

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ:

обзор современных расчетов

В. В. ВАТУЛИН

Теоретические и расчетные исследования экстремальных процессов и создание расчетно-теоретической базы моделирования физических процессов в задачах механики сплошных сред, физики высоких плотностей энергий и др. составляют значительную часть работы физиков-теоретиков ВНИИЭФ. Расскажем только о некоторых таких исследованиях.

1. Модель кинетики детонации (МК) взрывчатых веществ была создана во ВНИИЭФ коллективом теоретиков и математиков под руководством В. Г. Морозова (И. И. Карпенко и др.). Ключевым моментом при создании модели являлось требование описывать в расчете обострение ударно-волновой чувствительности твердых гетерогенных ВВ в волне разгрузки (сенсбилизация) и его снижение при предварительном нагружении ударной волной (десенсбилизация). Использование модели позволяет численно моделировать инициирование ВВ при многократном воздействии ударных волн. Тестирование модели проведено на специальных одномерных опытах и широком наборе рентгенографических экспериментов. Ниже представлена рентгенограмма взаимодействия детонационной и ударной волны в ВВ на основе ТАТБ с нанесенными изолиниями плотности из расчета, проведенного в методике ЛЭГАК с использованием модели МК (рис. 1).

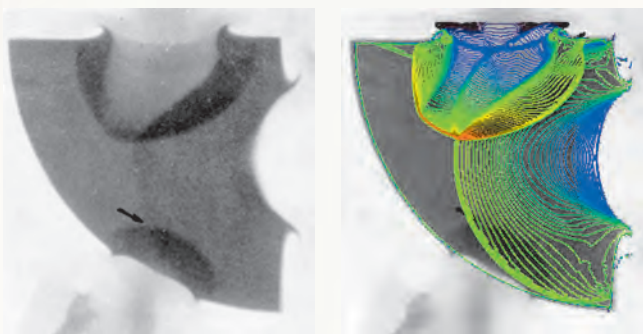


Рис. 1. Сравнение рентгенографического эксперимента (изолинии плотности совмещены с рентгенограммой) и расчета в опыте по взаимодействию ударных и детонационных волн в ВВ на основе ТАТБ. ВВ подрывалось в трех точках

2. Двумерные расчеты (С. Ф. Гаранин и др.) показывают, что при разгоне лайнеров с помощью спирального взрывомагнитного генератора до скоростей ~ 8 км/с, несмотря на сильное искажение наружной поверхности лайнера из-за развития рэлей-тейлоровской неустойчивости, внутренняя поверхность может оставаться достаточно ровной. На рис. 2 приведены изолинии плотности Al-лайнера, разгоняемого с помощью токов

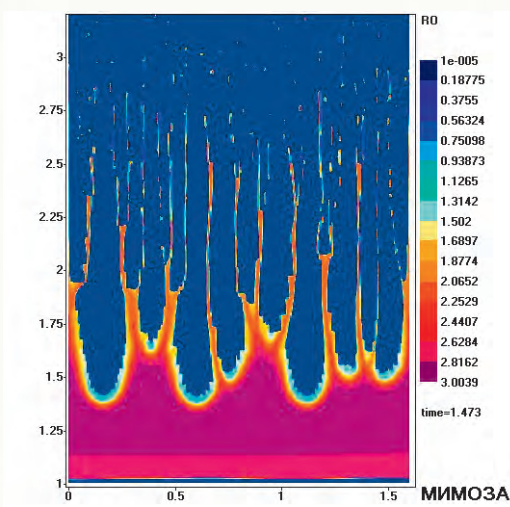
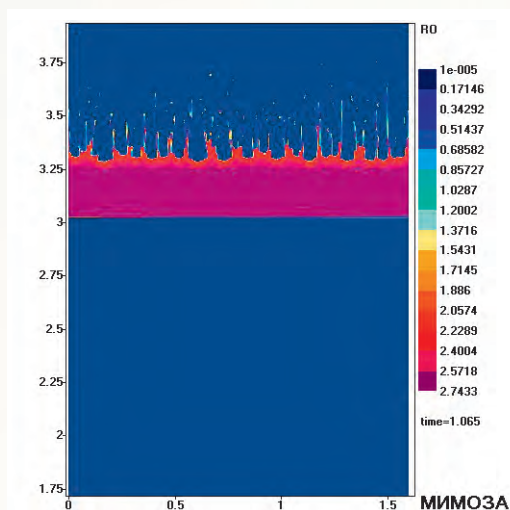


Рис. 2. Изолинии плотности Al-лайнера

ВМГ ~19 МА спирального взрывомагнитного генератора, полученные в расчете на моменты времени, соответствующие положениям внутренней поверхности лайнера $R_{in} = 3$; 1 см соответственно (начальный радиус 4 см).

3. Задача о формировании турбулентной плавучей струи возникает как в связи с естественными точечными тепловыми источниками, так и с промышленными, в частности, возникающими в результате аварийных ситуаций. На нижеследующих рис. 3 (а, б) показаны промежуточная ($t=1,21$) и достаточно поздняя ($t=1,96$) установившаяся стадии развития струи от стационарного источника, полученные в результате ее прямого 3D численного моделирования.

4. Отработана технология и освоены расчеты задач разрушения материалов методом кластерной динамики (В. Н. Пискунов и др.). Результаты одного из расчетов задачи выхода ударной волны на профилированную поверхность представлены на рис. 4.

5. Значительное внимание в программе исследований по инерциальному синтезу уделяется разработке численных методик, позволяющих описывать трехмерный перенос лазерного и рентгеновского излучений внутри боксов-конверторов лазерных мишеней. Созданные в ИТМФ в сотрудничестве с ИЛФИ численные методики позволяют проводить спектральные расчеты различного уровня приближения к реальной геометрии экспериментов.

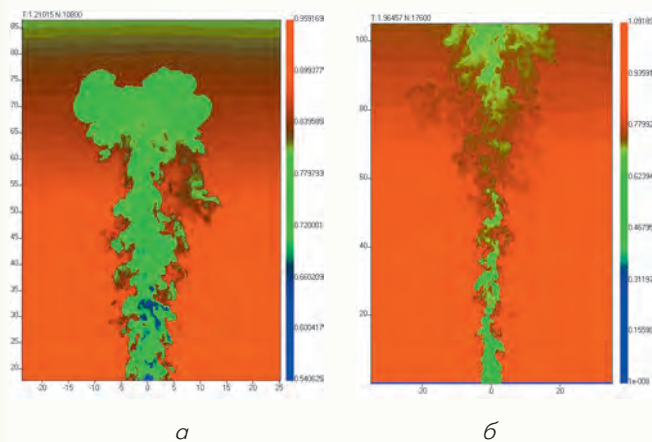


Рис. 3. Растровые картины плотности: а) $t = 1,21$; б) $t = 1,96$

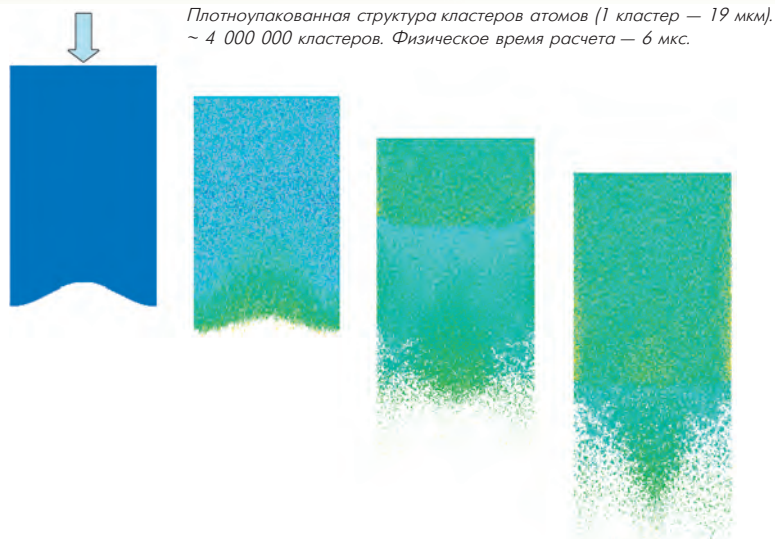


Рис. 4. Моделирование методом кластерной динамики выхода ударной волны на профилированную поверхность алюминиевой пластины

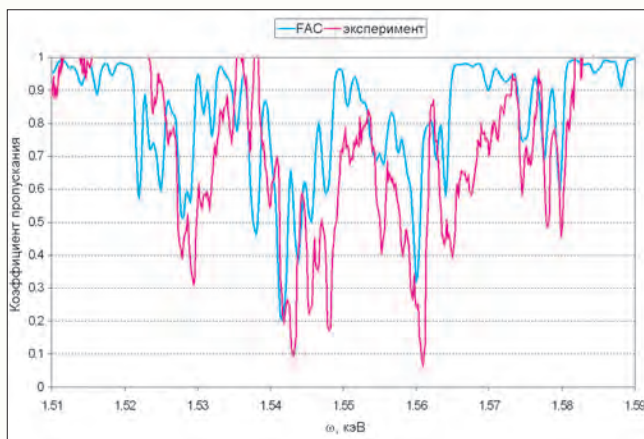


Рис. 5. Сравнение расчетного коэффициента пропускания через Al при $T = 50$ эВ и $\rho = 0,02$ г/см³ и результата эксперимента на установке «ИСКРА-5»

На установке «Искра-5» проводятся исследования экспериментальных спектров поглощения алюминия. При рассмотрении экспериментов с алюминием при температуре ~50 эВ в спектральном диапазоне $\omega = 1,5-1,6$ кэВ, где, в основном, присутствуют линии поглощения для Al^{+6} , Al^{+7} , Al^{+8} и Al^{+9} для переходов $1s^2 2p^k \rightarrow 1s^1 2p^{k+1}$, наилучшее согласие было достигнуто для расчетов по программе TH-BASE с использованием баз данных FAC. Приведенное на рис. 5 сравнение (В. Ф. Ермолович, В. А. Карепов) показало, что результаты расчетов в целом неплохо передают экспериментальные спектры поглощения.

На лазерной установке «Искра-5» проводятся эксперименты по генерации ударных волн в раз-

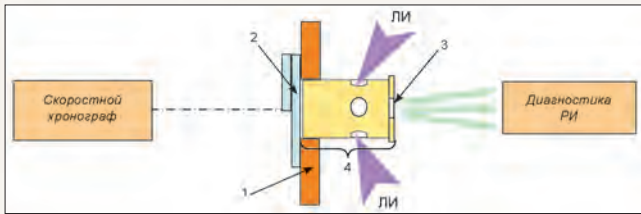


Рис. 6. Принципиальная схема экспериментов: 1 — антибликовый экран; 2 — образец исследуемого материала; 3 — выходное окно для регистрации потока рентгеновского излучения (РИ); 4 — иллюминатор; ЛИ — лазерное излучение

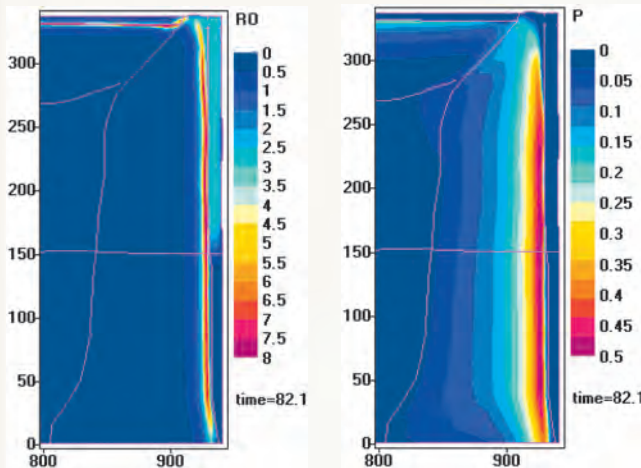


Рис. 7. Пространственное распределение плотности (слева) и давления (справа) на момент выхода ударной волны из базового слоя алюминия толщиной 20 мкм

личных материалах при непрямом (рентгеновском) облучении в мишенях типа «Иллюминатор» (рис. 6).

Выполнено расчетное моделирование опытов с расположением исследуемого материала (алюминий двух толщин) на торце мишени (В. В. Ватулин, П. Г. Кузнецов). Для лазерного импульса второй гармоники (длина волны $\lambda = 0,66$ мкм) длительностью $\tau_{0,5} = 0,5$ нс и энергией 900 Дж получена максимальная температура излучения на внутренней поверхности слоя алюминия 191 эВ, скорость ударной волны в базовом слое алюминия толщиной 20 мкм ~ 32 км/с, в ступеньке толщиной 10 мкм ~ 49 км/с. Максимальное давление в 100 Мбар за фронтом ударной волны в алюминии составляет ~ 50 Мбар. В аналогичных опытах со свинцовым слоем давление ~ 90 Мбар.

6. Во ВНИИЭФ для анализа результатов экспериментов выполнены расчеты кривых холодного сжатия ряда металлов «из первых принципов» с использованием теории функционала плотности и эффективных методов решения трехмерной задачи для электронной плотности в кристалличе-

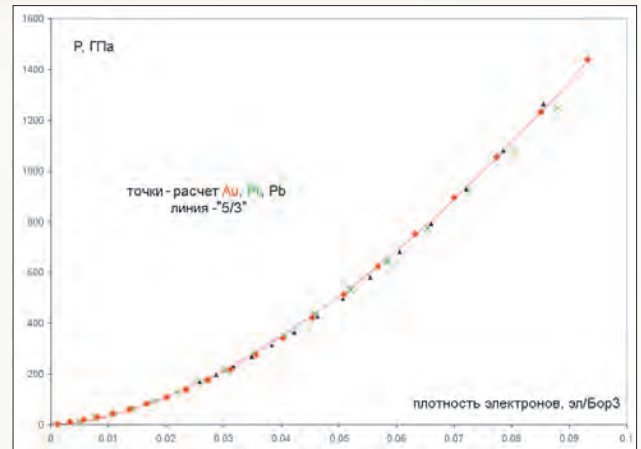


Рис. 8. Зависимость давления от приращения величины электронной плотности

ской ячейке показали хорошее согласие с экспериментальными данными (В. А. Карепов).

Оказалось, что зависимость давления от приращения плотности электронов в ячейке для рассмотренных элементов (~ 10) близка к степенной «5/3». На рис. 8 она приведена для Au, Pt, Pb.

7. В 2010 г. в ходе визита делегации ВНИИЭФ в Германию был подписан меморандум о проведении совместных исследований в области физики высокой плотности энергии с институтом GSI (Дармштадт, Германия). На фотографии (рис. 9) запечатлен момент подписания меморандума научным руководителем ВНИИЭФ академиком Р. И. Ильяевым и научным директором ГСИ профессором Х. Стокером.

Изучается возможность реализации инерциального термоядерного синтеза с использованием импульсных потоков тяжелых ионов. В ИТМФ в содружестве с ИТЭФ и немецкими коллегами из института GSI (Дармштадт) проводится широкий спектр теоретических и экспериментальных исследований в этой области. Конечная цель работы — выполнить замкнутый комплекс исследований систем инерциального термоядерного синтеза с тяжелоионным драйвером.

В связи с этим изучается так называемый режим fast ignition. В этом случае первичной порцией энергии драйвера термоядерная область сжимается сферически до высоких плотностей при сравнительно низкой температуре. На второй стадии часть сжатого термоядерного горючего разогревается за короткое время мощным импульсом (ионным или лазерным). В разогретой части горючего инициируется термоядерное горение, которое далее должно распространиться на все термоядерное горючее. Однако при одно-

стороннем облучении ионным потоком возникает неоднородность в выделении энергии по углу. Исследования (В. В. Ватулин, А. С. Гнутов) показывают, что, оптимизируя параметры пучка ионов и мишени, можно получить высокую степень сжатия вещества оболочки и внутренней газовой области при реальных параметрах ионного пучка. На рис. 10 приведено распределение энергии внутри мишени при двух значениях энергии ионов.

8. Для расчета работы ядерных и термоядерных систем чрезвычайно важным является аккуратный расчет процессов переноса нейтронов. Для тестирования численных методик определены точные соотношения подобия, вытекающие из кинетического уравнения для нейтронов (Н. Б. Бабичев, И. В. Лутиков, В. П. Незнамов и др.). Найдены общие решения задачи на собственные значения, которые позволяют понять, от каких физических величин и каким образом зависит временная часть функции распределения нейтронов в произвольной системе. Получены точные решения однообластной и двухобластной нестационарной задачи Милна, справедливые в том случае, когда хотя бы одна среда размножает нейтроны. С помощью точных соотношений подобия и аналитических решений выполнена верификация некоторых математических методик численного решения кинетического уравнения.

Получены функции Грина (С. А. Холин, И. М. Анисина, А. Ю. Мадянов, опубликовано в *Transport Theory and Statistical Physics*) для односкоростного нестационарного и стационарного кинетических уравнений в однородной изотропной среде с индикатрисой рассеяния разложимой в конечный ряд по полиномам Лежандра. Проведено сравнение с результатами расчетов по программе Монте-Карло.

9. Вопросы общей теории относительности. В 1980–1990-х гг. сотрудниками ВНИИЭФ М. В. Горбатенко, А. В. Пушкиным и Ю. А. Романовым был предложен вариант геометродина-



Рис. 9. Подписание меморандума о научном сотрудничестве ВНИИЭФ и ГСИ в области физики высокой плотности энергии (ГСИ, Дармштадт, май 2010 г.)

мики, основанный на обобщенных уравнениях общей теории относительности. Оказалось, что обобщенные уравнения инвариантны относительно конформных преобразований; это — конформная геометродинамика. Доказано, что уравнения для конформных (вейлевских) степеней свободы в плоском пространстве содержат в себе единое описание не только тензорных полей (т. е. фотонов, глюонов, гравитонов, W , Z -бозонов), но и биспинорных полей (т. е. лептонов, кварков). Для уравнений конформной геометродинамики найден новый класс точных решений сферически симметричной задачи — нестационарные решения. В рамках общей теории относительности решений такого типа не существует.

М. В. Горбатенко и В. П. Незнамовым решена проблема единственности и эрмитовости гамильтонианов для дираковских частиц со спином S в стационарных гравитационных полях. Работа принята в журнал *Phys. Rev. D*.

10. В. П. Незнамовым (РФЯЦ-ВНИИЭФ) и А. Я. Силенко (ОИЯИ, Дубна) выполнена работа «Волновые функции в представлении Фолди-

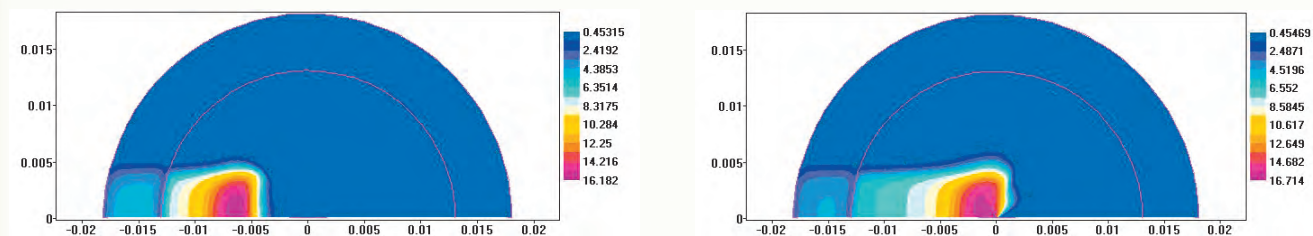


Рис. 10. Распределение энергии от источника в начальные моменты времени. Брегг-пик во внешней части ДТ-области (слева); Брегг-пик в центре системы (справа)

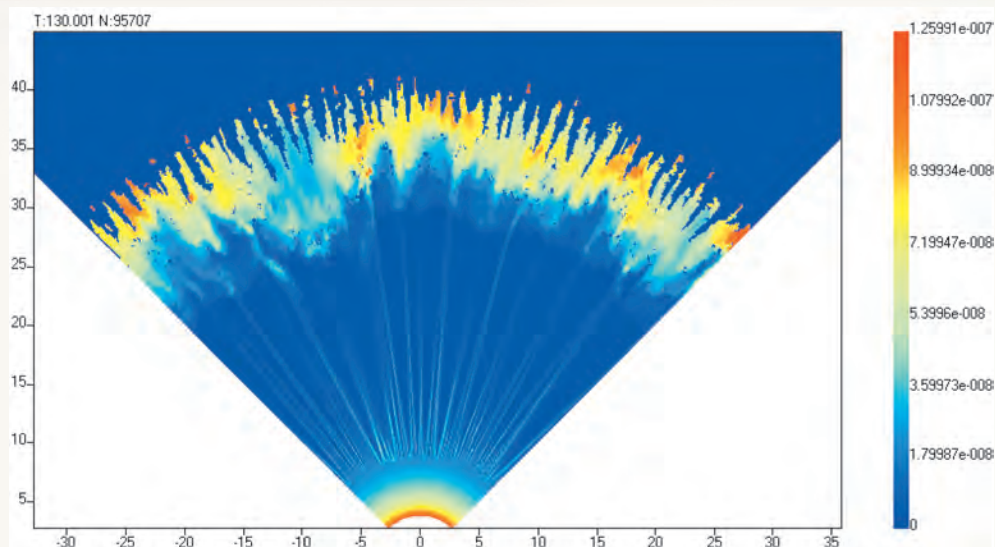


Рис. 11. Поле плотности пульсарного ветра, $t = 130$ лет

Ваутхайзена и условия перехода от дираковского представления к представлению Фолди-Ваутхайзена».

В. П. Незнамовым развиты работы группы В. Г. Кадышевского (ОИЯИ) по модели квантовой теории поля с максимальной массой M и использованием пространства анти де Ситтера.

В. П. Незнамовым подготовлен к печати обзор «Использование изотопического представления в квантовой теории поля»: стандартная модель в изотопическом представлении Фолди-Ваутхайзена без бозонов Хиггса в фермионном секторе и изотопическое представление Фолди-Ваутхайзена и киральная симметрия.

11. Астероидная опасность. А. К. Шаненко рассмотрел процесс воздействия ядерных зарядов на опасные космические объекты с целью предотвращения столкновения с Землей. Основное внимание уделено анализу двух задач: сообщение малым космическим телам импульса, способного отклонить их траекторию на безопасное расстояние от планеты; разрушение этих тел ядерным взрывом на части, достаточно мелкие по сравнению с исходным телом, чтобы встреча их с Землей не привела к катастрофе. Показано, что для отклонения траектории астероидов радиусом 1000 м и 100 м с типичной для них плотностью $3,4 \text{ г/см}^3$ на два радиуса Земли при ожидаемом времени столкновения с Землей 10 суток энерговыделение взрыва должно быть $\sim 200 \text{ Мт}$ и 200 кт ТЭ соответственно.

12. Плазменные процессы в атмосфере. С использованием численного 2D-моделирования, выполненного в ИТМФ (В. А. Жмайло, В. П. Ста-

ценко, А. В. Городничев), удается получить зону турбулентного перемешивания оболочки сверхновой и плазменного «ветра», истекающего из пульсара, расположенного в центре сверхновой. Ширина и структура зоны (см. рис. 11) близки к наблюдаемым в Крабовидной туманности.

13. Реализован новый метод решения уравнения Дирака для гелие- и литиеподобных ионов трансурановых элементов. С использованием идей метода многомерных угловых функций (А. А. Садовой) аналитически решено уравнение Дирака для многоэлектронных ионов тяжелых элементов высокой кратности ионизации. Получены (А. А. Садовой, А. С. Ульянов) аналитические выражения энергии связи ионов ряда трансурановых элементов, хорошо согласующиеся с расчетами по другим методикам, и аналитические выражения для волновых функций основного и возбужденных состояний гелие- и литиеподобных ионов тяжелых элементов, которые позволяют в аналитическом виде исследовать свойства трансурановых элементов с учетом корреляционных эффектов.

ВАТУЛИН Владимир Владимирович –
начальник отдела ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор физ.-мат. наук, лауреат
Государственной премии