУКТУРУ ВЕЩЕСТВА КАМЕННЫХ АСТЕРОИДОВ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ 10^{11} – 10^{13} Вт/см ²	57
<i>И. Н. Бурдонский, К. Л. Губский, А. П. Кузнецов, А. Г. Леонов, К. Н. Макаров, А. М. Рамазанов, И. С. Тимофеев, В. Н. Юфа</i>	
EXPERIMENTAL RESEARCH OF TARGET DESTRUCTION, MODELLING THE STRUCTURE OF MICROMETEORITE SUBSTANCE UNDER THE ACTION OF LASER PULSE WITH INTENSITY 10^{11} – 10^{13} W/cm ²	57
<i>I. N. Burdonskiy, K. L. Gubskiy, A. P. Kuznetsov, A. G. Leonov, K. N. Makarov, A. M. Ramazanov, I. S. Timofeev, V. N. Yufa</i>	
АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ k - ϵ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЗАДАЧИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЛЕГКОГО СЛОЯ	58
<i>Ю. В. Янилкин, О. Г. Синькова, В. П. Стаценко</i>	
ANALYTICAL AND NUMERICAL SOLUTIONS OF THE GRAVITATIONAL LIGHT LAYER MIXING PROBLEM USING THE k - ϵ TURBULENCE MODEL	58
<i>Yu. V. Yanilkin, O. G. Sin'kova, V. P. Statsenko</i>	
МЕТЕОРИТ ЧЕЛЯБИНСК: ТВЕРДОФАЗОВЫЕ УДАРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И УДАРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ	58
<i>Д. Д. Бадюков, А. В. Игнатъев</i>	
THE CHELYABINSK METEORITE: THE SOLID-STATE TRANSFORMATIONS AND IMPACT MELTING	59
<i>D. D. Badyukov, A. V. Ignatiev</i>	

Секция 2

ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Section 2

EXPLOSION AND DETONATION PHENOMENA

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОТКЛИКИ КОМПОНЕНТОВ ПЛАСТИЧНЫХ ВВ (PBX-6)	63
<i>Да-Юань Гао, Цзижань Лю, Вей Као, Лу-Ся Као, Цзин-Мин Ли, Цзинь-Шань Ли, Йон Хань, Кай-Юань Тань</i>	
THERMAL RESPONSES OF PBX-6 EXPLOSIVES COMPONENTS	63
<i>Dayuan Gao, Zijian Lu, Wei Cao, Luoxia Cao, Jingming Li, Jinshan Li, Yong Han, Kaiyuan Tan</i>	
СВОЙСТВА НАНО ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ, ЗАКЛЮЧЕННЫМ В КАПСУЛЫ, ПОГЛОЩАТЬ МИКРОВОЛНЫ	64
<i>Хао Йинь, Цухуа Ду, Пенвань Гень, Маошен Као</i>	
MICROWAVE ABSORPTION PROPERTIES OF THE CARBON-ENCAPSULATED IRON-BASED NANOPARTICLES	64
<i>Hao Yin, Qiuhua Du, Pengwan Chen, Maosheng Cao</i>	
СВЯЗЬ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ С КРИВИЗНОЙ ФРОНТА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ВВ ТАТБ	64
<i>И. А. Ахлюстин, О. В. Костицын, Ю. А. Беленовский, Е. Б. Смирнов, К. М. Просвирнин, К. М. Мирошкин, В. Н. Щербakov, А. Ю. Гармашев</i>	
CONNECTION OF DETONATION VELOCITY WITH DETONATION WAVE FRONT FOR TATB	64
<i>I. A. Akhlyustin, O. V. Kostitsyn, Yu. A. Belenovskiy, E. B. Smirnov, K. M. Prosvirnin, K. M. Miroshkin, V. N. Shcherbakov, A. Yu. Garmashev</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С ОБЛАКОМ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ	65
<i>И. А. Бедарев, А. В. Фёдоров</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF CELLULAR DETONATION WAVE INTERACTION WITH CLOUDS OF INERT PARTICLES	65
<i>I. A. Bedarev, A. V. Fedorov</i>	
РАСЧЕТ ВЫХОДА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В КАНАЛ С РЕАГИРУЮЩИМ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ	66
<i>И. А. Бедарев, В. М. Темербеков, А. В. Фёдоров</i>	
CALCULATION OF DETONATION WAVE OUTPUT TO THE CHANNEL WITH REACTIVE SUPERSONIC FLOW.	66
<i>I. A. Bedarev, V. M. Temerbekov, A. V. Fedorov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКСТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЗРЫВНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНОК СУРЬМЫ, МЕТОДОМ ДИФРАКЦИОННОЙ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ	67
<i>В. Ю. Колосов, А. О. Бокуняева, Л. М. Веретенников, А. А. Юшков</i>	
RESEARCH OF TEXTURES, WHICH FORMS DURING “EXPLOSIVE” ANTIMONY FILMS CRYSTALLISATION BY THE METHOD TEM	67
<i>V. Yu. Kolosov, A. O. Bokunyaeva, L. M. Veretennikov, A. A. Yushkov</i>	
СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ПЛАСТИФИЦИРОВАННОМ ТЭНЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.	68
<i>А. В. Воробьёв, В. И. Таржанов, Е. А. Козлов, А. Н. Еськов, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. Е. Ширококов</i>	
DETONATION WAVE STRUCTURE IN PLASTICIZED PETN ACCORDING TO LASER-INTERFEROMETRIC MEASUREMENTS	68
<i>A. V. Vorobyov, V. I. Tarzhanov, E. A. Kozlov, A. N. Eskov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, A. E. Shirobokov</i>	
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УПРУГИХ И АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТАТБ	69
<i>М. А. Воробьева, А. А. Рыкунов</i>	
TEMPERATURE DEPENDENCE OF TATB ELASTIC AND ACOUSTIC PROPERTIES	69
<i>M. A. Vorobyova, A. A. Rykunov</i>	

ПЕРВИЧНЫЕ МЕХАНИЗМ РАЗЛОЖЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ПЕРХЛОРАТОВ ТЕТРАЗОЛАТОАММИНОВ КОБАЛЬТА(III)	70
<i>V. K. Golubev, M. A. Ilyushin</i>	
PRIMARY DECOMPOSITION MECHANISMS OF SEVERAL EXPLOSIVE TETRAZOLATOAMMINE COBALT(III) PERCHLORATES	70
<i>V. K. Golubev, M. A. Ilyushin</i>	
ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ИНИЦИИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ НЕСКОЛЬКИХ НОВЫХ ПЕРВИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ	71
<i>V. K. Golubev, T. M. Klapötke</i>	
DETONATING PROPERTIES AND INITIATING ACTION OF SEVERAL NEW PRIMARY EXPLOSIVES	72
<i>V. K. Golubev, T. M. Klapötke</i>	
ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ВЗРЫВНОЕ ДЕЙСТВИЕ РЯДА НОВЫХ МОЩНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ	72
<i>V. K. Golubev, T. M. Klapötke</i>	
DETONATING PROPERTIES AND EXPLODING ACTION OF A NUMBER OF NEW POWERFUL EXPLOSIVES.	73
<i>V. K. Golubev, T. M. Klapötke</i>	
АНАЛИЗ РАВНОВЕСНОЙ ОГРАНКИ КРИСТАЛЛОВ ВВ ПО ДАННЫМ СОВМЕЩЕННОГО ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	74
<i>A. V. Stankevich, A. N. Gretsova, B. G. Loboilko, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov</i>	
ANALYZING THE EQUILIBRIUM CUTTING OF EXPLOSIVE CRYSTALS ACCORDING TO THE DATA OF THE COMBINED THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY	74
<i>A. V. Stankevich, A. N. Gretsova, B. G. Loboilko, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov</i>	
ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА МЕТАЛЛОВ	74
<i>O. B. Drennov</i>	
OBLIQUE WAVE IMPACT ON METALS INTERFACE.	75
<i>O. B. Drennov</i>	
О МЕТАНИИ ТРУБОК И ПЛАСТИН ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВВ.	75
<i>V. Ю. Давыдов, А. С. Губин, Ф. С. Загрядцкий, М. Н. Терещенко</i>	
ON DIFFERENT MATERIAL TUBES AND PLATES ACCELERATION, PRODUCED BY EXPLOSIVES	75
<i>V. Y. Davydov, A. S. Goubin, F. S. Zagryadtskiy, M. N. Tereshchenko</i>	
СТРУКТУРА ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ В НИЗКОПЛОТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ.	76
<i>A. П. Ершов, Э. Р. Пруэл, Н. П. Сатонкина, А. О. Кашкаров, И. А. Рубцов, А. С. Юношев, А. В. Пластинин</i>	
DETONATION FRONT STRUCTURE IN LOW DENSITY EXPLOSIVES	76
<i>A. P. Ershov, E. R. Prueel, N. P. Satonkina, A. O. Kashkarov, I. A. Rubtsov, A. S. Yunoshev, A. V. Platinin</i>	
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ БЕНЗОТРИФУРОКСАНА.	77
<i>A. П. Ершов, Н. П. Сатонкина, И. А. Рубцов, Э. Р. Пруэл</i>	
SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRIC CONDUCTIVITY AT THE DETONATION OF BENZOTRIFUROXANE	77
<i>A. P. Ershov, N. P. Satonkina, I. A. Rubtsov, E. R. Prueel</i>	
ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЕТРАНИТРАТА ПЕНТАЭРИТРИТА, СОДЕРЖАЩЕГО НЕПРОЗРАЧНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ, ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ МОЩНОСТИ.	77
<i>A. С. Зверев, А. Ю. Митрофанов, Н. Н. Ильякова, А. В. Ханефт, А. Г. Кречетов, А. В. Тупицын</i>	
INITIATION OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE CONTAINING OPAQUE INCLUSIONS BY VARYING POWER LASER PULSES.	78
<i>A. S. Zverev, A. Y. Mitrofanov, N. N. Ilyakova, A. V. Khanefst, A. G. Krechetov, A. V. Tupitsyn</i>	

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЖИГАНИЯ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ МОДЕЛЬНЫХ ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ	78
<i>Д. П. Касымов, В. П. Зима</i>	
LABORATORY INVESTIGATION OF NATURAL MATERIALS IGNITION BY MODEL HEARTH OF BURNING	79
<i>D. P. Kasymov, V. P. Zima</i>	
ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНЫХ ВВ НА ОСНОВЕ ТЭНА И ГЕКСОГЕНА В МАЛЫХ ДИАМЕТРАХ ПО ДАННЫМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ	79
<i>А. О. Кашкаров, Э. Р. Прууэл, К. А. Тен, И. А. Рубцов, К. М. Просвирнин, А. Н. Киселев, И. Э. Косолопов</i>	
DETONATION CHARACTERISTICS OF PLASTIC EXPLOSIVES BASED ON PETN AND RDX AT SMALL DIAMETERS OF CHARGES ACCORDING TO THE SYNCHROTRON DIAGNOSTICS EXPLOSIVE PROCESSES	80
<i>A. O. Kashkarov, E. R. Prueel, K. A. Ten, I. A. Rubtsov, K. M. Prosvirnin, A. N. Kiselev, I. E. Kosolapov</i>	
ЗАВИСИМОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕВЫХ ЛИТЬЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ ОТ СОДЕРЖАНИЯ И СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ	80
<i>Ю. М. Милёхин, В. Н. Куликов, А. А. Матвеев, А. Н. Осавчук, Н. И. Шишов</i>	
DEPENDENCE OF DETONATION CHARACTERISTICS OF MIXED CAST EXPLOSIVE COMPOSITIONS ON THE CONTENT AND PROPERTIES OF THE COMPONENTS	81
<i>Yu. M. Milekhin, V. N. Kulikov, A. A. Matveev, A. N. Osavchuk, N. I. Shishov</i>	
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛЕ С ЛИНЕЙНЫМ РАСШИРЕНИЕМ	81
<i>А. В. Фёдоров, Т. А. Хмель, С. А. Лаврук</i>	
PROPAGATION OF HETEROGENEOUS DETONATION WAVE IN A LINEAR EXTENSION CHANNEL	82
<i>A. V. Fedorov, T. A. Khmel and S. A. Lavruk</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ТРЕХМЕРНЫХ КАНАЛАХ ЗА СЧЕТ ЭНЕРГИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА	82
<i>В. А. Левин, И. С. Мануйлович, В. В. Марков</i>	
FORMATION OF DETONATION IN THREE-DIMENSIONAL CHANNELS DUE TO THE ENERGY OF A SUPERSONIC FLOW	83
<i>V. A. Levin, I. S. Manuylovich, V. V. Markov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ	83
<i>В. А. Левин, И. С. Мануйлович, В. В. Марков</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL ROTATING DETONATION	84
<i>V. A. Levin, I. S. Manuylovich, V. V. Markov</i>	
МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРОТИЛОВЫХ ЭКВИВАЛЕНТОВ ФУГАСНОГО ВВ И ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ	85
<i>С. И. Карачинский, О. В. Костицын, Б. Г. Лобойко, И. А. Мальгин, С. А. Мартынюк, О. А. Тимофеев</i>	
METHODS AND RESULTS OF DETERMINING TNT EQUIVALENTS OF HIGH EXPLOSIVES AND EXPLOSIVE COMPOSITIONS FOR EXPLOSION WELDING OF METALS	85
<i>S. I. Karachinsky, O. V. Kostitsyn, B. G. Loboiko, I. A. Malgin, S. A. Martynuk, O. A. Timofeev</i>	
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ВВ МАЛОГО РАЗМЕРА	85
<i>О. А. Зимоглядова, Л. А. Мерзиевский</i>	
NUMERICAL ANALYSIS FOR DETONATION CHARACTERISTICS OF SMALL-SIZE HIGH EXPLOSIVES	85
<i>O. A. Zimoglyadova, L. A. Merzhievsky</i>	
РОЛЬ РЕАКЦИИ ОТРЫВА ВОДОРОДА В ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ	86
<i>А. Ю. Митрофанов, А. С. Зверев, Н. Н. Ильякова, С. В. Лузгарев, М. В. Костянко, Г. Г. Гарифзянова, Р. В. Цышевский, М. М. Кукля</i>	
THE ROLE OF HYDROGEN ABSTRACTION REACTION IN PHOTOCATALYTIC DECOMPOSITION OF HIGH ENERGY DENSITY MATERIALS	86
<i>A. Y. Mitrofanov, A. S. Zverev, N. N. Ilyakova, S. V. Luzgarev, M. V. Kostyanko, G. G. Garifzianova, R. V. Tsyshevsky, M. M. Kuklja</i>	

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ФОТОНОВ ЧЕРЕЗ ПОРОШКОВОЕ ВЕЩЕСТВО	87
<i>А. Э. Муханов, Д. В. Rogozkin</i>	
DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF PROPAGATION OF OPTICAL PHOTONS THROUGH A POWDER MEDIUM	87
<i>A. E. Mukhanov, D. V. Rogozkin</i>	
СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВВ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ И УГЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОФОТОХРОНОГРАФА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	88
<i>Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Н. В. Нелюбина, И. Ю. Лисков, Г. М. Белокуров</i>	
SPECTRAL AND KINETIC CHARACTERISTICS OF THE EXPLOSIVE EXPANSION OF COMPOSITES BASED ON ВВ WITH INCLUSIONS OF ULTRAFINE PARTICLES OF METALS AND COAL, USING SPECTRAL STREAK CAMERA UNDER LASER IRRADIATION	88
<i>B. P. Aduev, D. R. Nurmukhametov, N. V. Neljubina, I. Yu. Liskov, G. M. Belokurov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ РЕЧНОГО ЛЬДА	88
<i>М. Ю. Орлов, Г. Н. Богомолов, Ю. Н. Орлова</i>	
RESEARCH OF RIVER ICE AT EXPLOSIVE LOADS	89
<i>М. Ю. Orlov, G. N. Bogomolov, Yu. N. Orlova</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ С УЧЕТОМ ДЕТАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ	89
<i>Ю. М. Ковалев, Е. Е. Пигасов</i>	
MATHEMATICAL MODELING OF SHOCK-WAVE PROCESSES IN MULTICOMPONENT MEDIA, WITH CONSIDERING THE DETAILED KINETIC MECHANISMS	90
<i>Yu. M. Kovalev, E. E. Pigasov</i>	
ИМПУЛЬСНОЕ ФОТОВОЗБУЖДЕНИЕ НИТРОПРОИЗВОДНЫХ АЗОТИСТЫХ ГЕТЕРОЦИКЛОВ	90
<i>А. И. Поняев, Я. С. Глухова</i>	
FLASH PHOTOEXCITATION OF NITRO DERIVATIVES OF NITROGEN HETEROCYCLES	91
<i>A. I. Ponyaev and Y. S. Glukhova</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ	91
<i>Т. Л. Празян, Ю. Н. Журавлев</i>	
INVESTIGATION OF DETONATION PROPERTIES OF EXPLOSIVES BY THE DENSITY FUNCTIONAL THEORY METHODS	92
<i>T. L. Prazyan, Yu. N. Zhuravlev</i>	
ПОВОРОТ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ОБРАЗЦАХ ИЗ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ	92
<i>К. М. Просвирнин, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Ю. А. Беленовский, Е. Б. Смирнов, К. М. Мирошкин, И. А. Ахлюстин, А. Н. Киселёв, И. Э. Косолапов</i>	
ROTATION OF DETONATION WAVE IN LOW SENSITIVITY HE	93
<i>K. M. Prosvirnin, B. G. Loboiko, O. V. Kostitsyn, Yu. A. Belenovskiy, E. B. Smirnov, K. M. Miroshkin, I. A. Akhlyustin, A. N. Kiselev, I. E. Kosolapov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ С ПОЛИМЕРНЫМИ МИКРОБАЛЛОНАМИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПЛОТНОСТЕЙ	93
<i>А. С. Юношев, А. В. Пластинин, С. И. Рафейчик</i>	
INVESTIGATION OF DETONATION VELOCITY OF EMULSION EXPLOSIVES WITH POLYMERIC MICROBALLOONS IN WIDE RANGE OF INITIAL DENSITY	93
<i>A. S. Yunoshev, A. V. Plastinin, S. I. Rafeichik</i>	
КОНДЕНСАЦИЯ УГЛЕРОДА ПРИ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ТГ РАЗНОГО ДИАМЕТРА	94
<i>И. А. Рубцов, К. А. Тен, В. М. Титов, Э. Р. Прууэл, А. О. Кашкаров, Б. П. Толочко, В. В. Жуланов, Л. И. Шехтман</i>	

CARBON CONDENSATION DURING DETONATION OF TNT/RDX EXPLOSIVE OF VARIOUS DIAMETERS	95
<i>I. A. Rubtsov, K. A. Ten, V. M. Titov, E. R. Pruuell, A. O. Kashkarov, B. P. Tolochko, V. V. Zhulanov, L. I. Shekhtman</i>	
ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ИНЕРТНЫМИ ДОБАВКАМИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ	95
<i>И. А. Оськин, В. А. Брагин, А. А. Лукин, В. А. Морозов, Г. Г. Савенков</i>	
THE INITIATION OF POWERFUL COMPOSITIONS WITH NANOSIZED INERT ADDITIVES BY HIGH-VOLTAGE ELECTRIC DISCHARGE	96
<i>I. A. Oskin, V. A. Bragin, A. A. Lukin, V. A. Morozov, G. G. Savenkov</i>	
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРИ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ.	96
<i>Н. П. Сатонкина</i>	
THE ELECTRIC CONDUCTIVITY AT THE DETONATION OF CONDENSED EXPLOSIVES	97
<i>N. P. Satonkina</i>	
КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ЛИ-ТАРВЕРА ДЛЯ ПЛАСТИЗОЛЬНОГО ВВ ОЛА-8Т	97
<i>А. Б. Севастьянов, Е. И. Ермолович, М. Е. Евстифеев, В. Г. Кожевников, А. И. Михайлюкова</i>	
LEE- TARVER EQUATION FOR THE PLASTISOL EXPLOSIVE OF OLA-8T	97
<i>A. B. Sevastyanov, Ye. I. Yermolovich, M. Ye. Yevstifeev, V. G. Kozhevnikov, A. I. Mikhaylukova</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА.	97
<i>Ф. А. Симаков, А. Ю. Гармашев, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов, И. В. Чемагина, А. Ю. Тарасов, А. Н. Грецова</i>	
STUDY OF PHYSICAL-AND-CHEMICAL PROPERTIES OF INDUSTRIALLY MANUFACTURED 2,4-DINITRO ANISOL	98
<i>F. A. Simakov, A. Yu. Garmashev, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov, I. V. Chemagina, A. Yu. Tarasov, A. N. Gretsova</i>	
АНИЗОТРОПНОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ БТФ ОТ 150 ДО 450 К ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ	98
<i>А. В. Станкевич, А. Н. Грецова, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов</i>	
ANISOTROPIC THERMAL EXPANSION OF BTF CRYSTALS AT 150–450 K UNDER ATMOSPHERIC PRESSURE	98
<i>A. V. Stankevich, A. N. Gretsova, B. G. Loboilko, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov</i>	
СОВМЕЩЕННЫЙ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ Т ЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ТАТБ	99
<i>А. В. Станкевич, П. А. Слепухин, Б. Г. Лобойко, Г. Л. Русинов, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов</i>	
COMBINED X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF TATB-CRYSTALS THERMAL EXPANSION.	99
<i>A. V. Stankevich, P. A. Slepukhin, B. G. Loboilko, G. L. Rusinov, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ	99
<i>А. С. Гладков, Г. П. Куценко, С. П. Лунеев, Л. Г. Сухова, О. В. Соснин, С. Э. Межеричский</i>	
INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF CURING PLASTIC EXPLOSIVE COMPOSITIONS.	100
<i>A. S. Gladkov, G. P. Kutsenko, S. P. Luneev, L. G. Sukhova, O. V. Sosnin, S. E. Mezheritsky</i>	
КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВВ.	100
<i>А. В. Станкевич, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов</i>	
CRYSTALLOGRAPHIC MODELS AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF INDIVIDUAL EXPLOSIVES.	100
<i>A. V. Stankevich, B. G. Loboilko, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov</i>	
ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ НИЗКОПЛОТНЫХ СМЕСЕЙ ТЭНА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ	101
<i>В. И. Таржанов, В. И. Сдобнов, А. Д. Зинченко, А. И. Погребов</i>	
LASER INITIATION OF LOW-DENSITY PETN MIXED WITH METAL ADDITIVES	101
<i>V. I. Tarzhanov, V. I. Sdobnov, A. D. Zinchenko, A. I. Pogrebov</i>	
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСЯХ ВОДОРОДА, МЕТАНА И СИЛАНА С ОКИСЛИТЕЛЕМ ИНЕРТНЫМИ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦАМИ	101
<i>Д. А. Тропин, А. В. Фёдоров</i>	

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF DETONATION SUPPRESSION IN MIXTURES OF HYDROGEN, METHANE AND SILANE WITH OXIDIZER BY INERT MICRO- AND NANOPARTICLES	102
<i>D. A. Tropin, A. V. Fedorov</i>	
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАКЕТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО РЕГИСТРАТОРА ДЛЯ ФОТОХРОНОГРАФА С ЗЕРКАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКОЙ	102
<i>В. П. Андрианов, О. Н. Дулин, В. Г. Каменев, П. В. Кубасов, В. М. Кузин, В. Н. Туркин, А. С. Шубин</i>	
THE RESULTS OF CREATING EXPERIMENTAL MODEL OF DIGITAL RECORDER FOR ROTATING MIRROR CAMERAS	103
<i>V. P. Andrianov, O. N. Dulin, V. G. Kamenev, P. V. Kubasov, V. M. Kuzin, V. N. Turkin, A. S. Shubin</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С ОБЛАКОМ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ	103
<i>И. А. Бедарев, А. В. Фёдоров</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF CELLULAR DETONATION WAVE INTERACTION WITH CLOUDS OF INERT PARTICLES	103
<i>I. A. Bedarev, A. V. Fedorov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕЙ ТНТ И ДНА	104
<i>И. В. Чемагина, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов, Т. В. Антипова, И. А. Баталова, А. Ю. Тарасов, Н. В. Рачкова, Ю. А. Шахторин</i>	
STUDYING THERMAL CHARACTERISTICS OF TNT–DNA MIXTURES	104
<i>I. V. Chemagina, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov, T. V. Antipova, I. A. Batalova, A. Yu. Tarasov, N. V. Rachkova, Yu. A. Shakhtorin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРИДОВ МЕТАЛЛОВ	105
<i>И. В. Чемагина, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов, Т. В. Антипова, А. Ю. Тарасов, А. Н. Грецова, Ю. А. Шахторин</i>	
STUDYING CHARACTERISTICS OF METAL HYDRIDES	105
<i>I. V. Chemagina, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov, T. V. Antipova, A. Yu. Tarasov, A. N. Gretsova, Yu. A. Shakhtorin</i>	
Секция 3	
ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ	
Section 3	
DENSE PLASMA PHENOMENA	
РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАНО-ПЛАЗМЕННАЯ ФОТОНИКА	109
<i>А. А. Андреев</i>	
RELATIVISTIC LASER NANO-PLASMA PHOTONICS	109
<i>A. A. Andreev</i>	
ИЗЛУЧЕНИЕ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ МОЩНЫХ КОРОТКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В МАССИВЕ НЕВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ НАНОТРУБОК	110
<i>Н. Р. Садыков, Н. В. Юдина, А. В. Апороски</i>	
VAVILOV–CHERENKOV RADIATION AT THE PROPAGATION OF THE SHORT ELECTRIC PULSES IN THE ARRAY OF NONINTERACTING NANOTUBES	110
<i>N. R. Sadykov, N. V. Yudina, A. V. Aporoski</i>	
О ЧИСЛЕННЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЯХ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ РАДИАТИВНО ОХЛАЖДАЮЩИХСЯ УДАРНЫХ ВОЛН	111
<i>Д. А. Бадьин, С. И. Глазырин, К. В. Мануковский, С. И. Блинные</i>	
ON PHYSICAL AND NUMERICAL INSTABILITIES ARISING IN SIMULATIONS OF NON-STATIONARY RADIATIVELY COOLING SHOCKS	111
<i>D. A. Badjin, S. I. Glazyrin, K. V. Manukovskiy, S. I. Blinnikov</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОГО РЕЖИМА УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ С ПОМОЩЬЮ СОСТАВНОЙ МИШЕНИ	112
<i>Байвэнь Ли и Вэйпэн Яо</i>	

OPTIMIZATION OF THE COMBINED PROTON ACCELERATION REGIME BY USING A TARGET COMPOSITION SCHEME	112
<i>Baiwen Li and Weipeng Yao</i>	
ТОРМОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ В ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЕ	113
<i>Бинь Хэ и ЦзяньГо Ван</i>	
STOPPING POWER FOR ENERGETIC IONS IN HOT PLASMAS	113
<i>Bin He and JianGuo Wang</i>	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ СИЛЬНО НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ	114
<i>С. В. Барахвостов, Н. Б. Волков, К. А. Нагаев, А. И. Липчак, И. С. Турмышев</i>	
CHARACTERISTICS OF PICOSECOND ELECTRON BEAM TO EXCITE OF HIGH NON-EQILIBRIUM STATES IN METAL SOLID-STATE-DENSITY PLASMA.	114
<i>S. V. Barahvostov, N. B. Volkov, K. A. Nagaev, A. I. Lipchak, I. S. Turmyshev</i>	
АНОМАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОГЛОЩЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	115
<i>С. И. Глазырин, А. В. Брантов, С. А. Карпов, И. Ф. Потапенко, В. Ю. Быченков</i>	
ANOMALOUS EFFECTS IN LASER ABSORPTION	115
<i>S. I. Glazyrin, A. V. Brantov, S. A. Karpov, I. F. Potapenko, V. Yu. Bychenkov</i>	
ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 2D МОДЕЛИРОВАНИЯ	115
<i>А. С. Гнутов, С. А. Донцов, К. А. Волкова</i>	
MAGNETIC FIELD GENERATION IN HIGH-ENERGY LASER BEAM PLASMA AS A RESULT OF 2D SIMULATION	116
<i>A. S. Gnutov, S. A. Dontsov, K. A. Volkova</i>	
УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ИНТЕНСИВНЫМ «МЕДЛЕННЫМ» СВЕТОМ	116
<i>Е. А. Говрас, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков</i>	
ION ACCELERATION BY INTENSE «SLOW» LIGHT.	117
<i>Е. А. Govras, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРЕНИЯ ПЛАСТИН В СХЕМЕ С ГИТ НА ОСНОВЕ КОНДЕНСАТОРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ	117
<i>А. Н. Григорьев, А. В. Павленко, Е. И. Карнаухов, С. С. Мокрушин, М. А. Борщевский</i>	
OPTIMIZATION OF ELECTROMAGNETIC ACCELERATION OF PLATES IN THE CIRCUIT WITH THE SURGE-CURRENT GENERATOR BASED ON THE CONDENSER-TYPE ENERGY STORAGE	118
<i>A. N. Grigoriev, A. V. Pavlenko, E. I. Karnaukhov, S. S. Mokrushin, M. A. Borschevsky</i>	
СИЛОВЫЕ И БЕССИЛОВЫЕ КОНФИГУРАЦИИ В ИМПЕДАНСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ 3D АСИММЕТРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ДИФФУЗИОННОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ	118
<i>В. М. Губченко</i>	
FORCED AND FORCELESS CONFIGURATIONS IN THE IMPEDANCE CHARACTERISTICS OF THE 3D ASYMMETRIC ELECTRON DIFFUSION MAGNETIC RECONNECTION REGION	119
<i>V. M. Gubchenko</i>	
ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА НА ND СТЕКЛЕ С ПРЕДЕЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА И В ИНТЕРЕСАХ ЛТС	119
<i>С. А. Белков, И. Н. Воронич, С. Г. Гаранин, К. В. Губский, В. Н. Деркач, А. П. Кузнецов</i>	
Nd-GLASS LASER FACILITY WITH THRESHOLD RADIATION ENERGY DENSITY CHARACTERISTICS FOR THE PURSUANCE OF THE RESEARCH INEXTREME STATES OF MATTER AND IN THE INTERESTS OF LASER THERMONUCLEAR SYNTHESIS	120
<i>S. A. Belkov, I. N. Voronich, S. G. Garanin, K. V. Gubsky, V. N. Derkach, A. P. Kuznetsov</i>	

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ДИНАМИКИ НАГРЕВА ПОДКРИТИЧЕСКОЙ МИШЕНИ «ГАЗОВЫЙ МЕШОК»	120
<i>Д. М. Доброцветов, А. Н. Мунтян, С. И. Петров, Н. М. Романова, С. С. Таран</i>	
METHOD OF UNDERDENSE «GAS BAG» TARGET HEATING DYNAMICS REGISTRATION	120
<i>D. M. Dobrotsvetov, A. N. Muntyan, S. I. Petrov, N. M. Romanova, S. S. Taran</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕНОСА БЫСТРЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ГОРЕНИЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ	121
<i>Г. В. Долголева</i>	
INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FAST CHARGED PARTICLES TRANSFER TO THE BURNING OF THERMONUCLEAR TARGETS	121
<i>G. V. Dolgoleva</i>	
ВЛИЯНИЕ ДЖОУЛЕВА РАЗОГРЕВА НА ДИФФУЗИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМУ	121
<i>М. Ю. Егужова, В. А. Жмайло, Е. А. Новикова, В. Н. Софронов</i>	
INFLUENCE OF JOOULE HEATING ON MAGNETIC FIELD DIFFUSION INTO PLASMA	122
<i>М. Yu. Eguzhova, V. A. Zhmailo, E. A. Novikova, V. N. Sofronov</i>	
РАСЧЕТЫ ДВИЖЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ	122
<i>Е. В. Грошев, В. А. Жмайло, А. Н. Залялов, Н. В. Иванов, А. Е. Широков</i>	
CALCULATIONS OF RELATIVISTIC ELECTRONS MOTION IN MAGNETIC FIELD OF THE EARTH	122
<i>E. V. Groshev, V. A. Zhmailo, A. N. Zalyalov, N. V. Ivanov, A. E. Shirokov</i>	
УЧЕТ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ФОРМУЛЕ КУБО-ГРИНВУДА ДЛЯ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ МЕТАЛЛА	123
<i>С. В. Ивлиев</i>	
ELECTRON-ELECTRON INTERACTION IN KUBO-GREENWOOD APPROACH FOR THE CONDUCTIVITY OF METAL	123
<i>S. V. Ivliev</i>	
КАПЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПЛОТНОГО ГОРЯЧЕГО ВЕЩЕСТВА	124
<i>И. Л. Иосилевский, А. Ю. Чигвинцев, И. Г. Зорина</i>	
LIQUID DROP MODEL AND PHASE TRANSITIONS IN HOT DENSE MATTER	124
<i>I. L. Iosilevskiy, A. Yu. Chigvintsev, I. G. Zorina</i>	
ОБРАЗОВАНИЕ МИКРОПУЗЫРЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА БИОЖИДКОСТИ.	125
<i>А. Е. Дубинов, Ю. П. Кожаева</i>	
MICROBUBBLES APPEARANCE UNDER THE INFLUENCE OF NANOSECOND DISCHARGES OF AIR PRESSURE ON THE BIO LIQUID	125
<i>A. E. Dubinov, J. P. Kozhayeva</i>	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОТОКАХ ИОНИЗУЮЩЕГОСЯ ГАЗА В КАНАЛЕ ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ	125
<i>А. Н. Козлов, В. С. Коновалов</i>	
NUMERICAL RESEARCH OF RADIATION TRANSPORT IN THE IONIZING GAS FLOWS IN THE CHANNEL OF PLASMA ACCELERATOR	126
<i>A. N. Kozlov, V. S. Kononov</i>	
ПЕРЕДАЧА ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯТОРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ПО СХЕМЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА	126
<i>В. И. Богомолов, Ю. В. Дмитриев, Н. Г. Игнатъев, К. Е. Коротков, П. С. Крапива, И. Н. Москаленко, В. А. Москвичев, С. С. Писков</i>	
TRANSMITTING OF BROADBAND ANALOG WAVEFORMS USING MACH-ZEHNDER MODULATORS	127
<i>V. Bogomolov, Yu. Dmitriev, N. Ignatiev, K. Korotkov, P. Krapiva, I. Moskalenko, V. Moskvichev, S. Piskov</i>	

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ УЛЬТРАТОНКОЙ НИЗКОПЛОТНОЙ МИШЕНИ	127
<i>О. Г. Котова, И. В. Глазырин, К. С. Назаров</i>	
MODELING OF LASER ACCELERATION OF ELECTRONS FROM ULTRATHIN LOWDENCE TARGET	128
<i>O. G. Kotova, I. V. Glazyrin, K. S. Nazarov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АБЛЯЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «КАМЕРТОН-Т»	128
<i>И. К. Красюк, А. Ю. Семенов, И. А. Стучебрюхов, К. В. Хищенко, С. Ю. Гуськов, Н. Н. Демченко, А. А. Рупасов</i>	
EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEPENDENCE OF ABLATION PRESSURE UPON THE RADIATION INTENSITY ON THE LASER INSTALLATION «KAMERTON-T»	129
<i>I. K. Krasnyuk, A. Yu. Semenov, I. A. Stuchebryukhov, K. V. Khishchenko, S. Y. Guskov, N. N. Demchenko, A. A. Rupasov</i>	
ОБРАЗОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ОБЛАКА ТИПА NGC 6188 В ХОДЕ РАЗВИТИЯ МГД ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ	129
<i>И. М. Куликов</i>	
MODELING OF MOLECULAR CLOUD FORMATION LIKE A NGC 6188 THROUGH MHD TURBULENCE EVOLUTION OF INTERSTELLAR MEDIUM	129
<i>I. M. Kulikov</i>	
ОСЦИЛЛИРУЮЩАЯ ПЛАЗМА: ОТ СИЛЬНОЙ НЕИДЕАЛЬНОСТИ К ТЕМПЕРАТУРАМ ПЛАВЛЕНИЯ.	130
<i>Ю. К. Куриленков, В. П. Тараканов, С. Ю. Гуськов, А. В. Огинов</i>	
OSCILLATING PLASMAS: FROM STRONG NONIDEALITY TO FUSION TEMPERATURES.	130
<i>Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Guskov, A. V. Oginov</i>	
ЭРОЗИЯ МАТЕРИАЛА МИШЕНИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ.	131
<i>А. Я. Лейви, А. П. Яловец</i>	
THE EROSION OF THE TARGET MATERIAL WHEN EXPOSED TO INTENSE PLASMA FLOWS	131
<i>A. Ya. Leyvi, A. P. Yalovets</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОТНОГО ИОНИЗОВАННОГО ВЕЩЕСТВА	132
<i>П. А. Лобода, А. А. Овечкин, А. Л. Фальков, А. С. Королёв, А. А. Шадрин, В. В. Попова, М. Е. Березовская</i>	
MODELING OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF DENSE IONIZED MATTER	132
<i>P. A. Loboda, A. A. Ovechkin, A. L. Falkov, A. S. Korolev, A. A. Shadrin, V. V. Popova, M. E. Berezovskaya</i>	
ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНИЦИИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ	132
<i>М. Г. Лобок, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков</i>	
THREE DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODELING OF LASER INITIATED GAMMA SOURCE.	133
<i>M. G. Lobok, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ С УЧЕТОМ ГЕНЕРАЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОЦЕССАХ ДВУХПЛАЗМОННОГО РАСПАДА И ВЫНУЖДЕННОГО РАМАНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ	133
<i>В. А. Лыков, Е. С. Бакуркина, Н. Г. Карлыханов, В. Е. Черняков, Е. В. Щёголев</i>	
SIMULATION OF FUSION TARGETS WITH CONSIDERATION FOR FAST ELECTRONS GENERATION IN PROCESSES OF TWO-PLASMON DECAY AND STIMULATED RAMAN SCATTERING OF LASER RADIATION IN PLASMA	134
<i>V. A. Lykov, E. S. Bakurkina, N. G. Karlykhanov, V. E. Chernyakov, E. V. Shchegolev</i>	
ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕРХКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С ПРОТЯЖЕННОЙ ПРЕПЛАЗМОЙ	134
<i>К. С. Назаров, И. В. Глазырин, О. Г. Котова</i>	
GENERATION OF THE BUNCH OF ELECTRONS AT INTERACTION OF THE ULTRASHORT LASER PULSE WITH LONG PREPLASMA.	135
<i>K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin, O. G. Kotova</i>	

РАСЧЕТЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ И СРЕДНИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИОНИЗАЦИОННОГО РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ	135
<i>М. Е. Березовская, С. В. Кольчугин, А. С. Королёв, П. А. Лобода, А. А. Овечкин, В. В. Попова, А. А. Шадрин</i>	
OPACITY CALCULATIONS BASED ON THE CHEMICAL-PICTURE MODEL OF PLASMAS	136
<i>М. Е. Berezovskaya, S. V. Kolchugin, A. S. Korolev, P. A. Loboda, A. A. Ovechkin, V. V. Popova, A. A. Shadrin</i>	
ОТЛИЧИЕ СТАТИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ОТ ГАУССОВА ВИДА	136
<i>Л. Л. Огородников, С. С. Вергелес, В. В. Лебедев, И. В. Колоколов</i>	
THE DIFFERENCE OF THE STATISTICS OF RANDOM FIBER LASER EMISSION FROM GAUSSIAN ONE	136
<i>L. L. Ogorodnikov, S. S. Vergeles, V. V. Lebedev, I. V. Kolokolov</i>	
ДИФРАКТАЛЫ НА ЧАСТОТЕ 36 ГГЦ, НАБЛЮДАЕМЫЕ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ РАССЕЙЯНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ФРАКТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, И ВОЛНОВЫЕ КАТАСТРОФЫ ВО ФРАКТАЛЬНЫХ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ	137
<i>А. А. Потанов</i>	
DIFFRACTALS AT FREQUENCY 36 GHZ WHICH ARE OBSERVED AT RADAR SCATTERING OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE BY A FRACTAL SURFACE AND WAVE CATASTOPHES IN FRACTAL RANDOMLY INHOMOGENEOUS MEDIA	138
<i>А. А. Potanov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ВЗРЫВЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ПРОВОДНИКОВ В БЫСТРОНАРАСТАЮЩИХ МЕГАГАУССНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ	138
<i>Н. А. Лабеецкая, В. А. Ванькевич, И. М. Дацко, В. И. Орешкин, Д. В. Рыбка, С. А. Чайковский, В. В. Шугуров</i>	
THE PLASMA FORMATION DYNAMICS RESEARCH UNDER SURFACE EXPLOSION OF DOUBLE-LAYER CONDUCTORS IN A FAST-RISING MEGAGAUSS MAGNETIC FIELDS.	139
<i>N. A. Labetskaya, V. A. Vankevich, I. M. Datsko, V. I. Oreshkin, D. V. Rybka, S. A. Chaikovsky, V. V. Shugurov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПЛАЗМЫ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ	139
<i>Н. А. Лабеецкая, В. А. Ванькевич, И. М. Дацко, В. И. Орешкин, Д. В. Рыбка¹, С. А. Чайковский</i>	
INVESTIGATION THE POSSIBILITY OF SUPPRESSING THE DEVELOPMENT OF LARGE-SCALE PLASMA INSTABILITIES IN STRONG MAGNETIC FIELDS	140
<i>N. A. Labetskaya, V. A. Vankevich, I. M. Datsko, V. I. Oreshkin, D. V. Rybka, S. A. Chaikovsky</i>	
ДИОКСИД КРЕМНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОГО ПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА: АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛОВ	140
<i>А. А. Рыкунов</i>	
WARM DENSE SILICA: ANALYSIS OF PROBLEMS AND APPLICABILITY LIMITS FOR THE PSEUDOPOTENTIAL APPROACH	141
<i>А. А. Рыкунов</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРЕДЫМПУЛЬСОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ МИШЕНЯМИ	141
<i>К. В. Сафронов, С. А. Горохов, В. А. Флегентов, Д. С. Гаврилов, Е. А. Лобода, А. Г. Какшин, Д. А. Вихляев</i>	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PREPULSE IMPACT ON X-RAYS GENERATION EFFECTIVENESS AT INTERACTION OF HIGH INTENSE LASER PULSES WITH SOLID TARGETS	142
<i>К. V. Safronov, S. A. Gorokhov, V. A. Flegentov, D. S. Gavrilov, E. A. Loboda, A. G. Kakshin, D. A. Vikhlyayev</i>	
РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МИШЕННОЙ ПЛАЗМЫ НА ФОКУСИРОВКУ ПУЧКА ЛИУ	142
<i>Д. И. Сковородин, Ю. А. Трунев, В. В. Куркучеков, С. С. Попов, В. В. Данилов, А. В. Бурдаков, В. Т. Астрелин, А. С. Аракчеев, М. Г. Атлуханов, Д. А. Старостенко, А. А. Старостенко, Я. В. Куленко, Л. Н. Вячеславов, С. Л. Сеницкий, И. В. Тимофеев, А. Е. Кузьменко, О. А. Никитин, П. А. Колесников, Е. С. Ли, А. Р. Ахметов, С. Д. Хренков, Д. В. Сысков, В. Ю. Политов, В. Д. Легоньков</i>	

THE ORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF TARGET PLASMA INFLUENCE ON ELECTRON BEAM OF LIA	143
<i>D. I. Skovorodin, Yu. A. Trunev, V. V. Kurkuchekov, S. S. Popov, V. V. Danilov, A. V. Burdakov, V. T. Astrelin, A. S. Arakcheev, M. G. Atlukhanov, D. A. Starostenko, A. A. Starostenko, Ya. V. Kulenko, L. N. Vyacheslavov, S. L. Synitskiy, I. V. Timofeev, A. E. Kuzmenko, O. A. Nikitin, P. A. Kolesnikov, E. S. Li, A. R. Akhmetov, S. D. Khrenkov, D. V. Syiskov, V. Yu. Politov, V. D. Legonkov</i>	
СЖАТИЕ ФОЛЬГОВЫХ ЛАЙНЕРОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА	143
<i>C. A. Sorokin</i>	
SMALL-DIAMETER FOIL-LINER IMPLOSIONS	143
<i>S. A. Sorokin</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЗАКОРОЧЕННЫМ НАБОРОМ РАДИАЛЬНЫХ ПРОВОЛОЧЕК СТЕРЖНЕВЫМ ПИНЧ-ДИОДОМ НА ГЕНЕРАТОРЕ МИГ	144
<i>C. A. Sorokin</i>	
EXPERIMENTS WITH A WIRE-ARRAY-SHORTED ROD-PINCH DIODE ON THE MIG GENERATOR	144
<i>S. A. Sorokin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ И УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ НА СУБПЕТАВАТТНОМ ЛАЗЕРНОМ СТЕНДЕ PEARL	144
<i>A. A. Soloviev, K. F. Burdonov, A. A. Ereemeev, V. N. Ginzburg, E. A. Khazanov, A. A. Kochetkov, A. A. Kuzmin, I. A. Shaykin, A. A. Shaykin, I. V. Yakovlev, A. D. Sladkov, A. V. Korzhimanov, G. Revet, S. N. Chen, S. A. Pikuz, I. Yu. Skobelev, S. N. Ryazantsev, M. A. Alkhimova, E. D. Filippov, T. A. Pikuz, A. Ciardi, B. Khlar, M. B. Starodubtsev, J. Fuchs</i>	
PLASMA PHYSICS AND PARTICLE ACCELERATION STUDIES AT THE PEARL LASER FACILITY	145
<i>A. A. Soloviev, K. F. Burdonov, A. A. Ereemeev, V. N. Ginzburg, E. A. Khazanov, A. A. Kochetkov, A. A. Kuzmin, I. A. Shaykin, A. A. Shaykin, I. V. Yakovlev, A. D. Sladkov, A. V. Korzhimanov, G. Revet, S. N. Chen, S. A. Pikuz, I. Yu. Skobelev, S. N. Ryazantsev, M. A. Alkhimova, E. D. Filippov, T. A. Pikuz, A. Ciardi, B. Khlar, M. V. Starodubtsev, J. Fuchs</i>	
ЭКРАНИРУЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЛАВИНО-СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ	145
<i>V. C. Сысоев, Ю. А. Кузнецов, М. У. Булатов, Д. И. Сухаревский, М. Ю. Наумова, Н. М. Лепехин, Л. М. Макальский, В. В. Сиденко</i>	
THE IMPROVEMENT OF METHODS OF THE PREVENTION OF THE THUNDER-STORM SHIELDING IMPACT OF PLASMA OF ELECTRIC LAVINO-STRIMERNOGO OF THE CATEGORY ON ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE MICROWAVE OVEN RANGE	146
<i>V. S. Sysoev, Yu. A. Kuznetsov, M. U. Bulatov, D. I. Sukharevsky, M. Yu. Naumova, N. M. Lepekhin, L. M. Makalsky, V. V. Sidenko</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ХОЛЬРАУМА С Z-ПИНЧЕМ	146
<i>Сяоцзянь Шу, Дэлуи Сяо, Нин Дин, Шункай Сунь, Чуан Сюэ и Ян Чжан</i>	
NUMERICAL SIMULATIONS ON THE FORMATION PROCESS OF Z-PINCH DYNAMIC HOHLRUAMS.	147
<i>Xiaojian Shu, Delong Xiao, Ning Ding, Shunkai Sun, Chuang Xue and Yang Zhang</i>	
ИОННО-КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ: ВЗАИМОСВЯЗЬ МИКРОСТРУКТУРЫ ТЕПЛОГО ПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА И ЕГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	147
<i>A. Л. Фальков, А. А. Овечкин, П. А. Лобода</i>	
ION-CORRELATION MODEL OF DENSE PLASMAS. ITERRELATION OF WARM-DENSE-MATTER MICROSTRUCTURE AND ITS THERMODYNAMICAL PROPERTIES	148
<i>A. L. Falkov, A. A. Ovechkin, P. A. Loboda</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В СТЕКЛЯННЫХ КАПИЛЛЯРАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ	149
<i>V. A. Флегентов, С. А. Горохов, К. В. Сафронов, Д. С. Гаврилов, Е. А. Лобода, А. Г. Какшин, Н. А. Пхайко, Д. А. Вихляев</i>	

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF RELATIVISTIC ELECTRON BEAM GENERATION IN GLASS CAPILLARIES UNDER THE ACTION OF ULTRAINTENSE LASER PULSE	149
<i>V. A. Flegentov, S. A. Gorokhov, K. V. Safronov, D. S. Gavrilov, E. A. Loboda, A. G. Kakshin, N. A. Pkhaiko, D. A. Vihljaev</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ АЛЮМИНИЯ.	150
<i>В. Б. Фокин, П. Р. Левашиов, М. Е. Поварницын</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF NANOPARTICLES FORMATION DURING FEMTOSECOND LASER ABLATION OF ALUMINUM	150
<i>V. B. Fokin, P. R. Levashov, M. E. Povarnitsyn</i>	
ПОГЛОЩЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРОНЕ МИШЕНЕЙ С ПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ РОССИЙСКОЙ УСТАНОВКИ МЕГАДЖОУЛЬНОГО КЛАССА	151
<i>И. А. Химич, В. А. Лыков</i>	
LASER RADIATION ABSORPTION IN A CORONA OF DIRECT DRIVEN TARGETS FOR RUSSIAN MEGAJOULE FACILITY	151
<i>I. A. Khimich, V. A. Lykov</i>	
ИСТОЧНИК ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ, ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ В ШИРОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ.	152
<i>О. В. Чефонов, А. В. Овчинников, М. Б. Агранат, С. Vicario, С. Р. Hauri</i>	
HIGH-ENERGY TERAHERTZ RADIATION SOURCE TUNABLE IN A WIDE SPECTRAL RANGE.	152
<i>О. В. Chefonov, A. V. Ovchinnikov, M. B. Agranat, C. Vicario, C. P. Hauri</i>	
КАМЕРЫ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ВНИИА	152
<i>Д. А. Андреев, В. Г. Андреев, А. В. Голиков, А. К. Дулатов, Б. Д. Лемешко, Ю. В. Михайлов, И. А. Прокуратов, А. Н. Селифанов, Т. С. Фатиев</i>	
VNIIA PLASMA FOCUS CHAMBERS	153
<i>D. A. Andreev, V. G. Andreev, A. V. Golikov, A. K. Dulatov, B. D. Lemeshko, Yu. V. Mikhailov, I. A. Prokuratov, A. N. Selifanov, T. S. Fatiev</i>	
Секция 4	
СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССАХ	
Section 4	
PROPERTIES OF MATTER AT HIGH-INTENSITY PROCESSES	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ Cu-Cr-Zr СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДКУП.	157
<i>И. В. Хомская, В. И. Зельдович, Е. В. Шорохов, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец, Д. Н. Абдуллина, А. А. Гранский, К. В. Гаан</i>	
STUDY OF STRUCTURE, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SUBMICROCRYSTALLINE CU-CR-ZR ALLOYS, OBTAINED BY METHOD OF DCAP	157
<i>I. V. Khomskaaya, V. I. Zeldovich, E. V. Shorokhov, N. Yu. Frolova, A. E. Kheifets, D. N. Abdullina, A. A. Granskii, K. V. Gaan</i>	
ДИНАМИКА ПОЛОСТИ В РАСПЛАВЕ МЕТАЛЛА: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ И КОНТИНУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	158
<i>А. В. Авдеева</i>	
DYNAMICS OF A CAVITY IN A METAL MELT: MOLECULAR DYNAMICS AND CONTINUUM SIMULATIONS	158
<i>А. В. Avdeeva</i>	
ИТЕРАТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТИ ОДИНОЧНОГО ОБЪЕКТА ИЗ PDV-СИГНАЛА	159
<i>Н. Б. Аникин, А. В. Павленко</i>	
ITERATIVE METHOD TO RECONSTRUCT VELOCITY OF A SINGLE OBJECT FROM PDV-SIGNAL.	159
<i>Н. В. Anikin, A. V. Pavlenko</i>	

- УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И УДАРНАЯ АДИАБАТА СРЕДЫ
ИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАССТОЯНИИ МОЛЕКУЛ 160
Э. Р. Пруэл, В. Ф. Анисичкин
- EQUATION OF STATE AND HUGONIOT OF MATTER WITH DISTANCE INTERACTING MOLECULES 160
E. R. Pruel, V. F. Anisichkin
- РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИКИ ОБЪЕМНОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ПО РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ С ВРЕМЕННЫМ И ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ
ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАГРУЗКЕ 160
*А. С. Аракчеев, В. М. Аульченко, А. В. Бурдаков, А. А. Васильев, Л. Н. Вячеславов, О. В. Евдоков,
В. В. Жуланов, А. А. Касатов, А. В. Косов, Б. П. Толочко, М. Р. Шарафутдинов, Л. И. Шехтман*
- DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC OF VOLUMETRIC DEFORMATION
OF CRYSTAL STRUCTURE BASED ON X-RAY DIFFRACTION
WITH TEMPORAL AND SPATIAL RESOLUTIONS UNDER IMPACT OF PULSED LASER LOAD 161
*A. S. Arakcheev, V. M. Aulchenko, A. V. Burdakov, A. A. Vasilyev, L. N. Vyacheslavov, O. V. Evdokov,
V. V. Zhulanov, A. A. Kasatov, A. V. Kosov, B. P. Tolochko, M. R. Sharafutdinov, L. I. Shekhtman*
- ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ СПЛАВА ВНЖК ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ ВК8
НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 161
С. А. Афанасьева, Н. Н. Белов, В. В. Буркин, А. Н. Ищенко, К. С. Рogaев, А. Н. Табаченко, Н. Т. Югов
- INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF WNIFEC ALLOYING BY WC8 HARD ALLOY
ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES 161
S. A. Afanas'eva, N. N. Belov, V. V. Burkin, A. N. Ishchenko, K. S. Rogayev, A. N. Tabachenko, N. T. Yugov
- ОСОБЕННОСТИ УДАРНОГО МЕТАМОРФИЗМА БАЗАЛЬТА И ДИАБАЗА,
ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ СФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН 162
Д. Д. Бадюков, Е. А. Козлов
- PECULIARITIES OF SHOCK METAMORPHISM OF THE BASALT
AND DIABASE SAMPLES SUBJECTED TO SPHERICAL SHOCK WAVES 162
D. D. Badjukov, E. A. Kozlov
- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ
В УСЛОВИЯХ УДАРНО-ВОЛНОВОГО СЖАТИЯ И РАСТЯЖЕНИЯ 162
И. А. Банникова, А. Н. Зубарева, С. В. Уваров, А. В. Уткин, О. Б. Наймарк
- EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LIQUIDS UNDER SHOCK-WAVE COMPRESSION AND TENSION 163
I. A. Bannikova, A. N. Zubareva, S. V. Uvarov, A. V. Utkin, O. B. Naimark
- ЛАЗЕРНЫЙ ОПТОГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СКОРОСТИ И КООРДИНАТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ, МЕТАЕМЫХ ВЗРЫВОМ ВВ . . . 163
В. К. Баранов, С. А. Бельков, С. Г. Гаранин, А. Г. Голубинский, Д. А. Ирничев, Г. Г. Кочемасов
- LASER HETERODYNE INTERFEROMETER
FOR MEASURING VELOCITY AND LOCATION SOME OBJECTS THROWN BY EXPLOSIVE 164
V. K. Baranov, S. A. Belkov, S. G. Garanin, A. G. Golubinsky, D. A. Irinichev, G. G. Kochemasov
- АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ 164
Ю. В. Баяндин, Н. В. Савельева, И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк
- SELF-SIMILAR NATURE OF SHOCK WAVE FRONTS IN CONDENSED MATTER 165
Yu. V. Bayandin, N. V. Saveleva, I. A. Bannikova, S. V. Uvarov, O. B. Naimark
- МОДЕЛИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ, ДВОЙНИКОВАНИЯ И МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ
ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ 165
И. Н. Бородин, А. Е. Майер, С. А. Атрошенко
- MODEL FOR DISLOCATION PLASTICITY, MECHANICAL TWINNING
AND MARTENSITIC TRANSFORMATIONS FOR SIMULATION
OF THE DEFECT STRUCTURE EVOLUTION IN METALS SUBJECTED TO INTENSE DYNAMIC LOADINGS 166
E. N. Borodin, A. E. Mayer, S. A. Atroshenko

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В AL-MG ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СКОЛЬЗЯЩИМИ ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ	166
<i>И. Г. Бродова, Е. Б. Смирнов, И. Г. Ширинкина, В. В. Астафьев, Т. И. Яблонских, А. В. Коваль, А. А. Дегтярев</i>	
STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN AL-MG CYLINDRICAL SHELLS UNDER LOADING BY SLIDING DETONATION WAVES	167
<i>I. G. Brodova, E. B. Smirnov, I. G. Shirinkina, V. V. Astafiev, T. I. Yablonskikh, A. V. Koval', A. A. Degtyarev</i>	
РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПОРИСТОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ	167
<i>А. Е. Бузюркин</i>	
THE COMPUTATIONAL MODEL OF POROUS CERAMIC MATERIAL	168
<i>А. Е. Бузюркин</i>	
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИМ СТЕНДОМ КОМПЛЕКСА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА	168
<i>Р. В. Валежжанин, О. В. Белов, Д. В. Кустов, Т. В. Шаров</i>	
CONTROL SYSTEM OF MOBILE RADIOGRAPHIC COMPLEX TO STUDY EQUATIONS OF STATE OF SUBSTANCES	169
<i>О. В. Белов, Р. В. Valekzhanin, D. V. Kustov, O. A. Shamro, T. V. Sharov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ	169
<i>Т. Л. Вихорнова, А. Н. Осавчук</i>	
STUDY OF FILLED POLYMERIC MATERIALS MECHANICAL BEHAVIOR AT IMPACT LOADING	169
<i>T. L. Vikhornova, A. N. Osavchuk</i>	
ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННЫХ И ФОНОННЫХ СПЕКТРОВ, СТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ПЛАВЛЕНИЕ НАТРИЯ ПРИ $P = 0-100$ GPa	170
<i>Н. Б. Волков, Е. А. Чингина</i>	
DYNAMICS OF ELECTRON AND PHONON SPECTRA, THE STRUCTURAL PHASE TRANSITIONS AND MELTING OF SODIUM AT $P = 0-100$ GPa	170
<i>N. B. Volkov, E. A. Chingina</i>	
УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ МЕТАЛЛА В СИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ	171
<i>Н. Б. Волков</i>	
EQUATIONS OF METAL DYNAMICS IN STRONG PULSED ELECTROMAGNETIC FIELDS	171
<i>N. B. Volkov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЗАРОЖДЕНИЯ НАНОПОР В АЛЮМИНИИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ	172
<i>Д. С. Воронин, А. Е. Майер, В. С. Красников</i>	
STUDY ON FORMATION SPEED OF NANOPORE IN ALUMINUM BY MOLECULAR DYNAMICS METHOD.	172
<i>D. S. Voronin, A. E. Mayer and V. S. Krasnikov</i>	
РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИЙ ВИНТОВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ	173
<i>Л.-С. Д. Галеева</i>	
CALCULATION OF THE ENERGY DENSITY OF SCREW DISLOCATIONS	173
<i>L.-S. D. Galeeva</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ЛУЧ» ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В МИШЕНЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УДАРНИКОВ	173
<i>И. А. Белов, С. А. Бельков, А. Ю. Воронин, И. Н. Воронич, С. Ю. Головкин, В. Н. Деркач, Л. А. Душина, В. М. Изгородин, Е. И. Митрофанов, К. В. Стародубцев</i>	
THE EXPERIMENTAL RESEARCH AT THE «LUCH» LASER FACILITY IN STRONG SHOCK WAVES GENERATION IN TARGETS WITH LINER APPLYING	174
<i>I. A. Belov, S. A. Belkov, A. Yu. Voronin, I. N. Voronich, S. Yu. Golovkin, V. N. Derkach, L. A. Dushina, V. M. Izgorodin, Eu. I. Mitrofanov, K. V. Starodybtsev</i>	

РАЗРУШЕНИЕ И ПРОЧНОСТЬ УРАНА И НЕКОТОРЫХ ЕГО СПЛАВОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ	174
<i>В. К. Голубев</i>	
FRACTURE AND STRENGTH OF URANIUM AND SEVERAL ITS ALLOYS UNDER SHOCK WAVE LOADING.	175
<i>V. K. Golubev</i>	
РАЗРУШЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РАЗОГРЕВЕ ИНТЕНСИВНЫМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	175
<i>В. К. Голубев</i>	
FRACTURE OF SEVERAL METALS AND ALLOYS UNDER IMPULSIVE HEATING BY INTENSIVE X-RAY RADIATION	176
<i>V. K. Golubev</i>	
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНА В ОБЛАСТИ АЛЬФА-ОМЕГА ПЕРЕХОДА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ.	176
<i>А. А. Гольшев, Д. В. Соболев, А. М. Молодец</i>	
ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF NANOSTRUCTURED TITANIUM IN THE ALPHA-OMEGA TRANSITION UNDER SHOCK COMPRESSION	177
<i>А. А. Golyshv, D. V. Sobolev, A. M. Molodets</i>	
АНОМАЛЬНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ АМОРФНОГО СТЕКЛОУГРЕРОДА В УДАРНЫХ ВОЛНАХ.	178
<i>А. М. Молодец, А. А. Гольшев, А. С. Савиных</i>	
ABNORMAL COMPRESSIBILITY OF SHOCKED AMORPHOUS GLASSY CARBON	178
<i>А. М. Molodets, A. A. Golyshv, A. S. Savinykh, V. V. Kim</i>	
МНОГОКАДРОВАЯ ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ТЕНЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ МНОГОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ БЕТАТРОНОВ	179
<i>К. И. Алмазова, А. Н. Белоногов, В. В. Боровков, Е. В. Горелов, И. В. Морозов, В. Д. Селемир, О. А. Шамро</i>	
MULTI-FRAME DIGITAL RECORDING SYSTEM OF SHADOW IMAGES FOR MULTI-ANGLE TOMOGRAPHY BASED ON IRONLESS PULSED BETATRONS.	179
<i>К. I. Almazova, A. N. Belonogov, V. V. Borovkov, E. V. Gorelov, I. V. Morozov, V. D. Selemir, O. A. Shamro</i>	
ЗОНЫ РИСКА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ	179
<i>Б. А. Гринберг, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин</i>	
RISK ZONES UNDER EXPLOSIVE WELDING	180
<i>В. А. Greenberg, V. I. Lysak, S. V. Kuzmin</i>	
МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ И ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКОЛОВ В СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧКАХ	180
<i>М. М. Бойко, Е. Ф. Грязнов, Е. В. Никитина, А. В. Уткин</i>	
METALLOGRAPHY AND FRACTOGRAPHY STUDIES OF SPALLS IN STEEL SHELLS.	181
<i>М. М. Boyko, E. F. Gryaznov, E. V. Nikitina, A. V. Utkin</i>	
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЯЧЕЙСТОЙ СТРУКТУРЫ В МОНОКРИСТАЛЛЕ МЕДИ ПРИ СФЕРИЧЕСКОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ	181
<i>А. В. Добромыслов, Н. И. Талуц, Е. А. Козлов</i>	
FEATURES OF FORMATION OF CELL DISLOCATION STRUCTURE IN COPPER MONOCRYSTAL AT SPHERICAL EXPLOSIVE LOADING	182
<i>А. V. Dobromyslov, N. I. Taluts, E. A. Kozlov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	182
<i>В. К. Баранов, А. М. Глыбин, П. В. Дудай, В. И. Дудин, А. В. Ивановский, А. А. Зименков, А. И. Краев, С. С. Надежин, Р. М. Тагиров, О. А. Тюпанова</i>	
STUDY OF DYNAMIC PROPERTIES OF MATERIALS WITH THE USE OF EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS.	183
<i>V. K. Baranov, P. V. Duday, V. I. Dudin, A. M. Glybin, A. V. Ivanovskiy, A. I. Kraev, S. S. Nadezhin, R. M. Tagirov, O. A. Tyupanova, A. A. Zimenkov</i>	

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТВЕРДЫХ α , β , ω ФАЗ ТИТАНА И ЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ	183
<i>В. М. Елькин, В. Н. Михайлов, Т. Ю. Михайлова</i>	
A SEMIEMPIRICAL EQUATION OF STATE FOR SOLID (ALPHA, BETA, OMEGA) AND LIQUID TITANIUM WITH EVAPORATION	183
<i>V. M. Elkin, V. N. Mikhaylov, T. Yu. Mikhaylova</i>	
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕДИ В ОБЛАСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ-ПАР	184
<i>А. Н. Емельянов, Д. В. Шахрай</i>	
THERMODYNAMIC PROPERTIES AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF COPPER NEAR THE CRITICAL POINT OF PHASE TRANSITION LIQUID-VAPOR	184
<i>A. N. Emelyanov, D. V. Shahray</i>	
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ УДАРНО-СЖАТЫХ МЕТАЛЛОВ	185
<i>М. В. Жерноклетов, А. Е. Ковалев, А. М. Подуреи, В. Г. Симаков</i>	
RESULTS OF INVESTIGATIONS OF PHASE TRANSITIONS OF SHOCK COMPRESSED METALS	186
<i>M. V. Zhernokletov, A. E. Kovalev, A. M. Podurets, V. G. Simakov</i>	
РЕНТГЕНДИФРАКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ В ПЛОСКИХ АМПУЛАХ СОХРАНЕНИЯ	186
<i>А. Н. Жуков, В. В. Якушев, С. Ю. Ананьев, В. В. Добрыгин, А. Ю. Долгобородов</i>	
X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF NICKEL ALUMINIDE SYNTHESIZED UNDER SHOCK WAVE LOADING IN PLANAR RECOVERY ASSEMBLIES	187
<i>A. N. Zhukov, V. V. Yakushev, S. Yu. Ananayev, V. V. Dobrygin, A. Yu. Dolgoborodov</i>	
МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СХЛОПЫВАНИЯ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	187
<i>В. И. Зельдович, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец, И. В. Хомская, А. А. Дегтярев, А. В. Коваль, Е. Б. Смирнов, Е. В. Шорохов</i>	
METALLOGRAPHIC STUDY OF THE COLLAPSE OF COPPER CYLINDRICAL SHELLS	187
<i>V. I. Zel'dovich, N. Yu. Frolova, A. E. Kheifets, I. V. Khomskaaya, A. A. Degtyarev, A. V. Koval', E. B. Smirnov, E. V. Shorokhov</i>	
О ПРЯМОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА СВОБОДНОЙ ЭНЕРГИИ В МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ	188
<i>Г. В. Ионов, А. В. Караваяев, В. В. Дрёмов, Е. А. Черепанова</i>	
DIRECT FREE ENERGY EVALUATION IN MOLECULAR-DYNAMICS SIMULATION	188
<i>G. V. Ionov, A. V. Karavaev, V. V. Dremov, E. A. Cherepanova</i>	
ВЛИЯНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ НА УДАРНЫЕ АДИАБАТЫ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ	188
<i>М. А. Кадатский, К. В. Хищенко</i>	
INFLUENCE OF SHELL EFFECTS ON SHOCK HUGONIOTS OF METALS AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES.	189
<i>М. А. Kadatskiy, K. V. Khishchenko</i>	
КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССАХ	189
<i>К. В. Бандуркин, В. Г. Каменев, А. А. Тихов, В. Н. Туркин, А. С. Шубин</i>	
COMPLEX METHOD OF REGISTRATION OF DISPERSED PHASE PARAMETERS IN HIGH-SPEED PROCESSES	190
<i>K. V. Bandurkin, V. G. Kamenev, A. A. Tikhov, V. N. Turkin, A. S. Shubin</i>	
МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАВНОВЕСНЫХ КРИВЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКЕ	190
<i>А. В. Караваяев, В. В. Дрёмов, Г. В. Ионов</i>	
CALCULATION OF EQUILIBRIUM PHASE TRANSITION CURVES BY MOLECULAR DYNAMICS.	191
<i>A. V. Karavaev, V. V. Dremov, G. V. Ionov</i>	

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ У10А	191
<i>Е. И. Карнаухов, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, Д. Н. Казаков, А. С. Майорова, С. С. Мокрушин</i>	
STRAIN RATE INFLUENCE ON DYNAMIC PROPERTIES OF STEEL U10A	191
<i>E. I. Karnaukhov, A. V. Pavlenko, S. N. Malyugina, D. N. Kazakov, A. S. Mayorova, S. S. Mokrushin</i>	
АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕПЛОЙ ЧАСТИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ	192
<i>Ю. М. Ковалев</i>	
ANALYSIS OF SOME APPROXIMATIONS FOR THE DESCRIPTION OF THERMAL SIDE OF THE EQUATION STATES OF MOLECULAR CRYSTALS	192
<i>Yu. M. Kovalev</i>	
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ Е. И. ЗАБАБАХИНА ОБ ОГРАНИЧЕННОСТИ КУМУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ ВО ФРОНТЕ СХОДЯЩИХСЯ ВОЛН В СРЕДАХ С ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ	192
<i>Е. А. Козлов, А. В. Петровцев</i>	
ADDITIONAL EXPERIMENTAL AND SIMULATED RESULTS IN SUPPORT OF E. I. ZABABAKHIN'S HYPOTHESIS ON THE ENERGY CUMULATION FINITENESS AT THE FRONT OF CONVERGING WAVES IN MEDIA WITH PHASE TRANSITIONS	193
<i>E. A. Kozlov, A. V. Petrovstev</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЫЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СВИНЦА ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННОЙ ДИАГНОСТИКИ	194
<i>Е. А. Козлов, С. А. Дьячков, А. Н. Кондратьев, Д. П. Кучко, С. Е. Куратов, Д. Б. Rogozkin, А. А. Серёжкин, Р. В. Комаров, М. А. Ральников, О. В. Ткачев, А. Е. Широбок</i>	
EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF LEAD EJECTION AND LEAD SPALL STRENGTH ESTIMATION USING PDV-DATA.	194
<i>E. A. Kozlov, S. A. Djachkov, A. N. Kondratjev, D. P. Kuchko, S. E. Kuratov, D. B. Rogozkin, A. A. Serezshkin, R. V. Komarov, M. A. Ralnikov, O. V. Tkachev, A. E. Shirobokov</i>	
О ВЛИЯНИИ ЗАЗОРА МЕЖДУ ОБРАЗЦОМ ВВ И МЕТАЕМОЙ ПЛАСТИНОЙ НА СТЕПЕНЬ ЕЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ	195
<i>А. Л. Жеребцов, А. В. Красильников</i>	
THE EFFECT OF A GAP BETWEEN HE AND THE PROJECTILE PLATE ON PLATE SPALLATION	195
<i>A. L. Zherebtsov, A. V. Krasilnikov</i>	
О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	196
<i>А. В. Красильников, В. Н. Ногин</i>	
THE ACCURACY OF SPALL STRENGTH EVALUATION FROM CONTACT SURFACE MEASUREMENTS.	196
<i>A. V. Krasilnikov, V. N. Nogin</i>	
ДВУХУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ.	196
<i>В. С. Красников, А. Е. Майер, Д. С. Воронин</i>	
TWO-LEVEL MODELING OF DYNAMICAL PLASTICITY AND FRACTURE OF ALUMINUM	197
<i>V. S. Krasnikov, A. E. Mayer, D. S. Voronin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ И ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ	197
<i>И. К. Красюк, П. П. Пашинин, А. Ю. Семенов, К. В. Хищенко, В. Е. Форт</i>	
STUDY OF EXTREME STATES OF MATTER AT HIGH ENERGY DENSITIES AND HIGH STRAIN RATES WITH POWERFUL LASERS.	197
<i>I. K. Krasnyuk, P. P. Pashinin, A. Yu. Semenov, K. V. Khishchenko, V. E. Fortov</i>	

ЛАЗЕРНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕЩЕСТВА В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ	197
<i>A. П. Кузнецов, К. Л. Губский, А. В. Михайлюк, Д. С. Кошкин</i>	
LASER DIAGNOSTIC SYSTEM FOR STUDIES MATTER IN EXTREME STATES	198
<i>A. P. Kuznetsov, K. L. Gubskii, A. V. Mikhaylyuk, D. S. Koshkin</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ КОРПУСКУЛЯРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА МОДЕЛЬНЫЕ СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА	198
<i>Е. И. Курбатова, А. И. Ксенофонтов, В. М. Дёмин</i>	
EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF THE IMPACT OF HIGH-INTENSITY CORPUSCULAR RADIATION ON MODEL IRON ALLOYS	199
<i>E. I. Kurbatova, V. M. Dyomin, A. I. Ksenofontov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И СМЕСЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.	199
<i>К. К. Маевский, С. А. Кинеловский</i>	
MODELING THE THERMODYNAMIC PARAMETERS OF THE SOLID ORGANIC SUBSTANCES AND MIXTURES UNDER SHOCK WAVE LOADING	200
<i>К. К. Maevskii, S. A. Kinelovskii</i>	
МНОГОМАСШТАБНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ	200
<i>А. Е. Майер, П. Н. Майер, В. С. Красников, В. В. Погорелко, И. Н. Бородин</i>	
MULTISCALE INVESTIGATION OF DYNAMIC FRACTURE OF METALS AND METAL MELTS	201
<i>A. E. Mayer, P. N. Mayer, V. S. Krasnikov, V. V. Pogorelko, E. N. Borodin</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ ВСПЕНЕННОЙ СТРУКТУРЫ В РАСПЛАВАХ АЛЮМИНИЯ И ЖЕЛЕЗА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РАСТЯЖЕНИИ	202
<i>П. Н. Майер, А. Е. Майер</i>	
FORMATION OF FOAMED STRUCTURE IN ALUMINUM AND IRON MELTS AT HIGH-RATE TENSION	202
<i>P. N. Mayer, A. E. Mayer</i>	
ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ZR И СПЛАВА ZR-2,5%NB	203
<i>С. Н. Малюгина, А. В. Павленко, С. С. Мокрушин, А. С. Майорова, Д. Н. Казаков, О. Е. Козелков, С. Ю. Филатов</i>	
TEMPERATURE VERSUS VELOCITY FOR DYNAMICAL STRENGTH OF ZR AND ZR-2.5%NB ALLOY.	203
<i>S. N. Maluginina, A. V. Pavlenko, S. S. Mokrushin, A. S. Mayorova, D. N. Kazakov, O. E. Kozelkov, S. Yu. Filatov</i>	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ	203
<i>Л. А. Мерзиевский, И. Ф. Головнев, Е. И. Головнева</i>	
MOLECULAR-DYNAMIC INVESTIGATION INTO MICROSTRUCTURAL FEATURES OF SHOCK-WAVE DEFORMATION	204
<i>L. A. Merzhievsky, I. F. Golovnev, E. I. Golovneva</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	204
<i>Л. А. Мерзиевский, М. С. Воронин</i>	
MODELING OF DYNAMIC DEFORMATION OF POLYMERS SUBJECTED TO IONIZING RADIATION	205
<i>L. A. Merzhievsky, M. S. Voronin</i>	
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ СВОЙСТВ УРАНА МЕТОДАМИ ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛА И АРВ	205
<i>К. П. Мигдал, А. В. Янилкин</i>	
FIRST-PRINCIPLES CALCULATIONS OF URANIUM PROPERTIES BY PSEUDOPOTENTIAL AND APW METHODS	205
<i>К. P. Migdal, A. V. Yanilkin</i>	

ПРИМЕНИМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕЙТЕРИДА ЛИТИЯ ПРИ СЖАТИИ.	206
<i>Д. В. Минаков, П. Р. Левашов</i>	
APPLICABILITY OF DIFFERENT PSEUDOPOTENTIALS FOR CALCULATIONS OF THERMODYNAMIC PROPERTIES OF LITHIUM DEUTERIDE UNDER COMPRESSION.	206
<i>D. V. Minakov, P. R. Levashov</i>	
МНОГОФАЗНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛИСТИРОЛА	207
<i>В. М. Елькин, В. Н. Михайлов, Т. Ю. Михайлова</i>	
A MULTIPHASE EQUATION OF STATE FOR POLYSTYRENE	207
<i>V. M. Elkin, V. N. Mikhaylov, T. Yu. Mikhaylova</i>	
ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ Х16Н15М3Т1 И Х13В2 ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ СУБМИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ	207
<i>С. С. Мокрушин, А. С. Майорова, С. Н. Малюгина, А. В. Павленко, В. В. Сагарадзе, Н. В. Катаева, Е. Г. Волкова</i>	
DYNAMIC PROPERTIES OF REACTOR STEELS KH16N15M3T1 AND KH13V2 UNDER SHOCK-WAVE LOADING OF SUBMICROSECOND SCALE.	208
<i>S. S. Mokrushin, A. S. Maiorova, S. N. Malyugina, A. V. Pavlenko, V. V. Sagaradze, N. V. Katayeva, Y. G. Volkova</i>	
О НЕКОТОРЫХ АВТОМОДЕЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ С ДЕФЕКТАМИ.	208
<i>О. Б. Наймарк</i>	
SELF-SIMILAR REGULARITIES OF INSTABILITY DEVELOPMENT AND WAVE FRONTS IN CONDENSED MATTER WITH DEFECTS	209
<i>О. В. Наймарк</i>	
О ВОЛНЕ РАЗРЕЖЕНИЯ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ	209
<i>В. Н. Ногин</i>	
ON RAREFACTION WAVE IN ELASTIC-PLASTIC MATERIAL	209
<i>V. N. Nogin</i>	
ЦИРКОНИЙ, КОММЕРЧЕСКИЕ ЦИРКОНИЕВЫЕ СПЛАВЫ ZR-1%NB И ZR-2.5%NB: $\alpha \rightarrow \omega$ ПРЕВРАЩЕНИЕ, ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ	210
<i>А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, С. С. Мокрушин, А. С. Майорова, Д. Н. Казаков, О. Е. Козелков, С. Ю. Филатов, А. В. Добромислов, Н. И. Талуц</i>	
ZIRCONIUM, INDUSTRIAL ZIRCONIUM ALLOYS ZR-1%NB AND ZR-2.5%NB: $\alpha \rightarrow \omega$ TRANSITIONS, TEMPERATURE DEPENDENCES OF DYNAMIC BEHAVIOR, DEFORMATION AND SPALLATION MECHANISMS	210
<i>A. V. Pavlenko, S. N. Malyugina, S. S. Mokrushin, A. S. Mayorova, D. N. Kazakov, O. E. Kozelkov, S. Yu. Filatov, A. V. Dobromyslov, N. I. Taluts</i>	
ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА – ЛЕ ШАТЕЛЬЕ В Al-Mg-Mn СПЛАВЕ С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ	210
<i>А. Н. Петрова, А. Ю. Изюмова, И. А. Пантелеев, И. Г. Бродова</i>	
THE SPECIFICS OF PORTEVIN – LE CHATELIER EFFECT OF Al-Mg-Mn ALLOY WITH SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURE	211
<i>A. N. Petrova, A. U. Izumova, I. A. Panteleev, I. G. Brodova</i>	
ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА AL-MG-MN СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ, НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ	211
<i>А. Н. Петрова, И. Г. Бродова, С. В. Разоренов, Е. В. Шорохов</i>	
THE INFLUENCE OF THE GRAIN SIZE OF AL-MG-MN ALLOY PRODUCED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION ON DYNAMIC STRENGTH	212
<i>A. N. Petrova, I. G. Brodova, S. V. Razorenov, E. V. Shorokhov</i>	

МЕХАНИЗМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОКСИДОВ И СУЛЬФИДОВ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ БАРОДЕФОРМАЦИЯХ	212
<i>В. П. Пилюгин, А. И. Анчаров, Ю. В. Соловьёва, Т. П. Толмачёв, Б. А. Гижевский</i>	
MECHANISM OF METAL RECOVERY BY SEVERE DEFORMATION UNDER PRESSURE OF OXIDES AND SULFIDES.	213
<i>V. P. Pilyugin, A. I. Ancharov, Yu. V. Solov'eva, T. P. Tolmachev, B. A. Gizhevskii</i>	
АТОМИСТИЧЕСКОЕ И КОНТИНУАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ АЛЮМИНИЯ И ЖЕЛЕЗА С ИНОРОДНЫМИ НАНОВКЛЮЧЕНИЯМИ	213
<i>В. В. Погорелко, А. Е. Майер</i>	
ATOMISTIC AND CONTINUUM INVESTIGATION OF THE DYNAMIC TENSILE STRENGTH OF ALUMINUM AND IRON WITH NANOINCLUSIONS	214
<i>V. V. Pogorelko, A. E. Mayer</i>	
АМОРФИЗАЦИЯ В А-БОРЕ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	214
<i>П. А. Покаташкин, П. Ю. Коротаев, А. В. Янилкин</i>	
AMORPHIZATION IN A-BORON: A MOLECULAR DYNAMICS STUDY	214
<i>P. A. Pokatashkin, P. Yu. Korotaev, A. V. Yanilkin</i>	
ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ И МЕДИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	215
<i>В. В. Попов, А. В. Столбовский, Е. Н. Попова, Р. М. Фалахутдинов, Е. В. Шорохов</i>	
EVOLUTION OF STRUCTURE OF TIN BRONZE AND COPPER AT HIGH-SPEED DYNAMIC DEFORMATION	215
<i>V. V. Popov, A. V. Stolbovsky, E. N. Popova, R. M. Falahutdinov, E. V. Shorohov</i>	
ДИНАМИКА ЗАТУХАНИЯ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА В АЛЮМИНИИ И ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТЕ	216
<i>Т. В. Попова, А. Е. Майер, К. В. Хищенко</i>	
DYNAMICS OF SHOCK PULSE ATTENUATION IN ALUMINUM AND POLYMETHYLMETHACRYLATE	216
<i>T. V. Popova, A. E. Mayer, K. V. Khishchenko</i>	
ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ЦЕРИЙ	217
<i>С. А. Атрошенко, А. А. Лукин, В. А. Морозов, Г. Г. Савенков, А. Н. Зубарева, А. В. Уткин</i>	
PECULIARITIES OF EFFECT OF HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM ON THE CERIUM.	217
<i>S. A. Atroshenko, A. A. Lukin, V. A. Morozov, G. G. Savenkov, A. N. Zubareva, A. V. Utkin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ ТРЕЩИН ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т	218
<i>А. В. Кузнецов, А. А. Лукин, В. А. Морозов, А. Ю. Григорьев, Г. Г. Савенков</i>	
THE STUDY OF VELOCITIES OF CRACKS AT HIGH STRAIN RATES IN STAINLESS STEEL 12KH18N10T	218
<i>A. V. Kuznetsov, A. A. Lukin, V. A. Morozov, G. G. Savenkov</i>	
ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛЕГКИХ АКТИНИДОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ	218
<i>Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, А. Я. Учаев</i>	
PHYSICAL NATURE OF LIGHT ACTINIDE LONGEVITIES IN THE DYNAMIC FAILURE PROCESSES	219
<i>E. V. Kosheleva, N. I. Selchenkova, A. Ya. Uchaev</i>	
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВИНЦА ПОД ДАВЛЕНИЕМ	219
<i>Н. А. Смирнов</i>	
THERMODYNAMIC PROPERTIES OF LEAD UNDER HIGH PRESSURES FROM AB INITIO CALCULATIONS.	219
<i>N. A. Smirnov</i>	

СТРУКТУРНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Ni_3X ($X = Ge, Al, Fe$) ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ	220
<i>В. П. Пилюгин, Ю. В. Соловьёва, А. И. Анчаров, В. А. Старенченко, С. В. Старенченко, Б. А. Гринберг, А. М. Пацелов, Т. П. Толмачёв, А. В. Плотников</i>	
STRUCTURAL FRAGMENTATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ni_3X ($X = Ge, Al, Fe$) SINGLE CRYSTALS UNDER SEVER DEFORMATION AT HIGH PRESSURE	220
<i>V. P. Pilyugin, Yu. V. Solov'eva, A. I. Ancharov, V. A. Starenchenko, S. V. Starenchenko, B. A. Greenberg, A. M. Patselov, T. P. Tolmachev, A. V. Plotnikov</i>	
ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЖЕЛЕЗА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ В СФЕРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	221
<i>Н. И. Талуц, А. В. Добромыслов, Е. А. Козлов</i>	
FEATURES OF HIGH-RATE PLASTIC DEFORMATION OF IRON UNDER EXPLOSIVE LOADING IN SPHERICAL SYSTEMS	221
<i>N. I. Taluts, A. V. Dobromyslov, E. A. Kozlov</i>	
ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ И КОМПАКТИРОВАНИЕ ЛАТУНИ Л63. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.	222
<i>И. А. Терёшкина, И. Р. Трунин, В. Г. Симаков, А. М. Подурец, В. А. Брагунец, Ю. В. Батьков, И. Н. Кондрохина, М. И. Ткаченко, Г. Г. Иванова, М. А. Десятникова, А. В. Цветков</i>	
SPALL DAMAGE AND COMPACTION OF BRASS L63. EXPERIMENTAL STUDIES AND NUMERICAL SIMULATION	222
<i>I. A. Tereshkina, I. R. Trunin, V. G. Simakov, A. M. Podurets, V. A. Bragunets, Yu. V. Bat'kov, I. N. Kondrokhina, M. I. Tkachenko, G. G. Ivanova, M. A. Desyatnikova, A. V. Tsvetkov</i>	
ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ И КОМПАКТИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК. ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	222
<i>И. Р. Трунин, И. А. Терёшкина, И. В. Шиберин, М. И. Ткаченко, А. Н. Баландина</i>	
SPHERICAL STEEL SHELL SPALL FRACTURE AND COMPACTION. EXPERIMENTS AND NUMERICAL SIMULATION.	223
<i>I. R. Trunin, I. A. Tereshkina, I. V. Shiberin, M. I. Tkachenko, A. N. Balandina</i>	
О ПОДОБИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	223
<i>Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, С. С. Соколов, И. Р. Трунин, А. Я. Учаев</i>	
ON SIMILARITY OF DYNAMIC FAILURE PROCESSES IN DIFFERENT GEOMETRY METALS AT VARIOUS TIME-AMPLITUDE CHARACTERISTICS OF EXTERNAL ACTION.	224
<i>Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, С. С. Соколов, И. Р. Трунин, А. Я. Учаев</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА РЕГИСТРАЦИИ МИНИМАЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ МАССЫ ЧАСТИЦ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УДАРОВОЛНОВОГО ПЫЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ГЕТЕРОДИН-ИНТЕРФЕРОМЕТРА. РЕГИСТРАЦИЯ ЭФФЕКТА МНОГОКРАТНОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА	224
<i>А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин, Е. А. Чудаков, Д. А. Калашников, И. С. Гнутов, Е. И. Бутусов</i>	
STUDY OF REGISTRATION THRESHOLD FOR MINIMAL SPECIFIC WEIGHT OF PARTICLES WHEN INVESTIGATING SHOCK-WAVE EJECTION FROM MATERIAL SURFACE USING LASER HETERODYNE-INTERFEROMETER. RECORDING OF MULTIPLE DOPPLER FREQUENCY SHIFT EFFECT	225
<i>A. V. Fedorov, A. L. Mikhailov, S. A. Finyushin, E. A. Chudakov, D. A. Kalashnikov, I. S. Gnutov, E. I. Butusov</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ В МЕДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СХОЖДЕНИЯ И ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ.	225
<i>Н. Ю. Фролова, В. И. Зельдович, А. Э. Хейфец, С. М. Долгих, К. В. Гаан, Е. В. Шорохов</i>	

FORMATION OF THE MICROSTRUCTURE IN THE COPPER CYLINDRICAL SHELL DURING HIGH-SPEED DEFORMATION OF THE CONVERGENCE AND DURING SUBSEQUENT RECRYSTALLIZATION.	225
<i>N. Yu. Frolova, V. I. Zel'dovich, A. E. Kheifets, S. M. Dolgikh, K. V. Gaan, E. V. Shorokhov</i>	
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЛЬДА И ВОДЫ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ	226
<i>К. В. Хищенко</i>	
PHASE TRANSFORMATIONS OF ICE AND WATER AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES	226
<i>К. V. Khishchenko</i>	
ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭВОЛЮЦИЮ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕДИ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ.	226
<i>И. В. Хомская, В. И. Зельдович, Е. В. Шорохов, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец</i>	
EFFECT OF THE HIGH SPEED DEFORMATION ON THE EVOLUTION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COPPER AND COPPER-BASED ALLOYS	227
<i>I. V. Khomskaya, V. I. Zeldovich, E. V. Shorokhov, N. Yu. Frolova, A. E. Kheifets</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА УПОРЯДОЧЕНИЕ УГЛЕРОДА В МАРТЕНСИТЕ	227
<i>П. В. Чирков, А. А. Мирзоев</i>	
INFLUENCE OF EXTERNAL STRESS ON CARBON ORDERING IN MARTENSITE LATTICE BY MOLECULAR DYNAMICS	228
<i>P. V. Chirkov, A. A. Mirzoev</i>	
МОБИЛЬНЫЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ БЕТАТРОНОВ. КОНЦЕПЦИЯ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ	228
<i>Д. И. Зенков, С. Г. Козлов, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, И. Н. Романов, К. В. Савченко, В. Д. Селемир, Е. В. Урлин, О. А. Шамро</i>	
MOBILE X-RAY COMPLEX BASED ON IRONLESS PULSED BETATRON. X-RAY COMPLEX CONCEPTION FOR SMALL-ANGLE TOMOGRAPHY	228
<i>D. I. Zenkov, S. G. Kozlov, Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov, K. V. Savchenko, V. D. Selemir, E. V. Urlin, O. A. Shamro</i>	
ИЗЛОМЫ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ И КРИВАЯ ПЛАВЛЕНИЯ КАРБИДА БОРА В МЕГАБАРНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ	229
<i>А. М. Молодец, А. А. Голышев, Д. В. Шахрай</i>	
KINKS OF HUGONIOT AND MELTING CURVE OF BORON CARBIDE AT HIGH PRESSURES	229
<i>А. М. Molodets, A. A. Golyshv, D. V. Shakhray</i>	
СИНТЕЗ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ Al И Al ₂ O ₃	229
<i>Д. В. Шахрай, В. В. Авдонин, А. В. Пальниченко</i>	
SYNTHESIS OF SUPERCONDUCTING COMPOUNDS ON THE BASIS OF ALUMINUM AND ALUMINUM OXIDE	229
<i>D. V. Shakhray, V. V. Avdonin, A. V. Palnichenko</i>	
О РАСЦЕПЛЕНИИ ПОЛОСЫ ПРОВОДИМОСТИ РТУТИ	230
<i>А. И. Киселев, В. Г. Шевченко, А. В. Конюкова</i>	
ON SPLITTING OF THE CONDUCTION BAND OF MERCURY	231
<i>А. I. Kiselev, V. G. Shevchenko, A. V. Konukova</i>	
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА С НАНОРЕЛЬЕФОМ	232
<i>А. А. Эбель, А. Е. Майер</i>	
ATOMISTIC SIMULATION OF THE PLASTIC DEFORMATION AT THE SHOCK WAVE REFLECTION FROM THE METALS SURFACE WITH NANORELIEF	233
<i>А. А. Ebel, A. E. Mayer</i>	

ИЗУЧЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ В ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12X18H10T ПОСРЕДСТВОМ РЕГИСТРАЦИИ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ И ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДВУМ НЕЗАВИСИМЫМ МЕТОДАМ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРЕГРАДЕ ИЗ МРАМОРА	233
--	-----

*Д. Т. Юсупов, Е. А. Козлов, К. С. Сидоров, А. И. Клёнов, А. Е. Ширококов, Р. В. Комаров,
А. В. Петровцев, Д. М. Шалковский*

STUDY OF MULTIPLE SPALLATIONS IN FLAT METAL PLATES MADE OF 12X18H10T AUSTENITIC STEEL BY RECORDING VELOCITY PROFILES AND AXIAL STRESSES IN MARBLE BARRIER USING TWO INDEPENDENT MEASUREMENT TECHNIQUES	234
--	-----

*D. T. Yusupov, E. A. Kozlov, K. S. Sidorov, A. I. Kleynov, A. E. Shirobokov, R. V. Komarov,
A. V. Petrovtsev, D. M. Shalkovsky*

УДАРНАЯ АДИАБАТА И ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ЗВУКА ОТ ДАВЛЕНИЯ В ОБРАЗЦАХ ИЗ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ НИКЕЛЯ И АЛЮМИНИЯ РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ	234
--	-----

В. В. Якушев, А. В. Уткин, А. Ю. Долгобородов, С. Ю. Ананьев, А. Н. Жуков, О. А. Ивашко

HUGONIOT AND SOUND VELOCITY PRESSURE DEPENDENCE IN SAMPLES OF REACTIVE MIXTURES OF NICKEL AND ALUMINUM POWDERS OF DIFFERENT DISPERSITY	235
---	-----

V. V. Yakushev, A. V. Utkin, A. Yu. Dolgoborodov, S. Yu. Ananayev, A. N. Zhukov, O. A. Ivashko,

Секция 5

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ

Section 5

SCIENTIFIC BASES OF NUCLEAR POWER ENGINEERING AND NUCLEAR MEDICINE

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ИЗ ПОЛИКАРБОНАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОПРОСОВ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА АЭС	239
--	-----

*Е. В. Безгоднов, И. В. Лавренюк, В. А. Симоненко, С. Д. Пасюков, М. В. Никифоров, В. П. Бакаев,
В. Н. Федюшкин, И. А. Попов*

THE EXPERIMENTAL POLYCARBONATE FACILITY FOR RESEARCH OF HYDROGEN SAFETY AT NUCLEAR POWER PLANT	239
---	-----

*E. V. Bezgodov, I. V. Lavrenyuk, V. A. Simonenko, S. D. Pasyukov, M. V. Nikiforov, V. P. Bakaev,
V. N. Fedyushkin, I. A. Popov*

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ БЛОЧНОГО РАСПЛАВНОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА С РАЗДЕЛЕНИЕМ ФУНКЦИЙ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ	240
--	-----

М. Н. Белоногов, В. А. Симоненко

OPTIMIZATION OF NEUTRON-PHYSICAL AND THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF ACTIVE ZONE OF MODULAR MOLTEN SALT REACTOR WITH PARTITION OF ENERGY GENERATION AND ENERGY TRANSMISSION FUNCTIONS	240
--	-----

M. N. Belonogov, V. A. Simonenko

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ВОДО-ВОДЯНОГО РЕАКТОРА В РАМКАХ ПРОЕКТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ ПО ОТРАБОТАННОМУ ТОПЛИВУ С ГЛУБОКИМ ВЫГОРАНИЕМ	241
---	-----

Б. Бивард, Д. М. Скальоне, Р. Монтгомери

NON-DESTRUCTIVE EXAMINATIONS OF PWR RODS IN THE HIGH BURNUP SPENT FUEL DATA PROJECT	242
---	-----

B. Bevard, J. M. Scaglione, R. Montgomery

ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫБРОСОВ И СБРОСОВ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР	243
---	-----

Е. Н. Ботько

ASSESSMENT OF ADMISSIBLE VALUES OF EMISSIONS AND DUMPINGS OF RADIOACTIVE MATERIALS ON THE NPP WITH VVER REACTORS	243
---	-----

E. N. Botko

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	244
<i>A. A. Bochkareva, O. V. Shults, I. R. Makeeva, V. Yu. Pugachyov, V. G. Dubosarskiy, O. V. Kuznetsova, L. N. Darina, I. V. Peshkichev</i>	
PROGRAM MODULE FOR TERMODINAMIC MODELING	244
<i>A. A. Bochkareva, O. V. Shults, I. R. Makeeva, V. Yu. Pugachyov, V. G. Dubosarskiy, O. V. Kuznetsova, L. N. Darina, I. V. Peshkichev</i>	
О РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБОГАЩЕННОГО УРАНА В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ	244
<i>И. А. Волков, В. А. Симоненко, А. А. Бочкарева, У. Ф. Шереметьева</i>	
ON IMPLEMENTATION OF NATURAL SAFETY PRINCIPLE IN THE USE OF ENRICHED URANIUM IN LEAD COOLED FAST REACTOR	245
<i>I. A. Volkov, V. A. Simonenko, A. A. Bochkareva, U. F. Sheremetyeva</i>	
ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ	246
<i>Л. П. Волков</i>	
MAINTENANCE OF NPP HARDWARE AS A WAY OF SAFETY AND RELIABILITY ENHANCEMENT	246
<i>L. P. Volkov</i>	
РАБОТА РЕАКТОРА БН-1200 В СИСТЕМЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	247
<i>Н. Д. Дырда, У. Ф. Шереметьева, И. Р. Макеева</i>	
REACTOR BN-1200 IN A TWO-COMPONENT SYSTEM OF NUCLEAR POWER	247
<i>N. D. Dyrda, U. F. Sheremetyeva, I. R. Makeyeva</i>	
РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГОРЕНИЯ В ОБЕДНЕННЫХ СОСТАВАХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ	248
<i>М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, И. С. Яковенко</i>	
REGIMES OF FLAME PROPAGATION IN LEAN HYDROGEN-AIR MIXTURES.	249
<i>M. F. Ivanov, A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko</i>	
НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ С АНАЛИЗОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ К ПЕРСПЕКТИВНЫМ СИЛОВЫМ УСТАНОВКАМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.	249
<i>М. Я. Иванов, Ю. И. Малахов, В. К. Мамаев</i>	
SCIENTIFIC BACKGROUND OF LOW ENERGY NUCLEAR REACTIONS WITH ITS CAPABILITIES FOR PERSPECTIVE AEROSPACE PROPULSION SYSTEMS.	249
<i>M. Ja. Ivanov, Yu. I. Malakhov, V. K. Mamaev</i>	
УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРОВ И ВЕСА КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕВОЗКИ ОЯТ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ОБЕДНЕННОГО УРАНА	250
<i>Т. В. Казаковская, В. И. Шаповалов, С. Г. Ермичев, В. З. Матвеев</i>	
REDUCTION OF CASK'S SIZE AND WEIGHT THROUGH THE USE OF MATERIALS BASED ON DEPLETED URANIUM OXIDES	251
<i>T. V. Kazakovskaya, S. G. Ermichev, V. Z. Matveev, V. I. Shapovalov</i>	
РЕЖИМЫ СВЕРХЗВУКОВОГО И ДЕТОНАЦИОННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В КАНАЛАХ	252
<i>А. Д. Киверин, И. С. Яковенко, М. Ф. Иванов</i>	
REGIMES OF SUPERSONIC AND DETONATIVE PROPAGATION OF COMBUSTION WAVES IN CHANNELS	252
<i>A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko, M. F. Ivanov</i>	
ПРОТОННАЯ ЛУЧЕВАЯ ТЕРАПИЯ В РОССИИ И В МИРЕ (ОБЗОР)	253
<i>В. О. Карпунин, В. И. Костюченко, С. И. Самарин, А. С. Углов</i>	
OVERVIEW OF PROTON THERAPY IN RUSSIA AND IN THE WORLD	253
<i>V. O. Karpunin, V. I. Kostjuchenko, S. I. Samarin, A. S. Uglov</i>	

50 ЛЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ТЕХНОЛОГИЯХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	253
<i>Д. Кузмински, Р. Рейновски, М. Суинхоу, П. Сингх</i>	
50 YEARS APPLICATION OF NON-DESTRUCTIVE ASSAY IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF NUCLEAR MATERIAL SECURITY	254
<i>J. Kuzminski, R. Reinovsky, M. Swinhoe, P. Singh</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРАТИФИКАЦИИ И ГОРЕНИЯ ВПГС	254
<i>И. В. Лавренюк, Е. В. Безгодков, В. А. Симоненко, С. Д. Пасюков, М. В. Никифоров, В. П. Бакаев, В. Н. Федюшкин, И. А. Попов</i>	
HYDROGEN-AIR-STEAM MIXTURES STRATIFICATION AND DEFLAGRATION EXPERIMENTAL RESEARCH.	254
<i>I. V. Lavrenyuk, E. V. Bezgodov, V. A. Simonenko, S. D. Pasyukov, M. V. Nikiforov, V. P. Bakaeв, V. N. Feduyshkin, I. A. Popov</i>	
ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ПЛАТФОРМА АТЭК	255
<i>И. Р. Макеева, В. А. Симоненко, Н. Д. Дырда, А. А. Рыкунова, С. В. Пчелинцева</i>	
THE PROBLEMS OF MODELING THE TECHNOLOGIES OF NUCLEAR FUEL CYCLE PLATFORM АТЕК	255
<i>I. R. Makeyeva, V. A. Simonenko, N. D. Dyrda, A. A. Rykunova, S. V. Pchelintseva</i>	
РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ПО ПРОГРАММЕ ПРИЗМА ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕДИЦИНСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ	256
<i>Е. А. Кашаева, Г. Н. Малышкин, С. И. Самарин, С. Ю. Таскаев</i>	
PRIZMA CALCULATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF A BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY FACILITY	256
<i>E. A. Kashaeva, G. N. Malyshkin, S. I. Samarin, S. Yu. Taskaev</i>	
СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ УЧЕТА ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА ВВЭР-1000	257
<i>Д. Г. Модестов, М. В. Никольшин, И. Ю. Силантьева</i>	
COMPARISON BETWEEN THERMAL HYDRAULICS TREATMENTS AND THEIR EFFECT ON VVER FUEL CHARACTERISTICS	257
<i>D. G. Modestov, M. V. Nikulshin, I. Yu. Silantieva</i>	
ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫМ МЕТОДОМ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА.	258
<i>Д. Г. Модестов, В. А. Симоненко, Ю. И. Чернухин</i>	
FEASIBILITY OF SPENT FUEL CHARACTERIZATION WITH NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS	258
<i>D. G. Modestov, V. A. Simonenko, Yu. I. Chernukhin</i>	
АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РОССИИ И В МИРЕ. СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ	259
<i>Б. И. Нигматулин</i>	
NUCLEAR POWER ENGINEERING IN RUSSIA AND AROUND THE WORLD. CURRENT STATUS AND PROSPECTS	260
<i>Bulat I. Nigmatulin</i>	
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ФАБРИКАЦИИ НИТРИДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	261
<i>И. В. Пешкичев, О. В. Шульц, А. А. Бочкарева</i>	
DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF NITRIDE NUCLEAR FUEL PRODUCTION PROCESSES	262
<i>I. V. Peshkichev, O. V. Shults, A. A. Bochkareva</i>	
МЕСТО НЕЙТРОННОЙ ТЕРАПИИ В КОМПЛЕКСНОМ ЛЕЧЕНИИ РЕЦИДИВОВ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ГЛИОМ ГОЛОВНОГО МОЗГА	262
<i>М. М. Пименова, О. Н. Давыдова, А. В. Важенин, Т. М. Шарабура, К. Н. Сыролева, А. А. Ложков</i>	
NEUTRON THERAPY IN INTEGRATED THERAPY OF RELAPSES OF MALIGNANT BRAIN GLIOMAS	263
<i>М. М. Pimenova, O. N. Davydova, A. V. Vazhenin, T. M. Shaburova, K. N. Syroleva, A. A. Lozhkov</i>	

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖИДКО-СОЛЕВЫХ РЕАКТОРОВ В МИРЕ	263
<i>Л. И. Пономарёв</i>	
STATE OF THE ART OF THE MOLTEN SALT REACTOR STUDIES.	264
<i>L. I. Ponomarev</i>	
РАСТВОРЕНИЕ UN В РАСПЛАВЛЕННОЙ ЭВТЕКТИКЕ LiCl-KCl	264
<i>А. М. Потапов, В. Ю. Шишкин, Ю. П. Зайков</i>	
UN DISSOLUTION IN THE MOLTEN LiCl-KCl EUTECTIC	264
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАСПЛАВЛЕННЫХ СЛОЖНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ LiCl-KCl.	265
<i>А. Б. Салюлев, А. М. Потапов, В. Ю. Шишкин</i>	
ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF MOLTEN COMPLEX MIXTURES BASED ON LiCl-KCl.	265
<i>A. B. Salyulev, A. M. Potapov, V. Yu. Shishkin</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЗЯТЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПК ВИЗАРТ	266
<i>А. А. Рыкунова, И. Р. Макеева, В. Ю. Пугачёв, В. Г. Дубосарский, О. В. Вербицкая, К. В. Чайко, Е. А. Белоногова</i>	
CLOSED FUEL CYCLE TECHNOLOGIES MODELLING WITH SOFTWARE PACKAGE VIZART	267
<i>А. А. Rykunova, I. R. Makeeva, V. Yu. Pugachev, V. G. Dubosarskiy, O. V. Verbitzkaya, K. V. Chaiko, E. A. Belonogova</i>	
РАЗВИТИЕ ПО ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ РАСЧЕТОВ ДОЗОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ЛЕЧЕНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ БОЛЬНЫХ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИЕЙ	267
<i>В. О. Карпунин, В. И. Костюченко, С. И. Самарин, А. С. Углов</i>	
SOFTWARE DEVELOPMENT FOR PRECISION DOSE CALCULATIONS IN RADIOTHERAPY PLANNING	268
<i>V. O. Karpunin, V. I. Kostjuchenko, S. I. Samarin, A. S. Uglov</i>	
ЛАЗЕРНАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ	268
<i>Н. М. Лепёхин, В. Г. Филиппов, Е. В. Бармина, А. В. Симакин, Г. А. Шафеев</i>	
LASER DECONTAMINATION OF RADIOACTIVE WASTE	269
<i>N. M. Lepekhin, V. G. Filippov, E. V. Barmina, A. V. Simakin, G. A. Shafeev</i>	
ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С ЛЕГКОВОДНЫМИ РЕАКТОРАМИ.	270
<i>В. А. Симоненко</i>	
MODELING AND SIMULATIONS IN THE INTEREST OF HYDROGEN SAFETY AT NPP WITH LIGHT-WATER REACTORS.	271
<i>V. A. Simonenko</i>	
ПРИБЛИЖЕННЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА	271
<i>А. С. Соловьев, С. Ю. Игашов</i>	
APPROXIMATE THEORETICAL METHODS OF CALCULATING CROSS SECTIONS FOR RADIATIVE CAPTURE REACTIONS	272
<i>A. S. Solovyeu, S. Yu. Igashov</i>	
АКТИВНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА	272
<i>М. Т. Суинхоу, Х. Треллуэ, А. Фавалли</i>	
ACTIVE INTERROGATION OF SPENT FUEL	272
<i>M. T. Swinhoe, H. Trelue and A. Favalli</i>	
УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ	273
<i>Д. А. Касатов, А. Н. Макаров, И. Н. Сорокин, С. Ю. Таскаев, И. М. Шудло</i>	
ACCELERATOR BASED NEUTRON SOURCE FOR BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY	273
<i>D. A. Kasatov, A. N. Makarov, I. M. Shchudlo, I. N. Sorokin, S. Yu. Taskaev</i>	

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА О ЗАПОЛНЕНИИ ГАЗАМИ ПОЛИКАРБОНАТНОЙ КОНСТРУКЦИИ, ИМИТИРУЮЩЕЙ ПОМЕЩЕНИЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА НА АЭС С ВВЭР	273
<i>Ю. А. Томилов, Е. М. Щенникова, Е. В. Безгодюв</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF EXPERIMENT OF GAS FILLING OF POLYCARBONATE CONSTRUCTION THAT SIMULATES ROOM OF THE STEAM GENERATOR AT THE NPP WITH WWER	274
<i>U. A. Tomilov, E. M. Shchennikova, E. V. Bezgodov</i>	
СИСТЕМА ИТММС МК-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ: ВЕРИФИКАЦИЯ УЧЕТА ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОБ ОБЛАСТИ ГАЛО ПУЧКА	275
<i>В. О. Карпунин, В. И. Костюченко, С. И. Самарин, А. С. Углов</i>	
PROTON THERAPY ORIENTED ITHMC SYSTEM FOR MC CALCULATIONS: VERIFICATION OF NUCLEAR INTERACTION AGAINST HALO DATA	275
<i>V. O. Karpunin, V. I. Kostjuchenko, S. I. Samarin, A. S. Uglov</i>	
НЕКОТОРЫЕ ВАРИАНТЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	275
<i>У. Ф. Шереметьева, Н. Д. Дырда, Д. Г. Модестов, И. Р. Макеева, В. А. Симоненко</i>	
SOME OPTIONS OF TWO-COMPONENT NUCLEAR POWER SYSTEM ORGANIZATION	276
<i>U. F. Sheremetyeva, N. D. Dyrda, D. G. Modestov, I. R. Makeeva, V. A. Simonenko</i>	
РАСЧЕТ ПРЕДЕЛОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ	276
<i>О. В. Шульц</i>	
CALCULATION OF HYDROGEN-AIR MIXTURES SELF IGNITION LIMITS.	277
<i>O. V. Shults</i>	
УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ПАРО-ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ.	277
<i>О. В. Шульц, А. В. Ушков, В. Н. Федюшкин, О. В. Валева, Ю. Ф. Давлетчин, И. А. Доровских, И. В. Лавренюк, М. В. Никульшин</i>	
CONDITIONS OF HYDROGEN CONTAINING VAPOR-GAS MIXTURES COMBUSTION	278
<i>O. V. Shults, A. V. Ushkov, V. N. Fedyushkin, O. V. Valeyeva, Y. F. Davletchin, I. A. Dorovskikh, I. V. Lavrenyuk, M. V. Nikulshin</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ИСТОЧНИКЕ НАКАЛИВАНИЯ	278
<i>Е. М. Щенникова, Ю. А. Томилов</i>	
SIMULATION OF THE IGNITION OF HYDROGEN CONTAINING VAPOR-GAS MIXTURES BY A STATIONARY SOURCE OF HEATING	279
<i>Е. М. Щенникова, Ю. А. Томилов</i>	
ВЛИЯНИЕ СПЕКТРА ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ НА РАСПЫЛЕНИЕ УРАНОВЫХ СЛОЕВ	280
<i>Г. В. Влох, С. В. Фролова, Д. А. Юнин</i>	
EFFECT OF FISSION FRAGMENT SPECTRUM ON URANIUM LAYERS SPUTTERING	280
<i>G. V. Vlokh, S. V. Frolova, D. A. Yunin</i>	
РАЗРАБОТКА ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА С УЗКОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА В ДИСПЕРСИОННОМ РЕАКТОРНОМ ТОПЛИВЕ	281
<i>Г. В. Влох, С. В. Фролова, Д. А. Юнин</i>	
DEVELOPMENT OF GAMMA-SPECTROMETER WITH NARROW DIRECTIVITY DIAGRAM TO MEASURE URANIUM DISTRIBUTION IN DISPERSION REACTOR FUEL	281
<i>G. V. Vlokh, S. V. Frolova, D. A. Yunin</i>	

Секция 6**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ****Section 6****NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODES AND ACCURATE SOLUTIONS**

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРАТЕГИИ ВЕРИФИКАЦИИ И ВАЛИДАЦИИ LAD2D ДЛЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ	285
<i>Ван Жуйли, Юй Хун, Линь Чжун, Линь Вэньчжоу</i>	
RESEARCH ON VERIFICATION AND VALIDATION STRATEGY OF LAD2D FOR DETONATION FLUID DYNAMICS	285
<i>Wang Ruili, Yu Hong, Lin Zhong and Lin Wenzhou</i>	
МЕТОДИКА ИЗМЕНЕНИЯ СВЯЗНОСТИ ДЛЯ СЕТКИ С БОЛЬШОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ ДЛЯ ЛАГРАНЖЕВА МЕТОДА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ	286
<i>Юй Хун, Ван Жуйли, Линь Чжун, Линь Вэньчжоу</i>	
THE TECHNIQUE OF CHANGING CONNECTIVITY WITH LARGE DEFORMATION MESH FOR LAGRANGIAN METHOD AND ITS APPLICATION	286
<i>Yu Hong, Wang Ruili, Lin Zhong and Lin Wenzhou</i>	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ОТ СКОРОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОДУВА	287
<i>Л. В. Абдубакова, Р. Е. Волков, А. Г. Обухов</i>	
NUMERICAL INVESTIGATION OF DEPENDENCE RISING CHARACTERISTICS SWIRLING FLOW VERTICAL SPEED BLOWING	287
<i>L. V. Abdubakova, R. E. Volkov, A. G. Obukhov</i>	
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОЛЬНЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗОВАННОГО АЛГОРИТМА ПОИСКА СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ И СОБСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА	288
<i>Н. В. Юдина, А. В. Апороски, Н. Р. Садыков</i>	
CALCULATION OF PARAMETERS OF ARBITRARY QUANTUM SYSTEMS BASED ON THE SEARCHING EIGENVALUES AND EIGENFUNCTIONS FOR THE SCHRÖDINGER EQUATION ALGORITHM.	289
<i>N. V. Yudina, A. V. Aporoski, N. R. Sadykov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ВИХРЕЙ ПРИ УЧЕТЕ СИЛ ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА	289
<i>Д. Д. Баранникова, А. Г. Обухов</i>	
NUMERICAL MODELING OF HEAT SWIRLING VORTICES IN ACCOUNTING GRAVITY AND CORIOLIS	290
<i>D. D. Barannikova, A. G. Obukhov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СНАРЯДОВ И АВИАДВИГАТЕЛЯ С БЕТОННЫМИ ЗАЩИТНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ.	291
<i>С. П. Батыев, П. А. Радченко, А. В. Радченко</i>	
NUMERICAL MODELLING INTERACTION OF SHELLS AND THE AIRCRAFT ENGINE WITH CONCRETE PROTECTIVE DESIGNS	291
<i>S. P. Batuev, P. A. Radchenko, A. V. Radchenko</i>	
ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ ТЕРМОРЕЗИСТОРНЫХ АВТОГЕ- НЕРАТОРОВ, СВЯЗАННЫХ ПОСРЕДСТВОМ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВЯЗИ	291
<i>Р. Ю. Берегов, А. В. Мелких</i>	
NUMERICAL EVALUATION OF THE OPTIMAL VALUE OF THE COUPLING FORCE IN THE SYSTEM THERMO-RESISTOR AUTO-GENERATORS CONNECTED VIA A CAPACITOR CONNECTION.	292
<i>R. U. Beregov, A. V. Melkikh</i>	

РАЗДЕЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВ ПРИ ИСПАРЕНИИ ИЗ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ И ЕГО ОПТИМИЗАЦИЯ.	292
<i>A. B. Melkikh, A. O. Bokun'yeva</i>	
ISOTOPE FRACTIONATION DURING TWOCOMPONENT MIXTURE'S EVAPORATION AND ITS OPTIMIZATION	292
<i>A. V. Melkikh, A. O. Bokun'yeva</i>	
ВОЗМОЖНОСТИ ТРЕХМЕРНОЙ МЕТОДИКИ МАЛОРАКУРСНОГО ТОМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИМТОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОРИТНЫХ ШАРОВ ДО И ПОСЛЕ ИХ ВЗРЫВНОГО ОБЖАТИЯ	293
<i>Л. П. Брезгина</i>	
CAPABILITIES OF 3D SMALL-DIRECTION TOMOGRAPHY IMTOM FOR INVESTIGATION OF METEORITE SPHERES PRIOR TO AND AFTER THEIR EXPLOSIVE COMPACTION	293
<i>L. P. Brezgina</i>	
ОБОБЩЕННОЕ ТЕЧЕНИЯ ХИМЕНЦА ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В БЕСКОНЕЧНОЙ ПОЛОСЕ, ПОДОГРЕВАЕМЫЙ СНИЗУ, ПРИ ЗАДАННОМ ТЕПЛООБМЕНЕ НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ	294
<i>С. С. Власова, Е. Ю. Просвираков</i>	
GENERALIZED HIMENT'S FLOW OF A VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID IN THE ENDLESS STRIP, HEATEDFROM BELOW, WITH THE HEAT EXCHANGE ON THE UPPER BORDER	294
<i>S. S. Vlasova¹, E. Yu. Prosviryakov^{1,2}</i>	
АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО МАЛОМУ ЧИСЛУ РАКУРСОВ С TV-РЕГУЛЯРИЗАЦИЕЙ И АДАПТИВНОЙ СЕГМЕНТАЦИЕЙ	295
<i>В. В. Власов, А. Б. Коновалов, С. В. Кольчугин</i>	
FEW-VIEWS ALGEBRAIC RECONSTRUCTION OF IMAGES WITH TV-REGULARIZATION AND ADAPTIVE SEGMENTATION	295
<i>V. V. Vlasov, A. B. Konovalov, S. V. Kolchugin</i>	
АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ВЫПУКЛЫХ МНОГОУГОЛЬНИКОВ С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ГАЗОДИНАМИКИ	296
<i>К. О. Власов</i>	
AN ALGORITHM FOR INTERSECTING CONVEX POLYGONS WITH HIGH PRECISION FOR USING IN GAS-DYNAMICS TASKS	296
<i>К. О. Vlasov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СВОБОДНО ВСПЛЫВАЮЩЕГО ПУЗЫРЯ ВОЗДУХА	297
<i>К. О. Власов</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF THE MOTION OF A FREE RISING AIR BUBBLE	297
<i>К. О. Vlasov</i>	
СПИРАЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ ВСПЛЫВАЮЩИХ ПУЗЫРЕЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО РАЗМЕРА. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ.	298
<i>С. Ю. Седов, К. О. Власов</i>	
SPIRAL TRAJECTORY OF A MILLIMETER SIZE RISING BUBBLES. ANALYTICAL APPROACH.	298
<i>S. Yu. Sedov, K. O. Vlasov</i>	
ГИБРИДНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ УСКОРЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ.	298
<i>Л. В. Вишкова, Г. И. Дудникова, К. В. Вишков</i>	
HYBRID NUMERICAL MODEL OF ACCELERATION OF CHARGED PARTICLES ON A SHOCK WAVE FRONT	299
<i>L. V. Vshivkova, G. I. Dudnikova, K. V. Vshivkov</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОДНОГО ТОЧНОГО ДВУМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕШЕНИЯ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ–СТОКСА	299
<i>В. Ф. Габдуллаев</i>	

USE TRIGONOMETRIC SERIES TO REPRESENT A SINGLE TWO-DIMENSIONAL UNSTEADY EXACT SOLUTIONS COMPLETE SYSTEM NAVIER–STOKES.	300
<i>V. F. Gabdulkaev</i>	
МЕТОД ЧАСТИЦ В ЯЧЕЙКАХ И ПРОБЛЕМА ЧИСЛЕННЫХ ШУМОВ.	300
<i>Е. А. Генрих</i>	
PARTICLE-IN-CELL METHOD AND NUMERICAL NOISE PROBLEM	301
<i>Е. А. Genrikh</i>	
УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА	301
<i>О. Н. Дементьев</i>	
STABILITY OF FLOW OF A DUSTY GAS	302
<i>О. N. Dementiev</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ КОНИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ, ПРИМЫКАЮЩИХ К ОБЛАСТИ ПОКОЯ	302
<i>С. П. Баутин, С. Л. Дерябин, А. В. Мезенцев</i>	
MATHEMATICAL MODELING OF THE STATIONARY CONIC FLOWS ADJOINING THE DOMAIN OF REST.	303
<i>S. P. Bautin, S. L. Deryabin, A. V. Mezentsev</i>	
ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ	303
<i>А. Е. Дудоров, С. А. Хайбрахманов</i>	
THE FORMATION AND EVOLUTION OF PROTOSTELLAR DISCS.	304
<i>А. E. Dudorov, S. A. Khaibrakhmanov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМУ	304
<i>Е. А. Берендеев, В. А. Вишивков, Г. И. Дудникова, А. А. Ефимова</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF GENERATION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION BY CONTINUOUS INJECTION OF ELECTRON BEAM IN PLASMA	305
<i>Е. А. Berendejev, V. A. Vshivkov, G. I. Dudnikova, A. A. Efimova</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА	305
<i>С. П. Баутин, В. Ф. Габдулхаев, В. Е. Замыслов, О. Д. Зорина, П. А. Козлов, П. П. Скачков</i>	
USE TRIGONOMETRIC SERIES IN APPROXIMATING FLOWS VISCOUS HEAT CONDUCTING GAS	306
<i>S. P. Bautin, V. F. Gabdulhaev, V. E. Zamyslov, O. D. Zorina, P. A. Kozlov, P. P. Skachkov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МНОГОМАТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЫ С ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ НЕУСТОЙЧИВОСТЯМИ	306
<i>К. Е. Городничев, П. П. Захаров, С. Е. Куратов, И. С. Меньшов</i>	
NUMERICAL MODELING OF MULTIMATERIAL MEDIUM FLOW WITH HYDRODYNAMIC INSTABILITIES	307
<i>К. E. Gorodnichev, S. E. Kuratov, I. S. Menshov, P. P. Zakharov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ.	307
<i>С. А. Зелепугин, А. С. Бодров, А. С. Зелепугин, Ю. Ф. Христенко</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF DEFORMATION OF COPPER SAMPLES UNDER DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING.	307
<i>S. A. Zelepugin, A. S. Bodrov, A. S. Zelepugin, Yu. F. Khristenko</i>	
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ	308
<i>С. И. Кабанихин, М. А. Шишленин</i>	
NUMERICAL METHODS FOR SOLVING OF INVERSE PROBLEMS FOR HYPERBOLIC EQUATIONS.	308
<i>S. I. Kabanikhin, M. A. Shishlenin</i>	

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ КОШИ С НАЧАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ЗАКРУТКУ ГАЗА.	309
<i>A. O. Kazachinskiy</i>	
THE ANALYTICAL DECISION OF THE CHARACTERISTIC TASK CAUCHY WITH INITIAL DATA DESCRIBING THE TURNING OF GAS	309
<i>A. O. Kazachinsky</i>	
О ПОСТРОЕНИИ ДОПУСТИМЫХ УПРАВЛЕНИЙ В НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ	310
<i>И. Н. Кандоба, И. В. Козьмин</i>	
ON CONSTRUCTING ADMISSIBLE CONTROLS IN A NONLINEAR OPTIMAL TIME PROBLEM WITH PHASE CONSTRAINTS.	310
<i>I. N. Kandoba, I. V. Kozmin</i>	
ОБОБЩЕНИЕ ЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОЛНЫ РИМАНА ПРИ УЧЕТЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ	311
<i>A. С. Кирьянова</i>	
GENERALIZATION OF A CENTERED RIEMANN WAVE INTO ACCOUNT THE FORCES OF GRAVITY	311
<i>A. S. Kiryanova</i>	
ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ЗАДАЧ РАСШИРЕНИЯ (СЖАТИЯ) ПОЛЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ШАРОВ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБ ИЗ НЕСЖИМАЕМЫХ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК	312
<i>A. B. Kiselev</i>	
EXACT SOLUTIONS OF THE ONE-DIMENSIONAL PROBLEMS OF EXPANSION AND COMPRESSION HOLLOW TWO-LAYERS SPHERES AND CYLINDRICAL TUBES MADE OF INCOMPRESSIBLE VISCOPLASTIC MATERIALS UNDER THE ACTION OF DYNAMICAL LOADINGS.	312
<i>A. B. Kiselev</i>	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН С МЕХАНИЧЕСКИМИ И ТЕПЛОВЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ВЕЛИЗИ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ	312
<i>Н. Л. Клиначева, Ю. М. Ковалев</i>	
THE INTERACTION OF SPHERICAL SHOCK WAVES WITH MECHANICAL AND THERMAL HETEROGENEITIES CLOSE TO A FLAT SURFACE	313
<i>N. L. Klinacheva, Yu. M. Kovalev</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ	313
<i>П. А. Козлов</i>	
SIMULATION OF VISCOUS HEAT-CONDUCTING GAS USING TRIGONOMETRIC SERIES AND NUMERICAL METHODS FOR SOLVING OF PARALLELIZATION	314
<i>P. A. Kozlov</i>	
ОСНОВАННАЯ НА МЕТОДЕ МОНТЕ–КАРЛО ОЦЕНКА ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД.	314
<i>A. B. Konovalov, С. В. Кольчугин, Р. Ф. Мухамадиев, В. В. Власов, Г. Н. Малышкин</i>	
MONTE CARLO BASED ESTIMATION OF WEIGHT COEFFICIENTS FOR FEW-VIEWS TOMOGRAPHY OF STRONGLY ABSORBING MEDIA	315
<i>A. B. Konovalov, S. V. Kolchugin, R. F. Mukhamadiev, V. V. Vlasov, G. N. Malyshekin</i>	
РАСЧЕТ СЕПАРАЦИИ ДВУКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ.	315
<i>A. В. Красильников, В. Ф. Куропатенко</i>	
TWO-COMPONENT MIXTURE SEPARATION SIMULATION	316
<i>A. V. Krasilnikov, V. F. Kuropatenko</i>	

МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	316
<i>Е. И. Краус, И. И. Шабалин</i>	
SIMULATION OF SHOCK DEFORMATION AND FRACTURE OF SOLIDS	316
<i>E. I. Kraus, I. I. Shabalin</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ПЛОСКОГО ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕННОЕ	317
<i>А. А. Кривоногов, А. Л. Карташев</i>	
MATHEMATICAL MODEL OF TRANSFORMATION PLANE VORTEX FLOW TO SPATIAL CASE	317
<i>A. A. Krivonogov, A. A. Kartashev</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ	318
<i>М. Н. Кривошеина, С. В. Кобенко, Е. В. Туч</i>	
MODELING OF ELASTOPLASTIC DEFORMATIONS PROCESSES IN CONDITIONS OF DYNAMIC LOADING IN SINGLE CRYSTALS	318
<i>M. N. Krivosheina, S. V. Kobenko, E. V. Tuch</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ПРИДОННЫХ ЧАСТЯХ ТОРНАДО И ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА	318
<i>И. Ю. Крутова</i>	
MODELING OF FLOW IN THE BOTTOM PART OF THE TORNADES AND TROPICAL CYCLONES	319
<i>I. Y. Krutova</i>	
УСВОЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СО СПУТНИКОВ В МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОКЕАНА	319
<i>К. П. Беляев, А. А. Кулешов, Н. П. Тучкова</i>	
ASSIMILATION OF REMOTE MEASURED DATA INTO OCEAN DYNAMIC MODEL.	320
<i>K. P. Belyaev, A. A. Kuleshov, N. P. Tuchkova</i>	
РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ И УСКОРЕНИЕ ПОСТРОЕНИЯ БЛОЧНЫХ СЕТОК В ПРЕПРОЦЕССОРЕ ЛОГОС.	321
<i>В. В. Лазарев</i>	
PARALLELIZATION AND ACCELERATION OF MULTIBLOCK GRID GENERATION IN LOGOS PREPROCESSOR.	321
<i>V. V. Lazarev</i>	
НЕПРЕОДОЛИМОСТЬ СВОЙСТВА ЛОКАЛЬНОСТИ ДЛЯ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ	321
<i>Н. Ф. Лапина, М. В. Пчелинцев</i>	
INSUPERABILITY OF LOCALITY PROPERTY FOR ITERATIVE METHODS OF NONLINEAR EQUATION SETS SOLUTION	322
<i>N. F. Lapina, M. V. Pchelintsev</i>	
АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕНОСА УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ	322
<i>Д. Е. Ларин</i>	
ANALYTICAL METHOD OF ULTRARELATIVISTIC PROTON TRANSPORT COMPUTATION	323
<i>D. E. Larin</i>	
ТЕОРЕМА О ЛОКАЛЬНОЙ СХОДИМОСТИ МЕТОДА КАСАТЕЛЬНЫХ ГИПЕРПЛОСКОСТЕЙ.	323
<i>Ю. Ю. Лушина, М. В. Пчелинцев</i>	
THE LOCAL CONVERGENCE OF THE TANGENT HYPERPLANES METHOD THEOREM.	324
<i>Y. Y. Lushina, M. V. Pchelintsev</i>	
ЧИСЛЕННОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДИФФУЗИИ, КОАГУЛЯЦИИ И ПЕРЕНОСА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА СУПЕР-ЭВМ	324
<i>М. А. Марченко</i>	

NUMERICAL STOCHASTIC SIMULATION OF KINETIC PROCESSES OF DIFFUSION, COAGULATION AND CHARGED PARTICLES TRANSFER ON SUPERCOMPUTERS.	325
<i>M. A. Marchenko</i>	
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ НА ДВУМЕРНЫХ ДЕКАРТОВЫХ СЕТКАХ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОКАЛЬНОЙ АДАПТАЦИЕЙ	325
<i>П. П. Захаров, И. С. Меньшов, К. Д. Меркулов</i>	
PROGRAM COMPLEX FOR CALCULATION OF CONTINUUM MECHANICAL PROBLEMS ON 2D CARTESIAN MESHES WITH DYNAMIC LOCAL ADAPTATION	326
<i>I. S. Menshov, K. D. Merkulov, P. P. Zaharov</i>	
МЕТОД УКРУЧЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМОГО ГАЗА В ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ	326
<i>Н. А. Михайлов, И. В. Глазырин</i>	
METHOD OF CONTACT BOUND STEEPENING FOR THE SIMULATION OF 3D MULTIPHASE COMPRESSIBLE FLOWS IN EULER VARIABLES	327
<i>N. A. Mikhaylov, I. V. Glazyrin</i>	
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЩЕПЛЕНИЯ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ РАДИАЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ	328
<i>Н. Я. Моисеев</i>	
MODIFIED PHYSICAL PROCESS SPLITTING METHOD TO SOLVE RADIATIVE GAS-DYNAMICS EQUATIONS	328
<i>N. Ya. Moiseev</i>	
ОДИН ИЗ СПОСОБОВ ПОСТРОЕНИЯ КОНСЕРВАТИВНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В СЛУЧАЕ ТРЕХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ	328
<i>Н. С. Еськов, Я. В. Пронин, А. Ф. Опрышко</i>	
A METHOD OF CONSTRUCTING A CONSERVATIVE DIFFERENCE SCHEME FOR 3D MODELING OF ELASTIC-PLASTIC FLOWS.	329
<i>N. S. Eskov, Y. V. Pronin, A. F. Opryshko</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В СТАЦИОНАРНОМ ПЛОСКОМ СЛУЧАЕ	329
<i>О. В. Опрышко</i>	
MODELING THE BOTTOM PART OF THE RISING SWIRLING FLOWS IN A STATIONARY PLANE CASE.	329
<i>О. В. Опрышко</i>	
ВЕРИФИКАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЗОНАНСА СВОБОДНОЙ ПОЛОСТИ	330
<i>Г. В. Орлов</i>	
VERIFICATION OF A CAVITY RESONANCE THEORETICAL MODEL	330
<i>G. V. Orlov</i>	
ПЕРЕСЧЕТ ВЕЛИЧИН ПОВЫШЕННОГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ VOF-МЕТОДА	331
<i>Э. М. Вазиев, Ю. Г. Панюков</i>	
VOF-BASED HIGHER ORDER REMAPPING.	331
<i>E. M. Vaziev, Y. G. Panukov</i>	
АЛГОРИТМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ МНОГОМЕРНЫХ РАСЧЕТОВ В МЕТОДИКЕ ТИМ	331
<i>Т. Н. Половникова, А. А. Воропинов</i>	
ALGORITHMS OF DYNAMIC BALANCING THE COMPUTATIONAL LOAD FOR MULTIDIMENSIONAL SIMULATIONS IN TIM-METHOD	332
<i>T. N. Polovnikova, A. A. Voropinov</i>	
DSN-TVD МЕТОД РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ НА ДВУМЕРНЫХ НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТКАХ	333
<i>Э. М. Вазиев, А. Д. Гаджиев, Т. В. Пономарёва</i>	

THE DSN-TVD METHOD FOR SOLVING THE NEUTRON TRANSPORT EQUATION ON 2D UNSTRUCTURED MESHES	333
<i>E. M. Vaziev, A. D. Gadzhiev, T. V. Ponomaryova</i>	
РЕАЛИЗУЕМЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ КОНЕЧНООПРЕДЕЛЕННЫХ ГРУПП В МНОГООБРАЗИИ НИЛЬПОТЕНТНЫХ ГРУПП СТУПЕНИ 2	333
<i>Д. С. Попов, М. В. Пчелинцев</i>	
IMPLEMENTABLE ALGORITHMS FOR FINITELY PRESENTED GROUPS IN THE MANI-FOLD OF CLASS 2 NILPOTENT GROUPS	334
<i>D. S. Popov, M. V. Pchelintsev</i>	
КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ (СТОХАСТИЧЕСКИЙ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ)	334
<i>И. Ф. Потапенко, С. А. Карпов</i>	
KINETIC SIMULATION OF HEAT TRANSPORT IN COLLISION PLASMAS (DETERMINISTIC AND STOCHASTIC APPROACHES)	335
<i>I. F. Potapenko, S. A. Karpov</i>	
О ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ВЫСОТНЫХ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ В ИОНОСФЕРЕ: ЭЛЬФЫ, ДЖЕТЫ И СПРАЙТЫ	335
<i>А. А. Потапов</i>	
ON THE FRACTAL STRUCTURE OF HIGH-ALTITUDE STORM DISCHARGES IN THE IONOSPHERE: ELVES, JETS AND SPRITES	336
<i>A. A. Potapov</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНО-ПРОТИВОПОТОЧНЫХ СХЕМ В ЛАГРАНЖЕВЫХ МАССОВЫХ КООРДИНАТАХ ДЛЯ СРЕД С КОНТАКТНЫМИ РАЗРЫВАМИ	337
<i>А. В. Приданников</i>	
CENTRAL-UPWIND SCHEMES IN MASS LAGRANGIAN COORDINATES FOR MEDIA WITH CONTACT DISCONTINUITIES	337
<i>A. V. Pridannikov</i>	
ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ В ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ	338
<i>Е. Ю. Просвиряков</i>	
WAVES OF PRESSURE IN VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID	338
<i>E. Yu. Prosviryakov</i>	
ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ АТОМОВ В ТРОЙНОЙ СИСТЕМЕ Fe-Si-C	338
<i>Я. М. Ридный, А. А. Мирзоев</i>	
AB INITIO COMPUTER SIMULATION INTERACTION ATOMS IN THE TERNARY SYSTEM Fe-Si-C	339
<i>Ya. M. Ridnyi, A. A. Mirsoev</i>	
О ТОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ	339
<i>В. Н. Робук</i>	
ON EXACT SOLUTIONS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS	340
<i>V. N. Robuk</i>	
О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛОСКИМ СЛОЕМ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ТРЕХ СЛУЧАЕВ ВНЕШНЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	341
<i>М. А. Чащин, Л. И. Рубина, О. Н. Ульянов</i>	
ON MODELING THE INTERACTION OF RADIATION WITH A FLAT LAYER OF SUBSTANCE FOR THREE CASES OF EXTERNAL RADIATION	341
<i>M. A. Chaschin, L. I. Rubina, O. N. Ulyanov</i>	
ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОНТЕЙНЕРА АППАРАТУРНОГО С БЛОКОМ МНОГОКАДРОВОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ	342
<i>А. А. Рякин, О. В. Койнов, М. В. Никульшин, О. С. Путилин</i>	

THERMAL ANALYSIS OF THE INSTRUMENTATION CONTAINER FOR THE MULTI-FRAME RECORDING SYSTEM IN THE LINEAR INDUCTION ACCELERATOR OF ELECTRONS	342
<i>A. A. Ryakin, O. V. Koinov, M. V. Nikulshin, O. S. Putilin</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА НЬЮТОНА С КВАДРАТИЧНОЙ ПОПРАВКОЙ И ТЕОРЕМА О ЕГО ЛОКАЛЬНОЙ СХОДИМОСТИ	342
<i>M. B. Саликова, П. Ю. Емельянов, М. В. Пчелинцев</i>	
OPTIMIZATION OF THE NEWTON'S METHOD WITH QUADRATIC CORRECTION AND THE THEOREM OF ITS LOCAL CONVERGENCE	343
<i>M. V. Salikova, P. Y. Emelyanov, M. V. Pchelintsev</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХФАЗНЫХ СРЕДАХ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕЧЕНИЙ.	344
<i>A. A. Серёжкин, И. С. Меньшов</i>	
MODELING OF SHOCK WAVE PROCESSES IN TWO-PHASE MEDIUM IN WIDE RANGE OF REGIMES OF FLOW.	344
<i>A. A. Serezhkin, I. S. Menshov</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА	344
<i>E. M. Сорокина, А. Г. Обухов</i>	
MATH MODELING INITIAL STAGE CONVECTIVE GAS FLOW	345
<i>T. M. Sorokina, A. G. Obukhov</i>	
ПОЛУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ	346
<i>O. D. Ступина</i>	
GETTING A SYSTEM OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS NECESSARY FOR THE SOLUTION OF AN INITIAL-BOUNDARY VALUE PROBLEM WITH THE HELP OF TRIGONOMETRIC SERIES	346
<i>O. D. Stupina</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ	347
<i>K. A. Талала, К. В. Хищенко, А. П. Яловец</i>	
SIMULATION OF DYNAMIC EFFECTS IN POLYMER COMPOSITES	347
<i>K. A. Talala, K. V. Khischenko, A. P. Yalovets</i>	
МЕТОД РАСЩЕПЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ, РЕШАЕМЫХ SPH-МЕТОДОМ	348
<i>H. A. Скоркин, Е. З. Теляшова</i>	
SPLITTING METHOD IN PROBLEMS OF THE CONTINUUM MECHANICS WITH THE AXIAL SYMMETRY, SOLVED BY A SPH-METHOD	348
<i>N. A. Scorkin, E. Z. Telyashova</i>	
ОБ АППРОКСИМАЦИОННОЙ ВЯЗКОСТИ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ И РАСЧЕТЫ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	349
<i>O. O. Топорова, Ю. В. Янилкин, А. Л. Стадник</i>	
ON THE APPROXIMATION VISCOSITY OF DIFFERENCE SCHEMES AND VISCOUS FLUID FLOW SIMULATIONS	349
<i>O. O. Toporova, Yu. V. Yanilkin, A. L. Stadnik</i>	
О ДВУХ ПОДХОДАХ К ЗАДАЧЕ ОБ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ ИДЕАЛЬНЫМ ГАЗОМ	350
<i>L. I. Рубина, О. Н. Ульянов</i>	
ON TWO APPROACHES TO THE PROBLEM OF IDEAL GAS FLOW AROUND BODIES	350
<i>L. I. Rubina, O. N. Ulyanov</i>	

О РАЗВИТИИ АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ СЕТОК В КОНСТРУКЦИЯХ, ОБРАЗОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯМИ ВРАЩЕНИЯ	351
<i>A. И. Анучина, Н. А. Артемова, В. А. Гордейчук, О. В. Ушакова</i>	
ON THE DEVELOPMENT OF GRID GENERATION ALGORITHMS FOR CONSTRUCTIONS OBTAINED BY THE SURFACES OF ROTATION	352
<i>A. I. Anuchina, N. A. Artemova, V. A. Gordeichuk, O. V. Ushakova</i>	
ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ	352
<i>В. Е. Фёдоров, Н. В. Филин</i>	
EXACT SOLUTIONS FOR EQUATIONS SYSTEM OF TWO-PHASE MIXTURE DYNAMICS	353
<i>N. V. Filin, V. E. Fedorov</i>	
КОД 3DLINE И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ФАЗОВОЙ ПЛАСТИНЫ	354
<i>А. Ю. Крукковский, А. А. Миронов, С. В. Попруженко, И. П. Цыгвинцев</i>	
3DLINE CODE AND ITS APPLICATIONS FOR DYNAMIC PLASMA PHASE PLATE SIMULATION	354
<i>A. Yu. Krukovskiy, A. A. Mironov, S. V. Popruzhenko, I. P. Tsygvintsev</i>	
НЕЯВНЫЕ КОНЕЧНО-ОБЪЕМНЫЕ МЕТОДЫ С TVD-РЕКОНСТРУКЦИЕЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В P_1 -ПРИБЛИЖЕНИИ.	355
<i>А. Д. Гаджиев, И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков</i>	
IMPLICIT FINITE-VOLUME TVD METHODS FOR SOLVING THE 2D HEAT TRANSFER EQUATION IN P_1 APPROXIMATION	355
<i>A. D. Gadzhiev, I. S. Chubareshko, A. A. Shestakov</i>	
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СМЕШАННЫХ ЯЧЕЕК И РАЗРУШЕНИЯ В МЕТОДИКЕ ГРАД.	355
<i>М. М. Шатов</i>	
IMPROVEMENTS IN THE MIXED CELL AND FAILURE SIMULATION ALGORITHM OF THE GRAD CODE	356
<i>М. М. Shatov</i>	
НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В ЗОНЕ ОТРЫВА ПЕРЕД ЩИТКАМИ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ В КОРМОВОЙ ЧАСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	356
<i>Ю. В. Грахов, Ю. А. Мокин, В. И. Хлыбов, Р. К. Швалева</i>	
RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF FLOW PARAMETERS IN SEPARATION ZONE IN FRONT OF FLAPS IN BOTTOM OF FLIGHT VEHICLES	357
<i>Yu. V. Grakhov, Yu. A. Mokin, V. I. Khlybov, R. K. Shvaleva</i>	
МЕТОД ВДЭФ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ.	358
<i>А. А. Шестаков</i>	
THE CDE METHOD FOR SOLVING THE RADIATIVE TRANSFER EQUATION IN DIFERENT APPROXIMATIONS	358
<i>A. A. Shestakov</i>	
О МОНОТОННОЙ АППРОКСИМАЦИИ СИСТЕМЫ P_1 -УРАВНЕНИЙ	358
<i>А. А. Шестаков</i>	
A MONOTONE P_1 APPROXIMATION	358
<i>A. A. Shestakov</i>	
МЕТОДЫ И СХЕМЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ, СОЗДАННЫЕ В РФЯЦ – ВНИИТФ.	358
<i>А. А. Шестаков</i>	
METHODS AND SCHEMES DEVELOPED AT RFNC – VNIITF FOR SOLVING THE RADIATIVE TRANSFER EQUATION IN DIFFERENT APPROXIMATIONS	359
<i>A. A. Shestakov</i>	

РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ РЕШЕНИЙ С ЧАСТИ ГРАНИЦЫ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ	359
<i>С. И. Кабанikhин, М. А. Шишленин</i>	
REGULARIZATION OF THE SOLUTION CONTINUATION OF EQUATIONS FOR PDE FROM THE PART OF THE BOUNDARY	359
<i>S. I. Kabanikhin, M. A. Shishlenin</i>	
ЗАДАЧИ ТЕПЛОВОЙ ТОМОГРАФИИ	360
<i>С. И. Кабанikhин, М. А. Шишленин</i>	
THE INVERSE PROBLEMS OF HEAT TOMOGRAPHY	360
<i>S. I. Kabanikhin, M. A. Shishlenin</i>	
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЩЕПЛЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ	360
<i>Н. Я. Моисеев, В. М. Шмаков</i>	
MODIFIED SPLITTING METHOD TO SOLVE THE UNSTEADY-STATE KINETIC EQUATION OF PARTICLE TRANSFER	361
<i>N. Ya. Moiseev, V. M. Shtakov</i>	
АНИЗОТРОПНАЯ МОДЕЛЬ ЗАМЫКАНИЯ В СМЕШАННЫХ ЯЧЕЙКАХ	361
<i>Ю. В. Янилкин, О. О. Топорова, В. Ю. Колобянин</i>	
ANISOTROPIC CLOSURE MODEL IN MIXED CELLS	362
<i>Yu. V. Yanilkin, V. Yu. Kolobyenin, O. O. Toporova</i>	
ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О ПРОХОЖДЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ СМЕСЬ ДВУХ ГАЗОВ	362
<i>Ю. В. Янилкин, Л. Г. Королева</i>	
DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF A SHOCK WAVE PASSING THROUGH THE MIXTURE OF TWO GASES	363
<i>Yu. V. Yanilkin, L. G. Koroleva</i>	
Авторский указатель	365
Index	373

Забабахинские научные чтения:

Сборник тезисов докладов XIII Международной конференции 20–24 марта
2017. – РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск

**Тезисы докладов публикуются в авторском изложении
без корректорской и редакторской правок.**

Подписано в печать 20.02.2017
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 49,29
Тираж 450 экз. Заказ №

Отпечатано в соответствии с оригинал-макетом,
подготовленным информационно-издательской группой РФЯЦ – ВНИИТФ,
в ОАО «ИПП «Уральский рабочий».
620990, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 13.
<http://www.uralprint.ru>, e-mail: sales@uralprint.ru