

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

О термоядерном синтезе при взрыве сферического заряда
(проблема газодинамического термоядерного синтеза)

Н.А. Попов, В.А. Щербаков, В.Н. Минеев, Р.М. Зайдель, А.И. Фунтиков

Обсуждаются проблемы газодинамического термоядерного синтеза (ГДТС) — оригинального направления инерциального термоядерного синтеза, основанного на сферическом кумулятивном сжатии дейтерий-тритиевого газа с помощью заряда взрывчатого вещества. Приводятся основные направления исследований и рекордные результаты, достигнутые к середине 1980-х годов.

PACS numbers: 01.65. + g, 28.52. – s

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200810f.1087

Содержание

1. Введение (1087).
 2. Расчетные и экспериментальные исследования газодинамического термоядерного синтеза (1088).
 3. Проявление гидродинамической неустойчивости при сферическом сжатии (1089).
 4. Влияние вязкости и прочности на устойчивость движения ударной волны и оболочек, а также на перемешивание материалов на контактных границах (1090).
 5. Заключение (1092).
- Список литературы (1093).

1. Введение

Проблема термоядерного энерговыделения (ТЭ) при быстром сферически-симметричном сжатии газовой дейтерий-тритиевой (ДТ) мишени, помещенной в центр кумулятивного заряда взрывчатого вещества (ВВ), включает в себя различные аспекты физики высоких плотностей энергии, имеющие как чисто научное, так и практическое значение. Энергия детонации ВВ вследствие имплозии в соответствующих кумулирующих системах концентрируется в центральной части устройства.

Для термоядерного воспламенения ДТ-смеси посредством ее сжатия оболочкой необходимо выполнение

интегрального критерия зажигания [1, 2], который является обобщением критерия Лоусона и в упрощенном виде записывается в виде условий

$$T \geq 2-3 \text{ кэВ}, \quad \rho r \geq 1 \text{ г см}^{-2}, \quad (1)$$

где T — максимальная температура [кэВ], ρ — максимальная плотность [г см⁻³], r — минимальный радиус [см] сферической ДТ-смеси.

Таким образом, для термоядерного воспламенения центральной ДТ-смеси ее необходимо не только нагреть до достаточно высокой температуры, но и сжать до достаточно большой плотности.

Для зажигания ДТ-смеси при фокусировке сферической ударной волны (УВ) (за фронтом отраженной от центра УВ) необходимо выполнение условия [3–5]

$$\rho_0 r_0 u_0^{2,2} \geq 1, \quad (2)$$

где ρ_0 — начальная плотность [г см⁻³], r_0 — начальный радиус сферической ДТ-мишени [см], u_0 — начальная скорость сжатия газа [10⁷ см с⁻¹] ([100 км с⁻¹]). В условиях ГДТС требование (2) для начального радиуса ДТ-газа $r_0 \sim 1$ мм можно реально выполнить, если обеспечить предварительное сжатие газа до плотности ρ_0 порядка нескольких десятков граммов на 1 см³.

При этом может воспламениться центральная часть ДТ-газа, после чего горение будет распространяться на весь предварительно сжатый газ (так называемое быстрое инициирование (fast ignition) — этот термин часто используется для термоядерного поджига сжатого газа внешним лазерным лучом высокой интенсивности).

Очевидно, что выполнение условий зажигания (1) связано с кумуляцией энергии в системе ГДТС, которая определяется источником первоначальной энергии заряда ВВ, т.е. массой ВВ и схемой ее кумуляции в центральную термоядерную область, а также достигнутой максимальной плотностью ДТ-топлива, которая в основном зависит от выбора материала обжимающей оболочки (степень сжатия возрастает при увеличении

Н.А. Попов, В.А. Щербаков. Российский федеральный ядерный центр "Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", просп. Мира 37, 607188 Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация
Тел. (831-30) 2-83-86. E-mail: naporov@vniief.ru
В.Н. Минеев, Р.М. Зайдель, А.И. Фунтиков. Объединенный институт высоких температур РАН, ул. Ижорская 13/19, 125412 Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 484-16-22. Факс (495) 485-79-90
E-mail: funtikov@ihed.ras.ru

Статья поступила 24 июня 2008 г.

начальной плотности оболочки, поэтому обычно применяются так называемые тяжелые оболочки из таких металлов, как золото, платина, вольфрам и т.п.), и от зависящего от времени внешнего давления, определяемого вышележащими слоями многослойной кумулирующей системы.

На выполнение реальных условий зажигания существенно влияют симметрия сжатия, от которой зависит максимально достижимая плотность горючего, и перемешивание на границах разнородных слоев, от которого зависит степень кумуляции и величина максимальной температуры в центре термоядерного топлива [6].

Работы по ГДТС впервые, по-видимому, были начаты в Германии во время второй мировой войны в связи с немецким атомным проектом [7, 8]. В развитие принципа кумулятивных зарядов с облицовкой, предложенного впервые также в Германии применительно к разработке фауст-патронов, появилась идея реализации термоядерного синтеза в фокусе сферического заряда с вложенной оболочкой [9]. Этим работам способствовало развитие Гудерлеем теории имплозии ударной волны [10].

В СССР об этих работах тогда ничего не было известно. Только в 1945 г. Л.Д. Ландау и К.П. Станюкович независимо доказали факт увеличения давления, т.е. кумуляции на фронте сходящейся в сплошном веществе ударной волны [11].

Началу работ по ГДТС в нашей стране положило предложение А.С. Козырева. В 1946 г. Козырев высказал идею о возможности достижения в фокусе сферического заряда обычного ВВ давлений и температур достаточно высоких для протекания термоядерных реакций в тяжелых изотопах водорода [12]. Более того, на основе этой идеи Козырев предложил конструкцию взрывного термоядерного реактора, названного им сферическим детонационным концентратором энергии (СДКЭ).

Расчетно-теоретические работы по ГДТС были начаты во Всесоюзном (ныне Всероссийском) научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) в 1951 г. Я.Б. Зельдовичем, Н.А. Поповым и В.А. Александровым. Постоянное внимание к этим работам проявлял Е.И. Забабахин. Численные оценки, проведенные в 1952 г., показали, что в заряде ВВ радиусом ~ 50 см для достижения высоких температур (~ 2 кэВ), необходимых для возбуждения самоподдерживающейся термоядерной реакции (зажигания), требуется сферически-симметричное "схождение" оболочки вплоть до радиуса в несколько десятых долей миллиметра. При этом условии термоядерную вспышку удалось бы возбудить в ДТ-смеси массой $m \sim 10^{-3}$ г [13].

Первоначально экспериментальные работы по ГДТС проводились во ВНИИЭФ под руководством Л.М. Тимонина с участием И.Г. Проскурина, Р.С. Осипова и др. В 1958 г. к этим исследованиям подключился А.С. Козырев и его сотрудники — Ю.Д. Лавровский, М.И. Арифов, С.М. Бабадей и др. К началу 1955 г. группой физиков под руководством Ю.С. Замятнина с участием В.М. Горбачева, Н.А. Уварова, Д.Д. Усенко и др. была создана высокочувствительная (до $\sim 10^4$ нейтронов за импульс) аппаратура для измерения малых импульсов нейтронов — так называемый метод затянутой регистрации (МЗР) [14].

Первая информация о ведущихся в СССР работах по ГДТС содержалась в докладе Л.А. Арцимовича "Иссле-

дование по управляемым термоядерным реакциям в СССР", опубликованном в трудах Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве в 1958 г. Затем на эту тему в *Nature* было напечатано письмо А.С. Козырева, В.А. Александрова и Н.А. Попова "Fusions first for USSR" [15]. Наконец, в 1993 г. в журнале *Химическая физика* была опубликована статья большой группы авторов (В.А. Александров, А.С. Козырев, Н.А. Попов, В.А. Щербаков и др.) "Возбуждение термоядерной реакции в фокусе сферического заряда взрывчатого вещества" [16].

2. Расчетные и экспериментальные исследования газодинамического термоядерного синтеза

Первая экспериментально обнаруженная (без количественных измерений) генерация термоядерных нейтронов в центре сферического заряда ВВ относится к 1954 г. Количественная регистрация образовавшихся в тех же условиях термоядерных нейтронов методом затянутой регистрации была выполнена годом позднее. Физическая схема заряда, которая была выбрана и расчетно обоснована Е.И. Забабахиным и Н.А. Поповым, представляла собой так называемую многокаскадную систему, состоящую из набора сравнительно тонких каскадов, скрепленных в одно целое с помощью спиц. Каждый каскад состоял из оболочек, изготовленных из материала большой плотности (Fe, U и т.п.), легких смягчающих прокладок (например, из органического стекла) над ними и воздушных промежутков между каскадами. Специально подобранное расчетное соотношение масс оболочек было получено Н.А. Поповым в 1954 г. Выход нейтронов в опытах с этой системой составлял $10^7 - 10^8$ в импульсе, а в усовершенствованном варианте этой системы он достиг потолка — 2×10^9 , что более чем на четыре порядка меньше величины, предсказываемой симметричными расчетами [14].

В 1959 г. Е.И. Забабахин предложил новую многослойную автомобильную кумулирующую систему — так называемую слойку, состоящую из чередующихся слоев с большой и малой плотностью без воздушных промежутков между ними и, естественно, несимметричных элементов — спиц между ними [17].

Применение этих систем для целей ГДТС привело к увеличению выхода нейтронов на два порядка, а затем — до 10^{12} [14]. Но и эта величина оказалась на несколько порядков меньше расчетной.

Сама по себе слойка, продолженная до внутренней границы заряда ВВ, отбирала мало энергии, поэтому вначале отбор энергии от ВВ осуществлялся сравнительно тонким стальным первым каскадом, который крепился к кумулирующей системе — слойке — с помощью несимметричных элементов — спиц. В 1967 г. В.А. Щербаковым была предложена новая, более эффективная система отбора энергии от сферического заряда ВВ центральной многослойной кумулирующей системой. Эта система, состоящая из более толстой (примерно в три раза по сравнению с оптимальной толщиной оболочки первого каскада) и глубже расположенной стальной оболочки и слоя пенопласта между ней и слойкой (вместо спиц), обеспечивала примерно такой же отбор энергии, как и при оптимальном первом каскаде. Влияние асимметрии стальной оболочки существенно

уменьшилось вследствие ее большей толщины. Было показано, что влияние разнотолщины пенопласта на протекающие в системе динамические процессы будет ослаблено [18]. Эффективность этой новой системы отбора энергии была подтверждена экспериментально, и такая система применялась в большинстве последующих экспериментов.

В дальнейшем по предложению В.Г. Ивонинского, В.М. Герасимова и Р.С. Осипова, а также Ю.М. Стяжкина и В.А. Раевского произошел возврат к каскадному отбору энергии от заряда ВВ в варианте многокаскадной системы и предложенной В.П. Рябовым гибридной системы, состоящей из нескольких каскадов и внутренней слойки.

В 1969 г. В.А. Щербаков предложил конструкцию центральной части слойки с утолщенными легкими слоями (примерно в два раза по сравнению с оптимальной автомобильной слойкой) и слоями промежуточной плотности, размещенными, в частности, над тяжелой оболочкой, обжимающей газ в центре мишени. При одинаковой внешней асимметрии это привело к более симметричному сжатию газа и ослаблению отрицательного влияния перемешивания как в утолщенных легких слоях, так и в газе. Все эти эффекты получили экспериментальное подтверждение.

Применение утолщенных внутренних слоев из LiDT позволило получить расчетное разжигание термоядерного горения с общим энерговыделением, превышающим инициирующую энергию взрыва ВВ.

Расхождение между величинами экспериментального и расчетного нейтронного выходов привело к необходимости разработки новой конструкции и технологии изготовления высокоточного так называемого прецизионного сферического заряда. Создание концепции такого заряда с участием А.С. Козырева, С.М. Бабадея, Е.В. Зотова, Л.Д. Рябева и др. относится еще к 1963–1964 гг. Кроме перехода к слойке и новой системе отбора энергии от ВВ, описанной выше, в этом заряде был осуществлен переход к жидкому ВВ (ЖВВ), что позволило избавиться от разнотолщины взрывчатого вещества благодаря однородности состава ЖВВ и исключить технологические стыки и зазоры между частями заряда.

Переход к многоточечной высокосинхронной системе инициирования, разработанной Е.В. Зотовым, с максимально равномерным расположением ~ 1000 точек инициирования на наружной сферической поверхности заряда с симметрией правильного двенадцатигранника (по предложению В.А. Щербакова и др.) позволил достигнуть высокой точности фокусировки, отличающейся от расчетной геометрии, не более чем на 0,1 мм. При этом точность изготовления элементов такой кумулирующей системы удалось довести до уровня $\sim 0,03$ мм для наружных слоев системы уровня $\sim 0,003$ мм для ее внутренних элементов [14].

Максимальный, рекордно высокий на сегодня нейтронный выход — 5×10^{13} нейтронов — в подобных усовершенствованных системах был зарегистрирован 10 декабря 1982 г. из центра мишени, содержащей ДТ-газ, с начальным радиусом $r_0 \approx 1$ мм и начальной плотностью $\rho_0 \approx 0,1$ г см $^{-3}$. В этом опыте по оценкам были достигнуты температура $T \approx 0,65$ кэВ и максимальная плотность $\rho \approx 80$ г см $^{-3}$. Величина $\rho r \approx 0,8$ г см $^{-2}$ является рекордно высокой для инерциального термоядерного синтеза и достаточной для воспламенения

ДТ-газа, если увеличить температуру примерно в 3–4 раза. Конкретная редакция этого опыта была предложена В.М. Дановым при участии А.Н. Анисимова, Л.С. Мхитаряна и др. Однако и в этом опыте экспериментальный нейтронный выход оказался ниже расчетного на 2–3 порядка [19].

Для объяснения этой разницы была выдвинута гипотеза о наличии в заряде ЖВВ вертикальной систематической составляющей асимметрии, возможно, обусловленной влиянием силы тяжести на плотность ЖВВ и превосходящей по амплитуде случайные, связанные с допусками, колебания от опыта к опыту (эти колебания приводят к неустойчивости нейтронного выхода порядка нескольких десятков процентов). Данная гипотеза нашла частичное подтверждение в специально поставленных экспериментах [16]. Однако наличие такой систематической составляющей асимметрии может уменьшить величину нейтронного выхода всего в несколько раз (а не на порядки); к тому же причина появления такой асимметрии не была точно установлена, следовательно, оставалось неясным, как с ней бороться.

3. Проявление гидродинамической неустойчивости при сферическом сжатии

Разрыв между идеализированными расчетными и экспериментальными значениями нейтронного выхода в системах ГДТС можно объяснить неучтенными в расчетах эффектами асимметрии и перемешивания на границах веществ разной плотности. Степень учета этих эффектов современными расчетными методиками пока не позволяет адекватно описать полученные экспериментальные результаты.

В последнее время начали расчетно учитывать поступление в виде струй тяжелого вещества обжимающей оболочки в центральный газ. Образование струй происходит за счет возрастания мелкомасштабных возмущений, первопричиной которых являются структурные особенности материалов центральных оболочек и их поверхностей. Расчеты, учитывающие такой механизм засорения газа и, как следствие, снижение его максимальной температуры, дают гораздо больший эффект, чем расчеты по существующим теориям развитой турбулентности.

Проведенные к настоящему времени расчеты по учету струйного перемешивания дают обнадеживающие результаты, как для объяснения экспериментального нейтронного выхода, так и для уменьшения этого эффекта (а следовательно, повышения нейтронного выхода) при соответствующих конструкционных и технологических усовершенствованиях систем ГДТС.

Гравитационная неустойчивость Рэлея–Тейлора (РТ) и турбулентное перемешивание возникают при тангенциальном разрыве скоростей на контактной границе разнотолстых сред при ее ускорении со стороны легкого вещества (в частности, при торможении обжимающей тяжелой оболочки центральным легким газом, а также при торможении и ускорении тяжелых оболочек слойки легкими слоями) [20–23]. Неустойчивость границы раздела двух разнотолстых сред возникает также после прохождения через нее фронта ударной волны — неустойчивость Рихтмайера–Мешкова [24–26]. Сейчас для численного моделирования развития гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания

во ВНИИЭФ используется ряд различных методик, включая специальные методики расчета развития малых возмущений (МВ) [27], двумерные и трехмерные газодинамические методики, а также методики, основанные на различного рода полумпирических моделях развитой турбулентности. Следует отметить также существенную зависимость неустойчивости и турбулентного перемешивания от физической вязкости и прочности материалов, что особенно важно для наружных областей систем ГДТС. Экспериментально доказан положительный эффект высокой прочности и тугоплавкости используемых материалов [14].

Во ВНИИЭФ одновременно с работами, направленными на увеличение нейтронного выхода в системах ГДТС, проводились исследования влияния заранее заданных возмущений различного спектрального состава на величину этого выхода (В.Е. Костылева, Р.С. Осипов, В.А. Кирдяшкин и др.). Такие исследования, в частности, помогли определить необходимые требования на точность изготовления элементов прецизионного заряда.

Сильная зависимость нейтронного выхода от симметрии сходящейся ударной волны вначале была отмечена в твердых мишенях, содержащих дейтерий и тритий (так называемый термоядерный индикатор (ТИ) [28], в создании которого большую роль сыграл В.А. Александров; конечно, о термоядерном воспламенении в ТИ речь не шла).

Эксперименты с прецизионным зарядом ГДТС показали, что при уменьшении размеров центральной газовой области нейтронный выход вначале возрастает, а затем резко снижается (хотя согласно результатам идеализированных расчетов он должен увеличиваться); нейтронный выход достигает максимального значения ($N \sim 10^{13}$) при начальном радиусе газовой области $r_0 \sim 1$ мм. Отсюда в работе [29] делается вывод, что линейная асимметрия в прецизионном заряде имеет порядок минимального радиуса сжатой газовой области: $\Delta r \sim 0,1$ $r_0 \sim 0,1-0,15$ мм.

Возрастание нейтронного выхода в опытах объясняется в основном улучшением симметрии. Однако во всех проведенных до сих пор опытах не были достигнуты условия зажигания (наиболее близкие к зажиганию условия получены в рекордном опыте 1982 г.: хотя величина ρr уже удовлетворяет этим условиям, однако полученная температура меньше необходимой для зажигания примерно в 3–4 раза). Условий зажигания можно достичь уменьшением отрицательного влияния перемешивания, улучшением асимметрии (компенсацией или устранением регулярной составляющей асимметрии и т.п.) [16, 30, 31]. При сохранении достигнутого уровня асимметрии и перемешивания приблизиться к выполнению условий зажигания можно за счет увеличения габарита заряда.

Способ зажигания газа, предварительно сжатого до умеренных плотностей (порядка нескольких десятков граммов на 1 см³) фокусирующейся ударной волной, может оказаться более перспективным, поскольку в нем отсутствуют эффекты рэлей-тейлоровской неустойчивости и перемешивания при необходимом для зажигания максимальном сжатии газа оболочкой. Остается, правда, вопрос об организации предварительного умеренного холодного сжатия газа с последующей достаточно симметричной фокусирующейся поджигающей ударной волной. Такого рода экспериментальные исследования

работы систем (не только систем ГДТС), например, лазерных мишеней под действием двойного импульса, обеспечивающего предварительное сжатие и формирование мощной фокусирующейся ударной волны, которая в перспективе может обеспечить воспламенение мишени, к сожалению, пока отсутствуют [4].

Другие возможные источники мелкомасштабных возмущений связаны с мезоструктурой вещества. Внешние слои, в которых вещество еще не расплавилось, деформируются частично. По современным представлениям пластическое течение сплошной среды происходит не как деформация континуума, а как движение очагов пластичности на мезоуровне размером 1–100 мкм. Эти очаги имеют вихревой характер. Экспериментально зафиксирована и измерена дисперсия скорости свободной границы при выходе на нее ударной волны. То есть неоднородность пластического течения на мезоуровне может служить источником мелкомасштабных возмущений скорости. Образно можно сравнить такое течение с течением замерзающей реки, когда по ней идет "шуга" — мелкие льдинки. Таким образом, здесь надо использовать и совершенствовать модели упругопластического течения. При этом можно опереться на обширный материал теоретических и экспериментальных исследований в данной области [32].

Подобным источником возмущений может служить и пластическое течение расплавленных внутренних оболочек, расположенных на низких радиусах. Сходящееся к центру кумулятивное течение всегда сопровождается сдвигом, который, в свою очередь, является источником мелкомасштабной турбулентности.

Отличие ГДТС от других видов инерционного термоядерного синтеза заключается в степени кумуляции энергии, которую можно грубо оценить по отношению температур: $k = T_{\text{eff}}/T_{\text{ВВ}}$, где $T_{\text{eff}} = 2$ кэВ — эффективная температура зажигания ДТ-смеси, $T_{\text{ВВ}} \sim 1$ эВ. Отсюда для ГДТС получим $k \sim 10^3$. Для проектов лазерного и ионного инерционного синтеза температура в испаренной части оболочки ~ 100 эВ, т.е. $k \sim 10$. В этом различии заключаются все трудности, связанные с возможностью осуществления ГДТС. Поэтому какая-либо информация, полученная при исследовании лазерного термоядерного синтеза, не может быть напрямую перенесена на ГДТС. Наоборот, результаты исследования ГДТС как полученные в более сложных условиях могут быть использованы для других видов инерционного термоядерного синтеза.

4. Влияние вязкости и прочности на устойчивость движения ударной волны и оболочек, а также на перемешивание материалов на контактных границах

Прочность может оказывать заметное влияние на устойчивость движения оболочек. Так, уже в 1954 г. было показано [33], что учет сдвиговой прочности приводит к существенному затуханию возмущений на сходящейся стальной оболочке с наружным радиусом 12 см и толщиной 3 см под действием постоянного давления 20 ГПа.

Для объяснения устойчивости ударной волны (УВ) было изучено поведение малых возмущений на фронте УВ, в том числе в уране и стали [34–36]. Исследование проведено на плоских и сферически сходящихся УВ методом, предложенным в [34].

Возмущения на ударной волне в исследуемом материале задавались на скошенной поверхности образца в виде клина с помощью созданных на ней параллельных полостей с синусоидальным профилем. Расстояние между этими полостями определяло длину волны возмущений на фронте УВ. Измерения формы фронта УВ производились после ее распространения по образцу и выхода на свободную поверхность. В плоском случае использовался плоский клин, в сферическом случае различие в толщине оболочки достигалось за счет смещения центра внутренней сферической поверхности.

Изучалось распространение УВ с разными длинами волн гармонических возмущений на фронте. В экспериментах осуществлялось полное геометрическое моделирование процесса распространения УВ, включая выполнение соотношения между начальной амплитудой a_0 и длиной волны возмущений λ .

Результаты опытов показали, что относительная амплитуда возмущений при сохранении длины волны возмущения, колеблясь относительно оптически гладкого фронта УВ, затухает примерно в 10 раз при прохождении пути, равного $\sim 3\lambda$. Таким образом, был сделан вывод об устойчивости плоских и сферически-сходящихся УВ. Развитие возмущений на фронте УВ определялось длиной и амплитудой возмущений, а также параметрами вязкопластического тела [34, 37]. Результаты измерений показали наличие дисперсии длины затухания возмущений, которое определяется значением коэффициента динамической вязкости.

Полученные данные по вязкости в алюминии, свинце, железе и уране показали, что в областях твердого состояния за фронтом УВ увеличение вязкости с возрастанием давления определяется достаточно близкими зависимостями и соответствует значениям коэффициента вязкости от 2 кПа с до 12–14 кПа с [35, 36]. Аналогичные изменения вязкости наблюдались и при меньших скоростях деформирования [38–40]. В области, находящейся выше кривой плавления, было установлено значительное уменьшение вязкости независимо от типа вещества [35, 36]. Отметим, что в сферических опытах не наблюдались эффекты перемешивания, несмотря на то, что в измерительных устройствах происходило торможение стальной оболочки при соударении с оболочками из урана, стали и алюминия [41].

В предположении идеальной сжимаемой жидкости процесс схождения оболочек является неустойчивым [42]. По данным С.В. Иорданского [43] учет вязкости приводит к экспоненциальному закону затухания возмущений на сходящейся оболочке. Показатель экспоненты зависит от коэффициента вязкости и номера гармоники возмущений. По нашей оценке коэффициент вязкости 2×10^3 кПа с вызывает затухание гармонических возмущений для гармоник с $n > 10$.

Вопрос о связи двух типов неустойчивости — Рихтмайера–Мешкова (РМ) и Рэлея–Тейлора (РТ) — рассмотрен в работе [44]. Известно, что РТ-неустойчивость в задачах имплозии проявляется тогда, когда тяжелая оболочка тормозится (т.е. испытывает отрицательное ускорение) при обжати газовой мишени. При этом неявно предполагается, что ускорение $g(t)$ является непрерывной функцией с ограниченной производной.

С другой стороны, обычная физическая интуиция подсказывает, что плавное ускорение можно представить с достаточной точностью как последовательность

большого числа малых импульсов $p_i = g(t_i) \Delta t$, возникающих в результате прохождения через границу слабых ударных волн. Развитие возмущений на границе от отдельной волны происходит в соответствии с режимом РМ, в частности имеет место линейное возрастание амплитуды искажения границы раздела, а возмущения массовой скорости стремятся к постоянной величине. Но это противоречит тому, что при плавном торможении возмущения на границе возрастают экспоненциально — вследствие РТ-неустойчивости.

Этот парадокс разрешается следующим образом. Для задачи Рихтмайера (неустойчивость РМ при прохождении ударной волны через искривленную границу двух сред), решенной ранее численно в [22], в работе [44] было получено аналитическое решение, которое удалось довести до конца в случае слабой УВ. При этом оказалось, что если за время Δt между последовательными волнами решение успевает выйти на асимптотический режим, то развитие возмущений на границе сводится к уравнению для несжимаемой жидкости, причем фактор сжимаемости можно не учитывать, если рассматривать возмущения границы с достаточно малой длиной волны.

Результаты экспериментального исследования РТ-неустойчивости на металлических пластинах, по-видимому, впервые были опубликованы в [45], а затем — в [46, 47]. В указанных работах металлические пластины разгонялись продуктами взрыва через зазор (вакуумированный в [46], вакуумированный и заполненный воздухом в [47]). В работе [46] было обнаружено возрастание возмущений во времени на поверхности пластины, обращенной к продуктам взрыва, а в [47] была зарегистрирована эрозия материала пластин на поверхности нагружения. Эрозия не наблюдалась в случае вакуумирования зазора. Возможно, эрозия связана с неустойчивостью, возникающей на контактной границе "продукты взрыва–воздух". Отметим, что в указанных экспериментах область возмущений не охватывала весь объем пластин.

Влияние вязкости и поверхностного натяжения на РТ-неустойчивость в плоском случае теоретически изучалось в [48]. По результатам этой работы можно полагать, что удар стальной пластины по алюминиевой со скоростью 2 км с^{-1} связан с появлением характерных возмущений с волновым числом $K = 2\pi/\lambda = 20$. Коэффициенты вязкости алюминия и стали полагались равными 2 кПа с. Однако в многочисленных опытах на так называемых измерительных устройствах, используемых во ВНИИЭФ в основном для измерений ударной сжимаемости веществ [41, 49], проявление неустойчивости не было обнаружено. В этих опытах использовались геометрически подобные полусферические измерительные заряды ВВ с радиусом $R_\phi = 220$ и 300 мм. Разгоняемая стальная оболочка помещалась примерно на половине радиуса R_ϕ . Контроль симметрии формы УВ и измерение ее скорости в исследуемых образцах производились за стальным или алюминиевым экраном, установленным на радиусе $(0,08–0,14) R_\phi$.

Состояние оболочки на начальном участке ее разгона продуктами взрыва отвечает ударному сжатию железа и последующему изэнтропическому расширению. При этом, как показали экспериментальные исследования, плавление железа на изэнтропе расширения начинается при давлении 140 ГПа [50]. Так называемое ударное плавление железа происходит при более высоком давлении

нии ~ 200 ГПа [51]. При отражении от железа (стали с низким содержанием углерода) продуктов взрыва плоской детонационной волны реализуется давление 40 ГПа.

В сферическом заряде для сходящейся детонационной волны в ВВ за счет кумуляции с уменьшением радиуса происходит увеличение этого давления [52], на сходящейся ударной волне давление изменяется примерно по закону $P \sim r^{-0,9}$ [53]. Для вложенной в такой заряд оболочки из железа, помещенной на радиусе $R = 0,5 R_0$, давление на первой ударной волне составляет 53 ГПа; таким образом, оболочка остается в твердом состоянии. На последующих стадиях разгона оболочки при схождении ее к центру и последующем торможении происходит ее дополнительный разогрев за счет диссипации кинетической энергии в тепловую [54]. После удара оболочки по выполненному из железа экрану измерительного узла, расположенному на радиусе $R < 0,15 R_0$ в измерительных зарядах [41, 49], давление ударного сжатия в экране составляет $P > 300$ ГПа, что отвечает жидкому состоянию. При этом прочность и вязкость материалов уменьшаются, однако их влияние на устойчивость движения ударной волны и перемешивание материалов на контактной границе на небольших базах движения УВ не проявляется.

Аналогичные процессы характерны и для оболочки из урана. При размещении оболочки из урана внутри сферического заряда ВВ на радиусе $R \sim 0,5 R_0$ на ней реализуются давления ударного сжатия от 45 до 57 ГПа [36], которые соответствуют области твердого состояния урана.

В первых измерениях оценка симметрии детонационного фронта в сферическом заряде ВВ проводилась по регистрации остаточной формы алюминиевого шарового ядра, помещаемого внутри заряда [55]. По существу, этот метод, предложенный К.И. Щелкиным, являлся не только методом оценки симметрии схождения ударной волны (имплозии), но и интегральным методом оценки степени неравномерности распределения давления в ударной волне (разнодинамичности), проявляющейся как на стадии сжатия, так и на стадии отражения от центра УВ. Дело в том, что в центре ядра после проведения опыта образовывалась каверна, по форме которой можно было судить о симметрии фронта ударной волны, а по текстуре материала можно было оценить зону турбулентности, а также диссипации энергии при сжатии и разлете.

Измерения показали, что ядро сохранило сферическую форму, но его наружный диаметр увеличился на 20 % по сравнению с первоначальным размером. Оказалось, что внутри ядра образовалась почти сферическая полость, на дне которой находился затвердевший расплав внутренней части алюминия [55]. Целостность ядра свидетельствовала о высокой симметрии имплозии в заряде ВВ.

Исследования структуры шаров из различных материалов, помещенных внутрь сферического заряда ВВ, после ударного нагружения были проведены Б.В. Литвиновым и Е.А. Козловым с сотрудниками [56]. В многочисленных экспериментах с вариацией инициирования заряда ВВ не наблюдалось эффектов, связанных с возникновением разных видов неустойчивости. В ряде опытов также возникала сферически-симметричная полость с оплавленной внутренней поверхностью.

Результаты этих исследований совпали с результатами специально поставленных опытов по оценке диссипации энергии при схлопывании оболочки (наружный радиус 110 мм, толщина 6,2 мм). Материал оболочки — сталь 3 — обжигался. В опытах вместо заряда ВВ использовался полусферический вкладыш между взрывной фокусирующей системой (ФС) и оболочкой с наружным радиусом 220 мм, изготовленный посредством склейки листов пенопласта толщиной 40 мм и плотностью $0,35 \pm 0,005$ г см⁻³. Разноплотность пенопласта создавала условия для возникновения гидродинамической РМ-неустойчивости. Сферическая ударная волна в пенопласте генерировалась подрывом 16 линзовых элементов ФС со средней толщиной ВВ в них равной 10 мм. Анализ опытов показал, что оболочка собралась без разрушения в ядро полушаровой формы с ровной сферической наружной поверхностью. В центре ядра наблюдалось начало образования кумулятивной струи. Вблизи основания ядра регистрировалась зона разгрузки. Масса ядра практически равнялась массе исходной оболочки. Материал ядра имел только радиальную текстуру, что свидетельствовало об отсутствии турбулентности в процессе схлопывания оболочки. Кроме того, измерение тепловой энергии, запасенной в материале ядра (измерение температуры воды с погруженным в нее ядром), а также оценка диссипации энергии при схлопывании оболочки за счет прочности и вязкости совпали между собой с приемлемой точностью.

Обзор экспериментальных исследований влияния прочности на развитие РТ-неустойчивости при торможении сходящихся цилиндрических оболочек приведен в [54]. Показано, что стальные и свинцовые оболочки с заданными возмущениями при своем торможении теряют устойчивость. Прочность оболочки влияет на форму и амплитуду возмущений как на стадии ее разгона, так и на стадии ее торможения.

5. Заключение

Термоядерное воспламенение и горение ДТ-газа при его сферически-симметричном сжатии осуществлено как при сжатии газа оболочкой, так и при фокусировке ударной волны [6]. Таким образом, при достаточно большой энергии и достаточно хорошей симметрии сжатия проблемы термоядерного воспламенения не существуют.

Проблема возникает (и ее решение до сих пор не найдено) при использовании для сжатия других, гораздо менее энергоемких источников энергии: энергии взрыва сферических зарядов химических ВВ (ГДТС), лазерного излучения — лазерный термоядерный синтез (ЛТС), пучков заряженных частиц — ионный термоядерный синтез (ИТС), магнитно-кумулирующих систем — магнитно-газодинамическое обжатие (МАГО).

При большом уменьшении энергии сжатия (или, как говорят, энергии драйвера) сильно уменьшается возможная для зажигания масса термоядерной смеси, т.е. ее объем и характерный размер области зажигания. Поэтому сильно возрастают требования к необходимой симметрии и допустимой ширине зоны перемешивания. Невыполнение этих требований приводит в конечном счете к невозможности достижения условий зажигания в системах ГДТС.

Для выполнения необходимых требований к симметрии и перемешиванию в системах ГДТС существует

целый ряд предложений, которые в принципе сводятся к уменьшению начальной асимметрии и к созданию систем, менее чувствительных к асимметрии и перемешиванию. Работа продолжается. Что касается положительной роли прочности и вязкости в уменьшении асимметрии и перемешивания, то это существенно только для внешних областей систем ГДТС, в которых вещества при сжатии еще не теряют прочности и не превращаются в газы. Однако, скорее всего, именно снаружи находятся главные источники асимметрии, например, система инициирования ВВ.

Анализ результатов ГДТС уже привел к необходимости углубленного расчетно-теоретического и экспериментального исследования основных процессов, происходящих в этих системах — образования и возрастания газодинамических неустойчивостей, перемешивания, неоднородности упругопластического течения, детонации, — т.е. всех актуальных вопросов современной динамики сплошных сред. Здесь уже получены обнадеживающие результаты. Исследования по ГДТС являются уникальной возможностью развивать и тестировать расчетно-теоретические модели и методы расчета газодинамики при высоких давлениях и температурах.

Вопрос о проблеме ГДТС и выявлении факторов, определяющих ограничение кумуляции энергии в сферических устройствах со сходящейся ударной волной, был одним из последних вопросов, обсуждавшихся с В.Н. Минеевым. В круг интересов В.Н. Минеева входили разнообразные направления физики взрыва и применения ударных волн в научных исследованиях. С 1956 по 1978 гг. В.Н. Минеев участвовал в работах по Советскому атомному проекту в Российском ядерном центре ВНИИЭФ, где он являлся одним из основоположников экспериментального исследования вязкости и электрических свойств материалов при ударном сжатии конденсированных веществ, а затем и вопросов прочности материалов и конструкций при динамических нагружениях. Дальнейшее развитие и широкую известность получили работы В.Н. Минеева по изучению стойкости защитных и производственных сооружений в аварийных ситуациях. В последний период его научная деятельность в Объединенном институте высоких температур РАН была в основном связана с вопросами безопасности атомных электростанций и предотвращения тяжелых последствий возможных аварий их реакторов.

Список литературы

- Вахрамеев Ю С, Мохов В Н, Попов Н А *Атомная энергия* **49** (2) 121 (1980) [Vakhrameev Yu S, Mokhov V N, Popov N A *At. Energy* **49** 567 (1980)]
- Аврорин Е Н, Феоктистов Л П, Шибаршов Л И *Физика плазмы* **6** 965 (1980) [Avrorin E N, Feoktistov L P, Shibarshov L I *Sov. J. Plasma Phys.* **6** 527 (1980)]
- Щербаков В А *Физика плазмы* **9** 409 (1983) [Shcherbakov V A *Sov. J. Plasma Phys.* **9** 240 (1983)]
- Щербаков В А *Вопросы атом. науки техн. Сер. Теор. прикл. физика* (2) 11 (1992)
- Александрова А Г, Попов Н А, Щербаков В А *Вопросы атом. науки техн. Сер. Ядерно-физ. исслед.* **1** (2) 95 (2003)
- Мохов В Н, в сб. *Высокие плотности энергии* (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 1997) с. 173
- Winterberg F *Atomkernenerg. Kerntech.* **41** (1) 1 (1982)
- Irving D *The German Atomic Bomb: The History of Nuclear Research in Nazi Germany* (New York: Da Capo Press, 1983) [Ирвинг Д *Атомная бомба Адольфа Гитлера* (М.: ЯУЗА. ЭКСМО, 2004) с. 276]
- Karlsch R *Hitlers Bombe* (München: Deutsche Verlags-Anstalt, 2005)
- Guderley G *Zylinderachse, Luftfahrtforschung* **19** 302 (1942)
- Ландау Л Д, Станюкович К П *ДАН СССР* **46** (9) 399 (1945)
- Козырев А С *Газодинамический термоядерный синтез* (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2005)
- Попов Н А, в сб. *Высокие плотности энергии* (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 1997) с. 493
- Бабадей С М *Атом* (21) 36 (2002)
- Kozurev A S, Aleksandrov V A, Popov N A *Nature* **275** 476 (1978)
- Александров В А и др. *Хим. физика* **12** 745 (1993)
- Забабахин Е И *ЖЭТФ* **49** 642 (1965) [Zababakhin E I *Zh. Eksp. Teor. Fiz* **22** 446 (1966)]
- Щербаков В А *Хим. физика* **14** 75 (1995)
- Анисимов А Н и др. *Хим. физика* **12** 749 (1993)
- Birkhoff G *Hydrodynamics* (Princeton: Princeton Univ. Press, 1950)
- Беленький С З, Фрадкин Е С "Теория турбулентного перемешивания" *Труды ФИАН* **29** 207 (1965)
- Richtmyer R D *Commun. Pure Appl. Math.* **13** 297 (1960)
- Мешков Е Е, Никифоров В В, в сб. *Высокие плотности энергии* (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 1997) с. 188
- Мешков Е Е *Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа* (5) 151 (1969)
- Анучина Н Н и др. *Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа* (6) 157 (1978)
- Розанов В Б, Лебо И Г, Зайцев С Г, Препринт ФИАН № 56 (М.: ФИАН СССР, 1990)
- Гришина Г А, Бухарова В Я, Зотова О М *Вопросы атом. науки техн. Сер. Методики и программы числен. решения задач мат. физики* (3) 22 (1986)
- Андрюшин И А, Чернышев А К, Юдин Ю А *Угрожение ядра* (Саранск: Красный Октябрь, 2003)
- Козырев А С и др., в сб. *Высокие плотности энергии* (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 1997) с. 485
- Анисимов А Н, Данов В М, Мхитарьян Л С "О состоянии и перспективах ГДТС", в сб. *Забабахинские научные чтения 1992 г. Тезисы докладов*
- Зотова О М, Щербаков В А "О влиянии возможностей разнотности ЖВВ на симметрию сжатия центральной ампулы с газом при ее вертикальных смещениях", в сб. *Звенигородская конф. 1997 г.*
- Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2003 г.* (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2004) с. 7
- Elliott L A *Proc. R. Soc. London* **139** 196 (1954)
- Сахаров А Д и др. *ДАН СССР* **159** 1019 (1964) [Sakharov A D et al. *Sov. Phys. Dokl.* **9** 1091 (1965)]
- Минеев В Н, Фунтиков А И *УФН* **174** 727 (2004) [Mineev V N, Funtikov A I *Phys. Usp.* **47** 671 (2004)]
- Минеев В Н, Фунтиков А И *ТВТ* **44** 943 (2006) [Mineev V N, Funtikov A I *High Temp.* **44** 941 (2006)]
- Зайдель Р М *ПМТФ* (4) 30 (1967) [Zaidel R M *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **8** (4) 20 (1967)]
- Огородников В А и др. *ПМТФ* (1) 5 (1995) [Ogorodnikov V A et al. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **36** 4 (1995)]
- Илюшин А А *Ученые записки МГУ Механика* **39** 11 (1940)
- Степанов Г В *Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении* (Киев: Наук. думка, 1991)
- Альтшулер Л В и др. *УФН* **166** 575 (1996) [Al'tshuler L V et al. *Phys. Usp.* **39** 539 (1996)]
- Сахаров А Д *Атом* (1) 44 (1998)
- Иорданский С В *Прикл. мат. механ.* **21** 465 (1957)
- Зайдель Р М *Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа* (1) 111 (1972)
- Barnes J F et al. *J. Appl. Phys.* **45** 727 (1974)
- Цыпкин В И и др. *ЖТФ* **45** 624 (1975) [Tsypkin V I et al. *Sov. Phys. Tech. Phys.* **20** 387 (1975)]
- Barnes J F et al. *J. Appl. Phys.* **51** 4678 (1980)
- Bellman R, Pennington R H *Quart. Appl. Math.* **12** (2) 151 (1954)
- Фунтиков А И *УФН* **167** 1119 (1997) [Funtikov A I *Phys. Usp.* **40** 1067 (1997)]

50. Фунтиков А И, Осипов Р С, Цыганов В А *ТВТ* **37** 887 (1999) [Funtikov A I, Osipov R S, Tsyganov V A *High Temp.* **37** 857 (1999)]
51. Фунтиков А И *ТВТ* **41** 964 (2003) [Funtikov A I *High Temp.* **41** 850 (2003)]
52. Забабахин Е И *Некоторые вопросы газодинамики взрыва* (Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 1997)
53. Забабахин Е И, Забабахин И Е *Явления неограниченной кумуляции* (М.: Наука, 1988) [Translated into English: Zababakhin E I, Zababakhin I E *Unlimited Cumulation Phenomena* (Moscow: Nauka Publ., 1990)]
54. Иванов А Г и др. *ПМТФ* **35** (4) 163 (1994) [Ivanov A G et al. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **35** 639 (1994)]
55. Альтшулер Л В и др. *Хим. физика* **14** (2–3) 65 (1993)
56. Жучихин В И *Первая атомная* (М.: ИздАТ, 1993)
57. *Вопросы современной технической физики: К 70-летию со дня рождения акад. Е.Н. Аврорина: Избранные труды РФЯЦ – ВНИИТФ* (Сост. Г Н Рыкованов и др.) (Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2002)

Thermonuclear fusion by exploding a spherical charge (gas-dynamical thermonuclear fusion problem)

N.A. Popov, V.A. Shcherbakov

*Russian Federation Nuclear Centre "All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics",
prosp. Mira 37, 607188 Sarov, Nizhegorodsk. region, Russian Federation*

Tel. (7-83130) 2-83 86

E-mail: napopov@vniief.ru

V.N. Mineev, R.M. Zaydel', A.I. Funtikov

*Joint Institute for High Temperature, Russian Academy of Sciences,
ul. Izhorskaya 13/19, 125412 Moscow, Russian Federation*

Tel. (7-495) 484-16 22

Fax (7-495) 485-79 90

E-mail: funtikov@ihed.ras.ru

Gas-dynamical thermonuclear fusion (GDTF) is reviewed — a novel line of inertial thermonuclear fusion research which is based on the cumulative spherical compression of DT gas using a high explosive charge. The major aspects of the research are examined and the record results achieved by the mid-80s are discussed.

PACS numbers: **01.65. + g, 28.52. – s**

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200810f.1087

Bibliography — 57 references

Received 24 June 2008

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **178** (10) 1087 – 1094 (2008)

Physics – Uspekhi **51** (10) (2008)