

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**К 65-летию образования
Российского федерального ядерного центра —
Всероссийского научно-исследовательского института
экспериментальной физики**

*Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 6 октября 2010 г.*

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104g.0405

6 октября 2010 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН, посвящённая 65-летию образования Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ).

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.gpad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Илькаев Р.И.** (РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.). *Вступительное слово "О фундаментальных физических исследованиях в РФЯЦ – ВНИИЭФ".*
2. **Михайлов А.Л.** (РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.). *Гидродинамические неустойчивости в различных средах.*
3. **Трунин Р.Ф.** (РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.). *Исследования экстремальных состояний металлов с помощью ударных волн.*
4. **Ивановский А.В.** (РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.). *Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных исследованиях.*
5. **Подурец А.М.** (РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.). *Рентгенографические исследования структуры вещества в ударных волнах.*
6. **Гаранин С.Г.** (РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.). *Мощные лазеры в исследованиях физики горячей плотной плазмы и термоядерного синтеза.*
7. **Селемир В.Д.** (РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.). *Физические исследования в сверхсильных магнитных полях.*
8. **Мхитарьян Л.С.** (РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.). *Газодинамический термоядерный синтез.*

Статьи, написанные на основе докладов 1–7, публикуются ниже. Расширенное содержание доклада 3, представленное в виде обзора, будет опубликовано в одном из последующих номеров УФН.

PACS numbers: **01.65.+g, 28.52.-s, 28.70.+y**
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104h.0405

**О фундаментальных физических
исследованиях во Всероссийском
научно-исследовательском институте
экспериментальной физики**

Р.И. Илькаев

1. Введение

Настоящая статья открывает цикл материалов, посвящённых работам в Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) в области физики высоких плотностей энергии. Исторически развитие многих областей этой науки неразрывно связано с исследованиями в области создания ядерного и термоядерного оружия.

РФЯЦ – ВНИИЭФ был создан 9 апреля 1946 г. Главной задачей института являлись сначала разработка первой советской атомной бомбы, затем — первых образцов термоядерного оружия и в дальнейшем — создание опытных образцов ядерных и термоядерных зарядов различных типов и назначения. В рамках нашей основной деятельности был получен целый ряд фундаментальных физических результатов.

Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики является крупнейшим в стране научно-исследовательским институтом, решающим сложные задачи оборонного, научного, а также хозяйственного значения. Институт внёс определяющий вклад в решение задач создания ядерного и термоядерного оружия в нашей стране, ликвидацию атомной монополии США. Деятельность института обеспечила достижение

Р.И. Илькаев. ФГУП "Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ
E-mail: ilkaev@vniiief.ru



Первая атомная бомба СССР. Ядерный заряд испытан 29 августа 1949 г. на Семипалатинском полигоне. Мощность заряда 22 кт тротилового эквивалента.



Первая тактическая серийная атомная бомба. Испытана в 1953 г. на Семипалатинском полигоне. Мощность заряда 30 кт тротилового эквивалента.



Первая водородная бомба. Заряд испытан 12 августа 1953 г. на Семипалатинском полигоне. Мощность заряда 400 кт тротилового эквивалента.



Здание Института теоретической и математической физики РФЯЦ – ВНИИЭФ.

ние ядерного равновесия в период холодной войны и способствовала балансу сил в мире, который удержал человечество от глобальных военных конфликтов.

Во ВНИИЭФ работали такие выдающиеся учёные, как И.В. Курчатов, Ю.Б. Харiton, Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров, Н.Н. Боголюбов, М.А. Лаврентьев, И.Е. Тамм, Г.Н. Флёрков, Е.А. Негин, С.Г. Kocharyan, А.И. Павловский, Ю.А. Бабаев, С.Б. Кормер и др., создавшие в институте многое из того, чего достигла и чем гордится отечественная наука. В институте созданы и развиваются крупные школы физиков, математиков, конструкторов, технологов, химиков.

Главная задача ядерного центра сегодня — обеспечение и поддержание надёжности и безопасности ядерного оружия России.

РФЯЦ – ВНИИЭФ обладает мощными расчётной, экспериментальной, испытательной, технологической и производственной базами, позволяющими оперативно и качественно решать возлагаемые на него задачи.

В состав РФЯЦ – ВНИИЭФ входят несколько институтов: теоретической и математической физики, экспериментальной газодинамики и физики взрыва, ядерной и радиационной физики, лазерно-физических исследова-

ний, центр высоких плотностей энергии, а также конструкторские бюро и тематические центры, объединённые общим научным и административным руководством.

Высокий научно-технический потенциал позволяет РФЯЦ – ВНИИЭФ расширять сферу исследований и разработок и быстро внедряться в новые области высоких технологий, получать и успешно осваивать научные результаты мирового уровня, проводить уникальные фундаментальные и прикладные исследования. Это позволяет связывать будущее нашего института с его преобразованием в Национальный центр безопасности Российской Федерации.

2. Газодинамика

В прикладном плане газодинамические исследования РФЯЦ – ВНИИЭФ определялись и определяются решением различных задач импльзии делящихся материалов энергией взрыва химических взрывчатых веществ (ВВ).

К фундаментальным результатам в этой области, прежде всего, относятся:

- определение уровней кумуляции энергии взрыва ВВ в условиях сферически симметричных, осесимметричных и трёхмерных нагрузений металлов и выводы о степени устойчивости такой кумуляции;
- реализация точности схождения ударной волны в центре сферических и осесимметричных систем на уровне $\leq 3 \times 10^{-3}$ размера системы;

- достижение уровней сжатия металлов в имплозивных системах более чем в 7 раз по отношению к их начальной плотности.

Газодинамические исследования связаны с серией работ по определению уравнений состояния многих веществ в области ударно-волновых нагрузений, в том числе при давлениях до уровня ~ 10 ТПа.

Следует также особо выделить выводы об особенностях кумуляции энергии в выраженных несимметричных условиях газодинамических течений, которые лежат в основе решения задачи ядерной взрывобезопасности ядерного оружия.

В РФЯЦ–ВНИИЭФ детально исследован целый ряд вопросов физики детонационных процессов, включая возбуждение детонации, устойчивость её распространения и процесс передачи детонации через инертные экраны. В этой области сформулирована система критериев устойчивости и/или трансформации процессов.

Хотя система газодинамических исследований основана, прежде всего, на физических экспериментах (постановка которых и средства диагностики также разработаны в нашем институте), в РФЯЦ–ВНИИЭФ развиты прецизионные методы физико-математического моделирования газодинамики, включая трёхмерное (3D) моделирование. Можно сказать, что теория и эксперимент в этой области у нас прекрасно дополняют и обогащают друг друга.

Мы традиционно являемся одним из мировых лидеров газодинамических исследований в этой области и обязаны сохранить это лидерство, что требует поддержки созданных во ВНИИЭФ научных школ и систематического обновления экспериментальной базы.

Какая фундаментальная проблема не решена в этой области? Я бы отметил газодинамический термоядерный синтез.

Эта проблема вылилась в крупное направление исследований в середине 1950-х годов, так как представлялось очень заманчивым "зажечь" термоядерное горючее в условиях кумуляции в нём энергии взрыва ВВ. С тех пор проведено более ста крупных экспериментов, однако проблема не решена и, по-видимому, ещё далека от решения. Уровни сжатия центральных металлических оболочек достигают в этих условиях ≥ 50 , а плотность термоядерного горючего превышает 10^2 г см⁻³. Возможно, здесь мы имеем дело с принципиальным развитием неустойчивостей, уменьшение которых пока находится за пределами наших практических возможностей.

3. Радиационная газодинамика

Это направление фундаментальных исследований связано, прежде всего, с задачами разработки термоядерных зарядов. Здесь в основе лежит принцип радиационной имплозии, предполагающий:

- выход значительной части энергии при взрыве ядерного заряда (первичного модуля) в виде рентгеновского излучения;
- транспортировку энергии рентгеновского излучения к термоядерному модулю;
- имплозию термоядерного модуля с помощью энергии "доставленного" рентгеновского излучения.

Реализация каждой из трёх составных частей этого принципа основана на радиационной газодинамике.

Взрыв ядерного заряда, в котором основная часть энергии выделяется в нейтронно-ядерных реакциях в делящемся веществе, сопровождается трансформацией этой энергии в энергию рентгеновского излучения и тепловую энергию вещества, находящиеся в локальном термодинамическом равновесии (а также в кинетическую энергию среды). В веществе осуществляется перенос рентгеновского излучения, которое испускается с поверхности делящегося материала и далее распространяется внутри внешних областей первичного модуля.

Очевидно, что этот механизм существенно зависит от фундаментальных характеристик — пробегов рентгеновских квантов, на которых осуществляется их взаимодействие с веществом. Для веществ типа урана определяющее значение имеют процессы фотопоглощения и дискретно-дискретные переходы.

Исследования этой стадии процесса проводились в рамках как приближения лучистой теплопроводности, так и спектральной кинетики. В РФЯЦ–ВНИИЭФ был создан ряд физико-математических моделей радиационной газодинамики, которые адаптировались к вычислительным возможностям своего времени. В настоящее время мы используем 3D-модели в приближении лучистой теплопроводности и двумерные (2D) модели на основе спектрального кинетического уравнения переноса излучения, объединённые с уравнениями газодинамики.

Работы по расчёту пробегов излучения в различных средах в течение длительного времени выполнялись по нашим заданиям в Институте прикладной математики Академии наук. Сейчас применительно к новым вычислительным возможностям у нас созданы прецизионные программы вычисления спектральных пробегов излучения для различных веществ и условий, а также алгоритмы вычисления групповых и усреднённых пробегов в соответствии с потребностями моделей радиационной газодинамики.

Исследования процессов радиационной газодинамики позволили осуществить управление переносом рентгеновского излучения внутри первичного модуля и резко повысить качество модулей как источников энергии для радиационной имплозии, что было исключительно важно для практики.

Вторая часть принципа радиационной имплозии в основном связана с исследованиями в моделях радиационной газодинамики процессов отражения и прохождения рентгеновского излучения через слоистые конфигурации различных материалов, часто представляющих собой многоэлементные геометрические фигуры со сложной динамикой. Практическим результатом этих исследований было определение количества энергии, поступающей для радиационной имплозии термоядерных модулей. Если на первой стадии основным требованием являлась максимизация количества энергии рентгеновского излучения, выходящего из первичного модуля, то на второй стадии таким требованием стала минимизация потерь энергии.

Третья часть принципа радиационной имплозии связана с исследованиями трансформации энергии рентгеновского излучения в поле давления, обжимающего термоядерный модуль. Это поле, которое является сложным результатом процесса распространения излучения в различных материалах, имеет осесимметричную структуру. Для получения приемлемых результатов

сжатия термоядерного модуля необходимо преобразование осесимметричных граничных условий с целью достижения симметричного характера имплозии. Решение этой задачи требует управления потоками излучения и газодинамическими потоками как высокотемпературной, так и низкотемпературной высокоплотной плазмы, что обеспечивается в рамках 2D-моделей радиационной газодинамики.

Следует отметить, что особенности "граничных условий" таковы, что имплозия термоядерного модуля может быть как относительно устойчивой, так и неустойчивой. Существуют важные практические приложения, в которых процессы имеют трёхмерный характер, в связи с чем у нас развиты 3D-модели радиационной газодинамики. Отмечу, что уровень давлений радиационной имплозии, который определяет сжатие термоядерных модулей, составляет несколько сотен ТПа, а в процессе имплозии реализуются сжатия, при которых в несколько десятков раз превышается начальная плотность используемых веществ.

Основную роль в решении этих проблем играют методы физико-математического моделирования, что определяется как особенностями информации, полученной при испытаниях термоядерных зарядов, так и отсутствием таких возможностей в настоящее время. Крупнейшим экспериментальным результатом явилось определение "зон устойчивости" радиационной имплозии термоядерных модулей, а также определение физических факторов, выводящих за пределы этих зон.

Подчеркну, что радиационная газодинамика представляет собой выдающийся пример того, как фундаментальная научная дисциплина обеспечила проектирование конструкций, в которых переплелись сложнейшие физические процессы, в отношении ключевых параметров которых экспериментальные данные были крайне ограничены. Колossalные практические достижения, полученные на основе радиационной газодинамики, сделали нас, безусловно, лидерами в этой области, по крайней мере наши исследования находятся на одном уровне с исследованиями в США.

Какие проблемы мне представляются в связи с этим крайне важными?

Прежде всего, нам необходимо усилить экспериментальную базу для моделирования в лабораторных условиях особенностей физических процессов, которые имеют ту же природу, что и их аналоги в условиях радиационной имплозии. Такими установками являются мощные лазеры, разрабатываемые для целей лазерного термоядерного синтеза. В нашем институте действуют два прототипа такой установки, но их энергия недостаточна для осуществления необходимого моделирования. Требуется лазер с энергией ~ 1 МДж.

Установки этого класса существуют в США и во Франции, строятся в Великобритании и КНР. Хотя проект по созданию мощного лазера в интересах экспериментального исследования фундаментальных параметров радиационной имплозии был представлен нами в 1990-е годы, его реализация ещё не началась. Мы очень обеспокоены нашим отставанием, хотя вплоть до середины 1990-х годов ВНИИЭФ входил в этой области в число мировых лидеров. В последний год принципиальное решение о создании во ВНИИЭФ лазерной установки мегаджоульного уровня принято Президентом Российской Федерации.

4. Термоядерное горение

В нашем институте было разработано устройство (термоядерный заряд РДС-6с), в котором 12 августа 1953 г. впервые было реализовано горение термоядерного горючего. Это устройство, которое разрабатывалось как модель мощной "водородной" бомбы, широко известно под названием "слойки" А.Д. Сахарова. В рамках этого проекта был решён ряд фундаментальных задач.

Устройство представляло собой систему из чередующихся слоёв термоядерного материала (дейтерид-тритид лития и дейтерид лития) и урана с различным содержанием изотопа U-235 и обеспечивало их газодинамическую имплозию. Остановлюсь на этом подробнее, так как данное устройство можно рассматривать как физическую установку для осуществления импульсной термоядерной реакции.

Во-первых, для первоначального нагрева термоядерного материала обеспечивался ядерный взрыв центрального ядра из U-235. При этом для зажигания термоядерного материала было важно, чтобы он также подвергался процессу имплозии. Во-вторых, при установлении изотермического режима между термоядерным материалом и окружающим ураном происходило дополнительное сжатие термоядерного материала вследствие выравнивания давлений (известно как процесс "сахаризации"). В-третьих, горение термоядерного материала происходило в режиме термодинамического равновесия между излучением и веществом. В-четвёртых, деление урана "термоядерными" нейtronами обеспечивало дополнительное возрастание температуры среды и ускорение термоядерных реакций, затем дополнительное деление урана и т.д.

Следует отметить, что "слоёный" термоядерный заряд рассматривался в 1946–1947 гг. Э. Теллером в США. Однако такой заряд никогда в США не был создан. Одним из факторов, повлиявших на это, были ограниченные возможности масштабирования энерговыделения, другим являлся фундаментальный фактор — возможное развитие неустойчивостей при имплозии слоёной системы на начальной стадии её горения.

В нашей разработке придавалось большое значение вопросам обеспечения прецизионности газодинамической имплозии, и эксперимент подтвердил отсутствие значимого влияния газодинамических неустойчивостей на термоядерное горение.

Проблема масштабирования энерговыделения была решена на пути радиационной имплозии. Когда в 1954 г. возможности этого принципа были осознаны, у нас уже фактически был создан прототип термоядерного модуля, которым явилась центральная часть РДС-6с. Теперь в новых условиях многократно более мощной имплозии термоядерный модуль существенно увеличил энерговыделение (в качестве термоядерного материала использовался дейтерид лития). Этот принцип был реализован 22 ноября 1955 г. в испытании РДС-37. Существенно, что влияние гидродинамических неустойчивостей на термоядерное горение не проявилось и при переходе к этому новому виду имплозии.

В дальнейшем в натурных испытаниях термоядерных зарядов различных типов стали встречаться случаи, в которых термоядерное горение не соответствовало расчётным результатам. Со временем при совершенствовании физико-математических моделей и росте вычисли-

тельных возможностей в ряде случаев было обнаружено сильное возрастание крупномасштабных гидродинамических неустойчивостей, приводивших к снижению эффективности термоядерного горения.

В рамках программы создания термоядерных зарядов были получены весьма совершенные образцы, которые и сегодня составляют основу ядерного сдерживания и по качеству заведомо не уступают американским аналогам.

Какую проблему хотелось бы здесь отметить? Не все результаты натурных испытаний термоядерных зарядов получили последовательное физическое объяснение. Это означает, что не все особенности термоядерного горения в подобных устройствах до конца поняты, и мы работаем над дальнейшим совершенствованием физико-математических моделей в этой области. Подчеркну, что одновременно для этого требуется дальнейший рост вычислительных возможностей.

5. Бустинг

Фундаментальным достижением физики высоких плотностей энергии явилось осуществление зажигания и устойчивого режима горения тритий-дейтериевой (TD) смеси в ядерных зарядах, известного как бустинг. С практической точки зрения, это привело к существенному прогрессу в габаритно-массовых параметрах ядерных зарядов, к повышению их безопасности и устойчивости работы в условиях определённых воздействий.

Физически это очень сложный режим, поскольку зажигание TD-смеси осуществляется при относительно низких температурах, реализуемых на начальной стадии ядерного взрыва, а сама TD-смесь к этому моменту представляет собой сложную гетерогенную структуру с окружающим её делящимся материалом. Исключительную роль в решении этой задачи играют газодинамические исследования, в том числе с помощью радиографических методов. Именно радиографические эксперименты показали, что при выполнении определённых критериев потенциально неустойчивый режим имплозии TD-смеси и окружающего её делящегося материала может быть реализован в виде устойчивого конечного состояния.

Реализация бустинга тесно связана с методами физико-математического моделирования, и у нас разработан целый ряд методик, сочетающих прецизионные расчёты в полуфеноменологической постановке. Отмечу, что на основе газодинамических исследований и методов физико-математического моделирования нами разработан ряд способов управления бустингом. Эти возможности управления имеют исключительную практическую ценность.

Здесь я обозначу одну существенную проблему. Конфигурация "критической" области, определяющая бустинг, является принципиально трёхмерной. Для её достаточно точного определения необходимы трёхмерные программы газодинамики, включающие в себя описание детонации ВВ, а учёт особенностей горения этой конфигурации требует трёхмерных расчётов радиационной газодинамики и нейтронно-ядерного взаимодействия. В связи с необходимостью учёта специфических характеристик "критической" области для этого необходимы существенно более мощные вычислительные возможности, чем те, которыми мы пока располагаем.

6. Термоядерное инициирование

Фундаментальные трудности осуществления инерциального термоядерного синтеза хорошо известны. В РФЯЦ – ВНИИЭФ эта проблема была частично решена. В этих целях сферическая система, содержащая термоядерное горючее и не содержащая делящихся материалов, была подвергнута в 1962 г. радиационной имплозии. В результате удалось обеспечить зажигание термоядерного материала с небольшим энерговыделением. В том же 1962 г. было проведено ещё два успешных эксперимента, в которых было обеспечено термоядерное инициирование дейтерида лития. При этом термоядерная инициирующая система (ТИС) использовалась для зажигания других слоёв термоядерного горючего.

Это было очень крупное достижение, основанное на фундаментальных выводах об исключительной роли симметрии обжатия ТИС и возможности её практического обеспечения.

Сама идея ТИС в рамках радиационной имплозии была сформулирована в 1954 г., и вскоре был проведён ряд экспериментов по её практической реализации. Все они оказались неудачными. Проведённый анализ зажигания ТИС позволил сформулировать гипотезу о том, что уровень симметрии, приемлемый для имплозии делящихся материалов, недостаточен для имплозии с зажиганием термоядерных инициирующих систем. Реализация выводов из этой гипотезы и привела к успеху.

В дальнейшем было разработано значительное количество ТИС различных видов, которые нашли важное практическое применение. Здесь я упомяну только об их принципиальном значении для осуществления ядерных взрывов в мирных целях.

Отработка термоядерных инициирующих систем и развитие моделирования позволили установить прецизионные критерии их зажигания, учитывающие особенности их имплозии, используемые материалы и другие факторы.

7. Нейтронно-ядерные процессы

К фундаментальным исследованиям нейтронно-ядерных процессов в РФЯЦ – ВНИИЭФ исторически относятся, прежде всего, работы по определению критических масс делящихся материалов в различных конфигурациях. Эти работы начались одновременно с разработкой первой атомной бомбы РДС-1 и продолжаются до сих пор. Исследования опираются как на эксперименты, проводимые на критмассовых стендах, так и на современные расчётные методы моделирования. Хотя критические массы основных делящихся материалов давно известны с очень высокой точностью, иногда возникают новые вопросы, вызванные использованием специальных материалов.

Другое направление исследований связано с кинетикой развития цепной реакции в системах различного типа и в условиях различного нейтронного воздействия, что, в свою очередь, является также одной из основ решения вопросов ядерной взрывобезопасности. Базой для этих исследований явились эксперименты по определению сечений деления, упругого и неупругого рассеяния, числа вторичных нейтронов и спектров нейтронов деления, которые были широко развёрнуты в нашем институте в первой половине 1950-х годов. Специальные программы работ в этой области проводились в рамках создания первого термоядерного заряда РДС-6с. В дальнейшем

производились неоднократные уточнения этих основополагающих "констант" в новых экспериментах.

В условиях бустинга к фундаментальным вопросам относится взаимодействие термоядерных нейтронов с делящимися материалами. Эти же вопросы существенны и для режимов горения термоядерных модулей.

Важнейшая стадия — горение бустированных и термоядерных зарядов — требует комплексного рассмотрения процессов радиационной газодинамики, термоядерного горения и нейтронной кинетики в многокомпонентных средах. В настоящее время мы используем в этих целях ряд 2D-программ.

Мы располагаем целым рядом методик расчёта переноса нейтронов в сложных гетерогенных конфигурациях и прецизионными системами спектральных и групповых нейтронных констант для всех изотопов, с которыми связана наша работа.

8. Неравновесные процессы

Наша работа непосредственно связана с исследованиями ряда неравновесных процессов. Приведу несколько примеров.

В условиях термоядерного горения может реализоваться режим, в котором не успевает установиться, с одной стороны, термодинамическое равновесие между электронами и ионами, а с другой стороны — между электронами и излучением. Такой режим был неоднократно реализован и зафиксирован экспериментально, и для его описания у нас разработаны специальные физико-математические модели.

В условиях термоядерного горения даже при установлении термодинамического равновесия существует определённая вероятность того, что быстрые частицы, рождённые в термоядерных реакциях, могут вступать в новые термоядерные реакции до своей термализации. С целью изучения этого процесса у нас был проведён специальный комплекс исследований, результаты которого внедрены в модели и используются на практике.

Характерной является ситуация, в которой плотность потока энергии рентгеновского излучения значительно превышает равновесную плотность потока, соответствующую температуре среды, а спектр потока рентгеновского излучения существенно отличается от планковского. Эти обстоятельства также учтены в программах радиационной газодинамики.

9. Заключение

Мы не можем представить наиболее яркие примеры работ, о которых говорилось выше. В то же время эти исследования сопровождались научным поиском и получением результатов, которые являются вполне открытыми. Некоторые из них непосредственно относятся к решению наших основных оружейных задач, некоторые частично связаны с ними. В публикуемых в этом выпуске УФН статьях наши ведущие специалисты представили результаты таких открытых исследований. Надеюсь, что эти статьи дают достаточно полное представление о ряде конкретных особенностей наших научных работ.

В создании и развитии новых научных направлений, связанных с работами РФЯЦ–ВНИИЭФ, на протяжении 65 лет принимало участие большое число выдающихся специалистов и корифеев отечественной науки. Я не привожу имён, поскольку любая выборка персоналий

не будет достаточно представительной. Можно сказать, что мы говорим о науке РФЯЦ – ВНИИЭФ в целом.

PACS numbers: 47.20.-k, 47.27.wj, 47.40.-x
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104i.0410

Гидродинамические неустойчивости

А.Л. Михайлов, Н.В. Невмержицкий,
В.А. Раевский

1. Введение

В статье представлены результаты экспериментальных работ по исследованию гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания в жидких, газовых и прочных средах. В частности, показано: 1) развитие возмущений и турбулентного перемешивания в газах чувствительно к числу Маха ударной волны; 2) скорость проникновения фронта газа в жидкость при увеличении числа Рейнольдса течения от 5×10^5 до 10^7 не изменяется; 3) устойчивый и неустойчивый режимы в средах с прочностью зависят от длины волны и амплитуды начальных возмущений; 4) гидродинамические неустойчивости могут быть инструментом исследований прочностных свойств материалов.

Одна из наиболее амбициозных и важных научно-практических проблем — проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС). Реализация идеи УТС оказалась принципиально зависящей, среди прочего, от одной "малости" — гидродинамических неустойчивостей: Рэлея – Тейлора [1], Рихтмайера – Мешкова [2, 3] и Кельвина – Гельмгольца [4]. Сколько угодно малые начальные возмущения на границе раздела разнородных сред под действием этих неустойчивостей начинают возрастать, что со временем приводит к турбулентному перемешиванию веществ. Как следствие, появляются энергетические потери и ограничения в достигаемой плотности кумулируемой в мишени энергии, необходимой для осуществления зажигания.

Исследования гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания ведутся в Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (РФЯЦ–ВНИИЭФ) практически со времени его основания. В частности, основные результаты Тейлора (1950 г.) (для так называемой гравитационной неустойчивости) независимо были получены сотрудниками ФИАН С.З. Беленьким и Е.С. Фрадкиным, участвовавшими тогда в работах по атомной проблеме. Их результаты изложены в конце 1940-х – начале 1950-х годов в серии неопубликованных отчётов ВНИИЭФ. Эти исследователи разработали и первую полуэмпирическую модель развития зоны перемешивания [5]. В 1951 г. по инициативе А.Д. Сахарова Ю.Ф. Алексеевым, И.Г. Проскуриным и Н.Ф. Зеленцовой были выполнены первые экспериментальные исследования развития турбулент-

А.Л. Михайлов, Н.В. Невмержицкий, В.А. Раевский.

ФГУП "Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ
E-mail: root@gdd.vniief.ru