

УДК 519.6

ДООПЫТНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЙ СЖИМАЕМОСТИ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ ПО МЕТОДИКЕ "ЛЭГАК"

А. О. Бликов, М. А. Мочалов, Е. В. Шувалова, Е. А. Бакулина, Е. А. Пронин
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области;
НГТУ им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород)

Приводятся результаты численного моделирования по методике ЛЭГАК процесса сжатия дейтерия и гелия в области давлений до 12 ТПа и плотностей до 11 г/см^3 , проведенного до получения результатов опытов. Расчетные постановки соответствуют трем типам экспериментальных устройств регистрации параметров квазиизентропической сжимаемости газов и их макетам, в которых регистрируются кинематические параметры движения границ оболочек. Основными целями доопытного численного исследования данных экспериментов являются получение параметров сжатия газов, в том числе тех, определение которых во время проведения опыта не представляется возможным, а также при необходимости оптимизация постановки эксперимента для эффективного его проведения. Представлено сравнение полученных результатов численного моделирования с результатами опытов, проведенных после расчетного исследования. Согласие этих результатов позволило расширить применимость методики ЛЭГАК для нового класса задач и в дальнейшем использовать результаты расчетов по методике ЛЭГАК с целью оптимизации технологии экспериментальной регистрации параметров квазиизентропической сжимаемости газов.

Ключевые слова: гелий, дейтерий, сжимаемость, двухкаскадное сферическое устройство, расчеты двумерных задач, методика ЛЭГАК.

Введение

Как известно, для моделирования состояний, характерных для астрофизических объектов, в лабораторных условиях используются различные методы: электрофизические [1, 2], лазерные [3], взрывные [4]. В РФЯЦ-ВНИИЭФ с 1960-х гг. развивается метод квазиизентропического сжатия. С использованием этого метода исследована сжимаемость изотопов водорода, гелия, аргона, азота и других газов в диапазоне давлений 50—12 000 ГПа, получаемая с помощью нагружающих устройств на основе взрывчатых веществ (ВВ) с двумя типами геометрии — цилиндрической [5] и сферической [6]. В подобных устройствах экспериментально измеряется средняя плотность сжатого газа на несколько моментов времени. При этом соответствующие значения давления определяются из результатов рас-

четного моделирования. Экспериментальное исследование проводится в два этапа: 1) опыт с макетом, в котором регистрируются кинематические параметры движения границ оболочек; 2) опыт с полноразмерным устройством для измерения сжимаемости газов.

Особая роль отводится расчетному моделированию обоих этапов. При численном моделировании сжатия макета (первый этап исследования) проводятся расчеты с целью определения места расположения датчиков измерительной системы, в которой должны отсутствовать наводящие возмущения, и с целью отработки технологии счета для описания работы полноразмерного устройства, в том числе для выбора размеров коллиматоров и моментов времени рентгенографирования.

Численное моделирование сжатия полноразмерного устройства (второй этап исследования),

помимо определения значений плотности и давления газов в фазах сжатия, также преследует цель оценки влияния двумерных факторов (элементы крепления, система инициирования, эксцентриситет расположения каскадов и др.) на основные результаты.

В настоящей статье представлены результаты доопытного двумерного численного моделирования квазиизэнтропического сжатия с помощью сферических устройств и их макетов по методике ЛЭГАК [7, 8].

Постановка опытов

Опыты проводились на рентгенографическом комплексе РФЯЦ-ВНИИЭФ [9–15]. Общая схема постановки экспериментов со сферическими устройствами показана на рис. 1. Подробное описание технологии проведения экспериментов представлено, например, в работе [12].

Следует упомянуть о некоторых моментах, существенных при планировании опытов. Изображение границ оболочек устройства 1 (см. рис. 1) фиксируется во время опыта при одновременном использовании тормозного излучения трех мощных бетатронов 2. Особенностью рентгенографического комплекса является возможность регистрировать несколько (до девяти) фаз дви-

жения оболочек за один эксперимент и, следовательно, проследивать динамику сжатия [12]. Кроме того, для устранения влияния рассеянного излучения на регистраторы 3 размер поля регистрации ограничен коллиматорами 4 и защитными конусами 5. Таким образом, при подготовке к эксперименту для применения всех возможностей рентгенографического комплекса необходимо правильно оценить временной интервал его работы, включающий момент максимального сжатия оболочки нагружающего устройства, что является одной из целей расчетного исследования, а также определить размеры рабочего поля для системы регистрации.

В настоящей работе рассмотрены двухкаскадные устройства трех типов, конструкция которых схематично показана на рис. 2. Под каскадом подразумеваются однотипные последовательно соединенные элементы конструкции, включающие оболочку и газ. Параметры устройств приведены в табл. 1, где R_I и h_I — внешний радиус и толщина оболочки первого (внешнего) каскада; R_{II} и h_{II} — внешний радиус и толщина оболочки второго (внутреннего) каскада; $R_{ВВ}$ — внешний радиус заряда ВВ. В устройствах 1 и 3 присутствует вставка из оргстекла между внешним каскадом и ВВ.

В экспериментах с данными сферическими устройствами рентгенографическим комплексом

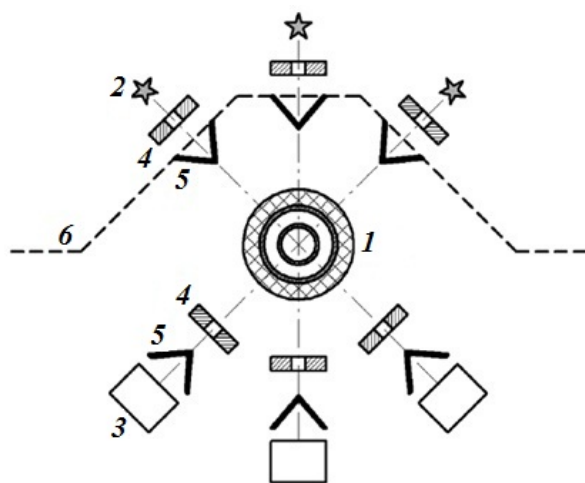


Рис. 1. Схема постановки эксперимента с устройством сферической геометрии на рентгенографическом комплексе РФЯЦ-ВНИИЭФ: 1 — экспериментальное устройство; 2 — рентгеновские источники; 3 — регистраторы рентгеновских изображений; 4 — свинцовые коллиматоры; 5 — защитные конусы (Al); 6 — защитное устройство

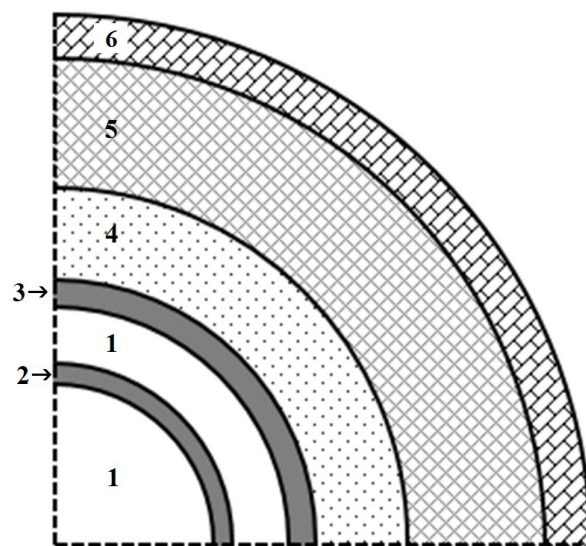


Рис. 2. Схематичное изображение экспериментальных устройств: 1 — газ; 2 — внутренняя оболочка (оболочка второго каскада); 3 — внешняя оболочка (оболочка первого каскада); 4 — оргстекло; 5 — ВВ; 6 — система инициирования

Характеристики сферических устройств

| Номер устройства | Первый каскад | | Второй каскад | | $R_{ВВ}$, см | Наличие оргстекла |
|------------------|---------------|------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| | R_I , см | h_I , см | R_{II} , см | h_{II} , см | | |
| 1 | 7,5 | 0,4 | 5,8 | 0,4 | 18 | + |
| 2 | 10,16 | 0,7 | 4,5 | 0,5 | 18 | - |
| 3 | 10,16 | 0,7 | 3,6 | 0,5 | 22 | + |

зарегистрирован процесс квазиизэнтропического сжатия. По экспериментальным рентгенограммам по методике [16] восстановлены границы оболочек каскадов и определен момент максимального сжатия газа.

Для каждого устройства были проведены эксперименты с соответствующим макетом. Конструкция макета представляет собой в верхней части полусферу (1/2 часть сферического устройства), нижняя часть содержит измерительный блок различных экспериментальных методик [12].

Целями проведения экспериментов с макетами являлись исследование динамики разгона, симметрии полета оболочек и, соответственно, регистрация диаграмм радиальной скорости, (R, t) -диаграмм радиусов контактных границ и времен прихода детонационной и ударной волн. Времена прихода волн в зависимости от углов в сферической системе координат фиксировались электроконтактными датчиками. Точки на начальных участках (R, t) -диаграмм получены при использовании рентгенографической методики. Для измерения скорости полета оболочек применялась гетеродин-интерферометрическая методика с PDV-датчиками [17].

Методика ЛЭГАК

Доопытное двумерное численное моделирование квазиизэнтропического сжатия газов проведено по методике ЛЭГАК [7, 8], которая предназначена для расчета многомерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды. Основные положения методики ЛЭГАК следующие:

- конечно-разностные схемы строятся на основе метода расщепления по физическим процессам;
- используется лагранжево-эйлеров подход на регулярной счетной сетке (четыреугольной в двумерном случае);

- на каждом временном шаге расчет течений сплошной среды осуществляется в два этапа:

- на первом (лагранжевом) этапе сетка увлекается веществом; рассчитываются изменения величин за счет действующих сил;
- на втором (эйлеровом) этапе происходит перестроение счетной сетки по заданным правилам и конвективные потоки величин пересчитываются с одной сетки на другую;

- для локализации сильнодеформируемых контактных границ при расчете многокомпонентных течений используется метод концентраций, в основу которого положены:

- введение концентраций компонентов в смешанной ячейке (массовых и объемных долей);
- определение уравнений замыкания для компонентов смешанной ячейки на лагранжевом этапе вычислений;
- использование специального донорно-акцепторного алгоритма, ограничивающего счетную диффузию [18], для расчета конвективных потоков величин компонентов из смешанных ячеек.

Для уменьшения дисбаланса полной энергии временная и пространственная аппроксимации строятся на основе принципа полной консервативности и согласованности. Разностная схема является явной, условно устойчивой, с ограничением на шаг по времени.

Одноименная программа функционирует как на однопроцессорных, так и на многопроцессорных вычислительных системах [8].

Постановка расчетов

Экспериментальные сферические устройства имеют секторную симметрию. В расчетах использовалась начальная постановка задачи с

1/4 частью центральной плоскости конструкции сферического нагружающего устройства.

Расчеты двумерной осесимметричной задачи проведены в однообластной постановке на неподвижной сферической сетке. Внешний радиус математической области выбран равным 25 см в устройствах 1, 2 и 40 см — в устройстве 3. В качестве вещества окружения экспериментальной сборки задан вакуум. По результатам предварительных расчетов на последовательно сгущающейся сетке выбрано следующее пространственное разбиение: размер ячейки по радиусу 0,01 см, по углу — $0,5^\circ$. Во всей области, за исключением вакуума, построена равномерная счетная сетка. Общее количество точек в расчетах составило $0,35 \div 0,5$ млн.

В табл. 2 для каждого экспериментального устройства представлены названия веществ в постановках расчетов и их начальные состояния, определяемые по значениям плотности ρ_0 и давления P_0 . Номера веществ (кроме вакуума) соответствуют рис. 2. Система инициирования на рис. 2 определяется заданием соответствующей области продуктов взрыва, которые обозначены в табл. 2 аббревиатурой ПВ.

Для устройств 1 и 2 использовалось ВВ на основе гексогена, для устройства 3 — на основе октогена. Для описания поведения веществ использовались уравнения состояния из библиотеки общего фонда УРС-ОФ [19]. Для моделирования поведения газов выбраны уравнения состояния, описание которых можно найти, например, в работах [20–22]. Отметим, что начальное состояние газа характеризуется заданием нену-

левого начального давления P_0 . В расчетах газ находился в покое до прихода ударной волны.

Для моделирования упругопластического поведения стальных оболочек использовалась феноменологическая модель сдвиговой прочности Б. Л. Глушака [23]. Учет откольной прочности стали осуществлялся с помощью модели хрупкого откола с критериальным параметром разрушения $P_{кр} = -4$ ГПа [24].

В экспериментах подрыв ВВ реализовывался при помощи системы инициирования, из-за конструкции которой наблюдалась асимметрия выхода детонационной волны на внутреннюю границу заряда ВВ [12]. В расчетах для всех устройств учет системы инициирования ВВ осуществлялся путем задания слоя мгновенной детонации с криволинейной внутренней поверхностью. Контактная граница этого слоя и ВВ построена с помощью функции $R(\varphi) = R_0 - A \sin\left(\frac{2\pi\varphi}{b} + c\right)$ со специально подобранными параметрами R_0, A, b, c . Процесс распространения детонационной волны моделировался с помощью пошагового алгоритма контроля скорости детонации [25].

Результаты расчетов

Для демонстрации процесса сжатия на примере моделирования работы устройства 3 с дейтерием на рис. 3 приведены поля распределения веществ с изолиниями давления на характерные моменты времени: $t = 9$ мкс — приближение детонационной волны к внешней границе оргстек-

Таблица 2

Начальные параметры веществ

| Номер вещества | Вещество | Устройство | | | | | |
|----------------|----------------|------------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | | 1 | | 2 | | 3 | |
| | | ρ_0 | P_0 | ρ_0 | P_0 | ρ_0 | P_0 |
| 1 | D ₂ | 0,02 | 0,013 | 0,036 | 0,026 | 0,036 | 0,026 |
| 1 | He | 0,025 | 0,0168 | 0,038 | 0,0268 | 0,038 | 0,0252 |
| 2, 3 | Сталь | 7,85 | 0 | 7,85 | 0 | 7,85 | 0 |
| 4 | Оргстекло | 1,18 | 0 | — | — | 1,18 | 0 |
| 5 | ВВ гексоген | 1,86 | 0 | 1,86 | 0 | — | — |
| 5 | ВВ октоген | — | — | — | — | 1,88 | 0 |
| 6 | ПВ гексоген | 1,86 | 0 | 1,86 | 0 | — | — |
| 6 | ПВ октоген | — | — | — | — | 1,88 | 0 |
| | Вакуум | 0,001 | 0 | 0,001 | 0 | 0,001 | 0 |

ла; $t = 14$ и 25 мкс — выход ударной волны на внешние границы первого и второго каскадов соответственно; $t = 31,17$ мкс — время максимального сжатия центрального газа.

С целью обоснования выбора сеточного разбиения проведена оценка влияния пространственной дискретизации на характеристики сжатия устройства 2 с дейтерием. В табл. 3 приведены зависимость значения средней плотности ρ_{\max} центрального газа в момент максимального сжатия от размера счетной ячейки по радиусу h_r и относительное отклонение $\rho_{\max}(h_r)$ от значения линейной экстраполяции на ось ординат ($h_r \rightarrow 0$). Как видно из табл. 3, для сетки с размером $0,01$ см ρ_{\max} отличается от значения линейной экстраполяции не более чем на 2%, что соответствует удовлетворительной точности для задач подобного класса.

Для устройства 2 проведены дополнительные исследования с целью оценки влияния на основные параметры сжатия газа характерного размера счетной ячейки, наличия конструктивных особенностей в виде элементов крепления или отверстий в оболочках каскада, а также влияния упругопластических свойств оболочек.

Таблица 3

Результаты расчетов с вариацией h_r

| h_r , см | ρ_{\max} , г/см ³ | Относительное отклонение ρ_{\max} , % |
|------------|-----------------------------------|--|
| 0,02 | 8,1096 | 3,07 |
| 0,01 | 8,2045 | 1,93 |
| 0,005 | 8,3187 | 0,56 |

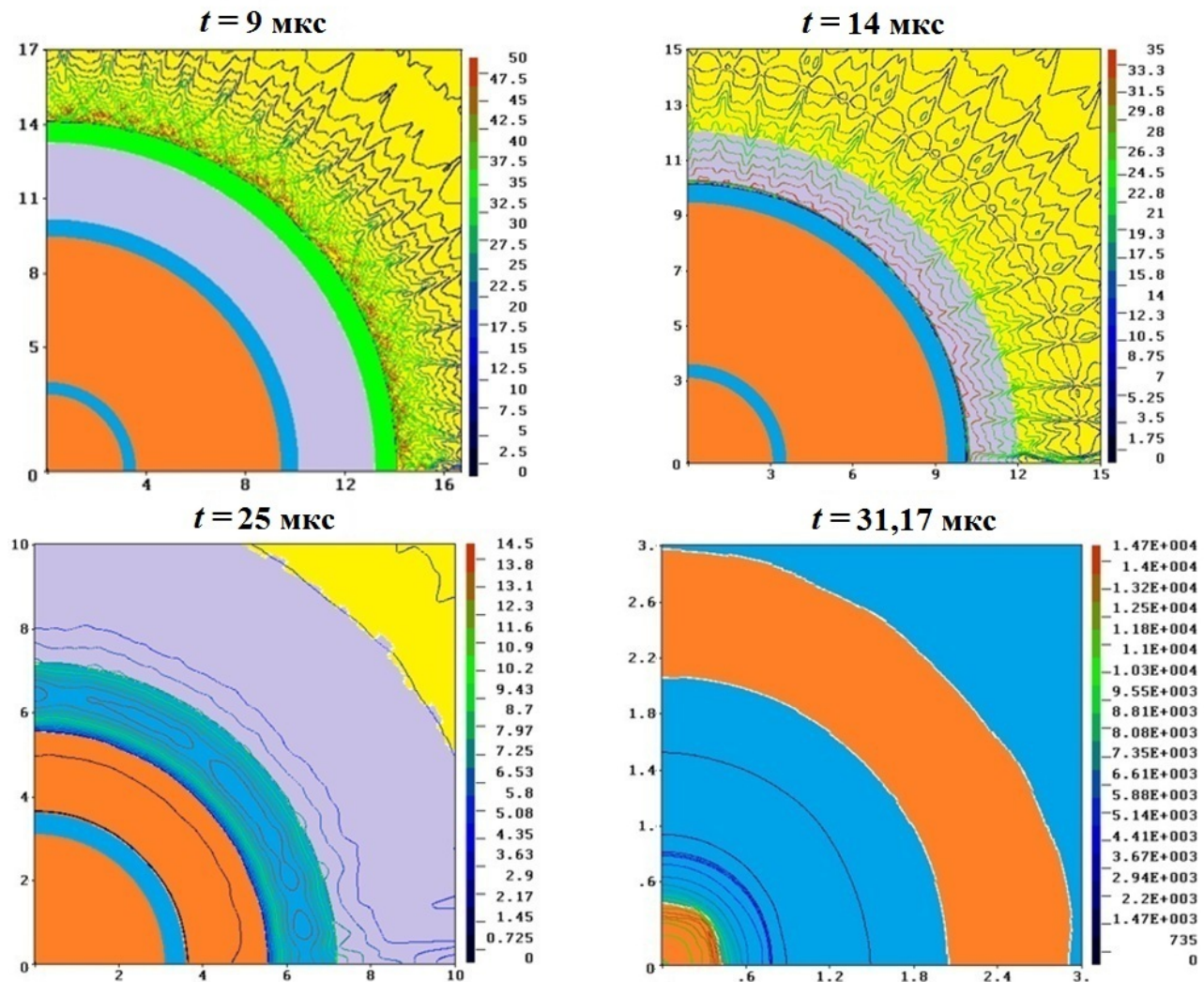


Рис. 3. Динамика сжатия устройства 3 (газ — дейтерий) с изолиниями давления (ГПа)

Анализ влияния наличия элементов крепления внутреннего каскада к оболочке внешнего каскада на параметры сжатия проведен для опыта с дейтерием. Учет элементов крепления приводит к снижению максимального значения средней плотности газа в центральной области на 0,1 %.

Перед экспериментом для напуска газа в центральную полость используют небольшое отверстие в оболочке внутреннего каскада, диаметр которого составляет 0,1 см. При расчетном моделировании с учетом отверстия максимальное значение средней плотности дейтерия центральной области увеличилось примерно на 1,5 % по сравнению с расчетом без отверстия.

Исследование влияния упругопластических свойств оболочки внутреннего каскада проведено в расчетах с дейтерием и гелием. Результаты показывают, что отсутствие упругопластических свойств оболочки приводит к увеличению максимального значения средней плотности центрального газа: на 2 % для дейтерия и на 2,6 % для гелия.

В целом, отмечено незначительное влияние этих факторов на параметры сжатия газа с учетом экспериментальной погрешности измерения его средней плотности, составляющей ~15 %.

Для каждого устройства проведено расчетное моделирование сжатия полусферического макета с целью выбора тактики счета и определения моментов рентгенографирования в эксперименте. В качестве результатов расчетов полусферических макетов приводятся (R, t) -диаграммы движения границ оболочек для каждого устройства.

На рис. 4 показано сравнение расчетных временных зависимостей радиусов оболочек ((R, t) -диаграмм) с экспериментальными данными из работ [10, 12] для устройства 1. Расчетные временные зависимости внутреннего радиуса оболочки второго каскада приведены для лучей, находящихся под углами $\varphi = 0, 30, 90^\circ$; остальные зависимости приведены для $\varphi = 0$.

На рис. 5 показаны результаты для устройства 2. Приведено сравнение расчетных временных зависимостей радиусов внешней и внутренней границ стальных оболочек с экспериментальными данными из работ [12, 15]. Расчетные временные зависимости внутренних радиусов оболочки второго каскада приведены для углов исследования $\varphi = 0, 45, 90^\circ$; остальные зависимости приведены для $\varphi = 0$.

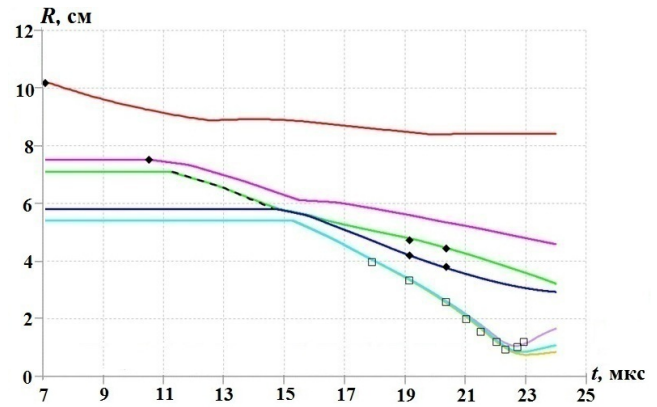


Рис. 4. (R, t) -диаграммы движения границ оболочек устройства 1: эксперимент [10, 12]: \square — результаты рентгенографирования; \blacklozenge — данные электроконтактной методики; — — — данные PDV; расчет: — — — внешняя граница оргстекла; — — — внешняя граница первого каскада; — — — внутренняя граница оболочки первого каскада; — — — внешняя граница второго каскада; — — —, — — —, — — — — внутренняя граница оболочки второго каскада для $\varphi = 0, 30, 90^\circ$ соответственно

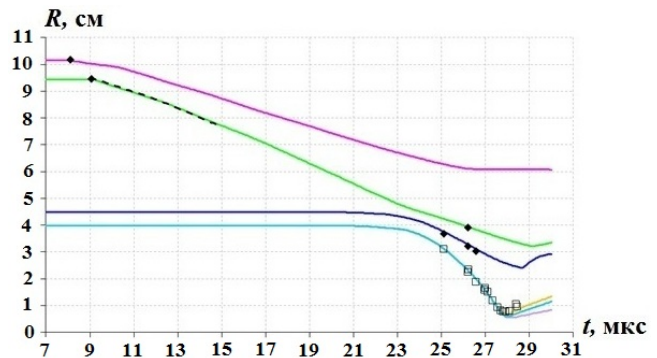


Рис. 5. (R, t) -диаграммы движения границ оболочек устройства 2: эксперимент [12, 15]: \square — результаты рентгенографирования; \blacklozenge — данные электроконтактной методики; — — — данные PDV; расчет: — — — внешняя граница первого каскада; — — — внутренняя граница оболочки первого каскада; — — — внешняя граница второго каскада; — — —, — — —, — — — — внутренняя граница оболочки второго каскада для $\varphi = 0, 45, 90^\circ$ соответственно

На рис. 6 показаны результаты расчета для устройства 3 в виде временных зависимостей радиусов внешней и внутренней границ стальных оболочек, а также оргстекла в сравнении с экспериментальными данными из работы [13]. Расчетные временные зависимости приведены толь-

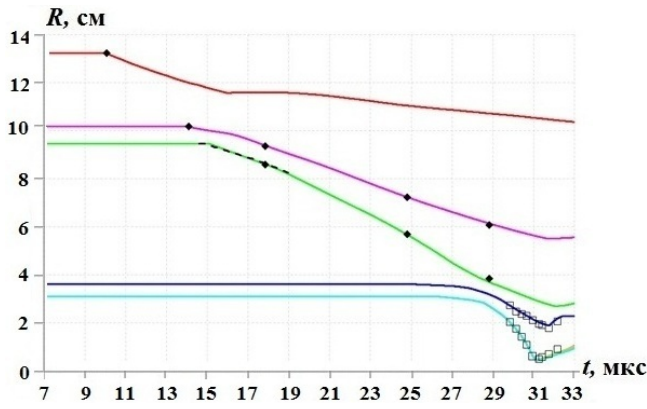


Рис. 6. (R, t) -диаграммы движения границ оболочек устройства 3: эксперимент [13]: \square — результаты рентгенографирования; \blacklozenge — данные электроконтактной методики; — — — данные PDV; расчет: — — — внешняя граница оргстекла; — — — внешняя граница первого каскада; — — — внутренняя граница оболочки первого каскада; — — — внешняя граница второго каскада; — — — внутренняя граница оболочки второго каскада для $\varphi = 0$

ко для $\varphi = 0$, для остальных углов исследования зависимости практически неразличимы.

Отметим, что представленные результаты получены только при экспериментальном и расчетном моделировании сжатия дейтерия. Аналогичные результаты исследований гелия концептуально близки к результатам с дейтерием.

Как видно из рис. 4–6, наибольшее отличие в результатах с использованием того или иного газа наблюдается в моменты, близкие к макси-

мальному сжатию. Время максимального сжатия, необходимое для выбора времен рентгенографирования, определяется моментом, при котором происходит увеличение внутреннего радиуса второго каскада, и находится по расчетным (R, t) -диаграммам из рис. 4–6. Максимальное отличие расчетных данных от экспериментальных значений, полученных с помощью электроконтактных датчиков, не превышает 3,5%.

Расчетное моделирование сжатия газов в полноразмерных сферических устройствах проводится с целью получения параметров состояния сжатого газа, т. е. определения значений плотности и давления. На рис. 7 показаны поля распределения давления и плотности вблизи центральной области в момент остановки внутреннего каскада, полученные в расчете полноразмерного сферического устройства 3 с дейтерием. Черной линией обозначена граница центральной газовой полости.

Как видно из рис. 7, диапазон разброса значений давления и плотности по объему центральной полости на момент максимального сжатия достаточно велик. Учитывая сложный характер распределения, для оценки основных термодинамических параметров сжатого газа использованы их средневзвешенные величины.

В табл. 4 приведены основные результаты расчетов и экспериментальные данные для трех типов экспериментальных устройств. Представлены расчетные значения средней плотности ρ_{\max} и давления P_{\max} центрального газа в момент его максимального сжатия. Расчетное давление

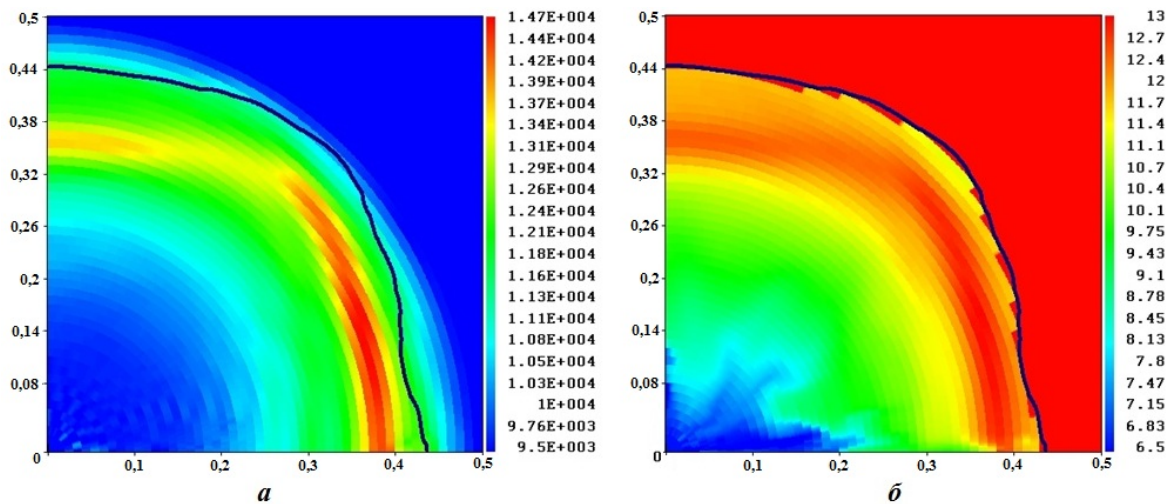


Рис. 7. Поля величин на момент остановки внутренней оболочки устройства 3 (газ — дейтерий): a — давление (ГПа); b — плотность ($\text{г}/\text{см}^3$)

Таблица 4

Результаты экспериментов и расчетов

| Номер устройства | Газ | ρ_0 , г/см ³ | R_{\min} , мм | ρ_{exp} , г/см ³ | P_{calc} , ГПа | ЛЭГАК | |
|------------------|----------------|------------------------------|-----------------|---|-------------------------|---|------------------------|
| | | | | | | ρ_{max} , г/см ³ | P_{max} , ГПа |
| 1 | D ₂ | 0,020 | 9,1 | 4,3 ± 0,9 | 2 210 | 4,76 | 2 059 |
| | He | 0,025 | 10,0 | 3,8 ± 0,9 | 1 580 | 3,57 | 1 466 |
| 2 | D ₂ | 0,036 | 7,07 | 6,5 ± 1,1 | 5 650 | 7,64 | 5 341 |
| | He | 0,038 | 6,6 | 8,4 ± 1,9 | 4 750 | 6,98 | 4 574 |
| 3 | D ₂ | 0,0353 | 4,76 | 10,0 ^{+1,3} _{-0,9} | 11 400 | 10,455 | 10 136 |
| | He | 0,0365 | 4,98 | 8,8 ± 1,3 | 10 062 | 10,38 | 10 086 |

P_{max} вычислялось как средневзвешенное по формуле $P_{\text{max}} = \frac{\sum_i M_i P_i}{\sum_i M_i}$. Здесь i — номер ячейки счетной области; $M_i = \rho_i V_i \alpha_i$ — масса i -й ячейки, где ρ_i , V_i — плотность и объем ячейки, α_i — массовая концентрация центрального газа в i -й ячейке. Прямое измерение в опытах давления газа на момент максимального сжатия не представляется возможным, поэтому оно определяется посредством проведения расчетов одномерной задачи [26] и обозначено в табл. 4 как P_{calc} . Экспериментальное значение средней плотности газа при максимальном сжатии ρ_{exp} вычисляется из предположения сферической формы внутренней границы оболочки второго каскада [10]. Значение внутреннего усредненного радиуса R_{\min} оболочки второго каскада определяется по результатам трассировки заре-

гистрированной рентгенограммы [10–15] по методике обработки [16].

Для оценки погрешности расчетных данных из табл. 4 выбрана максимальная средняя плотность ρ_{max} , значения которой напрямую определяются из эксперимента. Анализ показал, что расчетные отклонения меньше, чем максимальная экспериментальная погрешность, определенная из табл. 4.

Для визуализации результатов на рис. 8, 9 собраны экспериментальные данные в виде зависимостей давления от плотности для дейтерия и гелия из работ [8–15, 22, 27, 28] и расчетные значения из сводной табл. 4, которым соответствуют эксперименты 2011 г. для устройства 1, 2020 г. — для устройства 2 с дейтерием, 2013 г. — для устройства 2 с гелием, а также эксперимент 2016 г. для устройства 3. Как видно из рис. 8, 9, расчетные значения согласо-

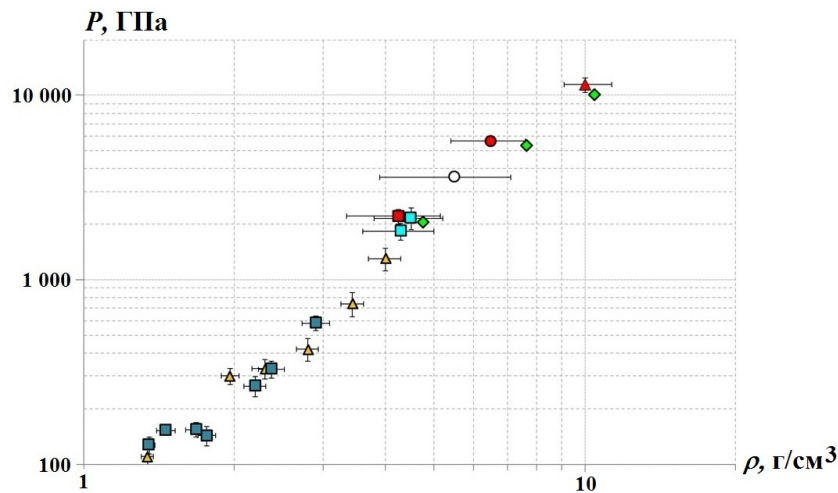


Рис. 8. Сравнение результатов расчетов по методике ЛЭГАК (♦) с экспериментальными зависимостями $P(\rho)$ для дейтерия: ■ — из [28]; ▲ — из [8, 22]; □ — из [9, 12]; ○ — из [27]; ■ — для устройства 1 [10]; ● — для устройства 2 [15]; ▲ — для устройства 3 [13]

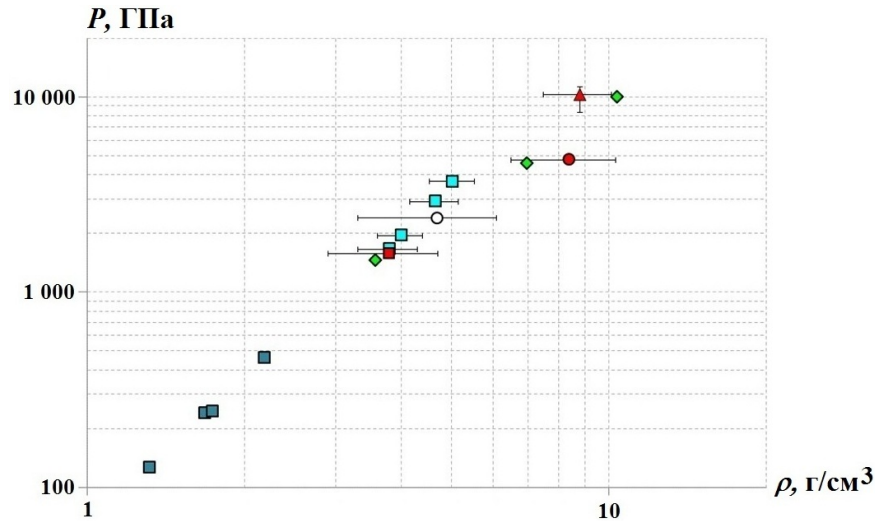


Рис. 9. Сравнение результатов расчетов по методике ЛЭГАК (♦) с экспериментальными зависимостями $P(\rho)$ для гелия: ■ — из [11]; ■ — из [14]; ○ — из [27]; ■ — для устройства 1 [10]; ● — для устройства 2 [12]; ▲ — для устройства 3 [14]

ются с общей картиной экспериментальных данных по квазиизэнтропическому сжатию газов.

Заключение

В работе представлены результаты доопытного численного моделирования работы сферических устройств трех типов для регистрации параметров квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия в области давлений 2000–12000 ГПа и плотностей 3,5–11 г/см³, впервые проведенного по методике ЛЭГАК. Полученные после численного моделирования экспериментальные результаты с приемлемой точностью согласуются с расчетными. На основании сравнения расчетных и экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что методика ЛЭГАК позволяет с удовлетворительной точностью получать численные результаты, предваряющие экспериментальные исследования квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия, и использовать эти результаты с целью оптимизации постановки опыта для эффективного его проведения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках программы по созданию молодежных лабораторий (научная тема № FSWE-2021-0010 "Газодинамика и физика взрыва") и Национального центра физики и математики (г. Саров Нижегородской обл.).

Список литературы

1. Knudson M. D., Hanson D. L., Bailey J. E., Hall C. A., Asay J. R., Anderson W. W. Equation of state measurements in liquid deuterium to 70 GPa // *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 87. Paper 225501.
2. Борисков Г. В., Быков А. И., Егоров Н. И., Жерноклетов М. В., Павлов В. Е., Стрелков И. С., Сурдин О. М., Тимарева В. И., Белов С. И. Исследование нулевой изотермы изотопов водорода в области сверхвысоких давлений // *ЖЭТФ*. 2020. Т. 157. Вып. 2. С. 221–237.
Boriskov G. V., Bykov A. I., Egorov N. I., Zhernokletov M. V., Pavlov V. E., Strelkov I. S., Surdin O. M., Timaryeva V. I., Belov S. I. Issledovanie nulevoy izotermiy izotopov vodoroda v oblasti sverkhvysokikh davleniy // ZhETF. T. 157. Vyp. 2. 2020. S. 221–237.
3. Da Silva L. B., Celliers P., Collins G. W., Budil K. S., Holmes N. C., Barbee T. W. (Jr.), Hammel B. A., Kilkenny J. D., Wallace R. J., Ross M., Cauble R., Ng A., Chiu G. Absolute equation of state measurements on shocked liquid deuterium up to 200 GPa (2 Mbar) // *Physical Review Letters*. 1997. Vol. 78. P. 483–486.
4. Альтшулер Л. В., Трунин Р. Ф., Крупников К. К., Панов Н. В. Взрывные

- лабораторные устройства для исследования сжатия веществ в ударных волнах // УФН. 1996. Т. 166. С. 575—581.
- Altshuler L. V., Trunin R. F., Krupnikov K. K., Panov N. V.* Vzryvnye laboratornye ustroystva dlya issledovaniya szhatiya veshchestv v udarnykh volnakh // UFN. 1996. Т. 166. С. 575—581.
- Fortov V. E., Ilkaev R. I., Arinin V. A., Burtsev V. V., Golubev V. A., Iosilevskiy I. L., Khrustalev V. V., Mikhailov A. L., Mochalov M. A., Ternovoi V. Ya., Zhernokletov M. V.* Phase transition in a strongly nonideal deuterium plasma generated by quasi-isentropic compression at megabar pressures // *Physical Review Letters*. 2007. Vol. 99, No 18. Paper 185001.
 - Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Михайлова О. Л., Толочко А. П., Урлин В. Д.* Экспериментальное определение сжимаемости водорода при плотностях $0,5 \div 2 \text{ г/см}^3$. Металлизация водорода // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16. Вып. 5. С. 286—290.
Grigorev F. V., Kormer S. B., Mikhaylova O. L., Tolochko A. P., Urlin V. D. Eksperimentalnoe opredelenie szhimaemosti vodoroda pri plotnostyakh $0,5 \div 2 \text{ g/cm}^3$. Metalizatsiya vodoroda // *Pisma v ZhETF*. 1972. Т. 16. Вып. 5. С. 286—290.
 - Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Бакулина Е. А., Безрукова И. Ю., Борляев В. В., Володина Н. А., Наумов А. О., Огнева Н. Э., Резвова Т. В., Резянов А. А., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Тихонова А. П., Циберев К. В., Шанин А. А., Ширшова М. О., Шувалова Е. В.* Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 41—50.
Bakhrakh S. M., Velichko S. V., Spiridonov V. F., Avdeev P. A., Artamonov M. V., Bakulina E. A., Bezrukova I. Yu., Borlyayev V. V., Volodina N. A., Naumov A. O., Ogneva N. E., Rezvova T. V., Rezyanov A. A., Starodubov S. V., Taraday I. Yu., Tikhonova A. P., Tsiberev K. V., Shanin A. A.,
 - Shirshova M. O., Shuvalova E. V.* Metodika LEGAK-3D raschyeta tryekhmernykh nestatsionarnykh techeniy mnogokomponentnoy sploshnoy sredy i printsipy ee realizatsii na mnogoprotsessornykh EVM s raspredelyennoy pamyatyu // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2004. Вып. 4. С. 41—50.
 - Авдеев П. А., Артамонов М. В., Бахрах С. М., Величко С. В., Володина Н. А., Воробьева Н. М., Егоршин С. П., Есаева Е. Н., Ковалева А. Д., Лучинин М. В., Проневич С. Н., Спиридонов В. Ф., Тарадай И. Ю., Тарасова А. Н., Шувалова Е. В.* Комплекс программ ЛЭГАК для расчета нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы реализации комплекса на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Там же. 2001. Вып. 3. С. 14—18.
Avdeev A. P., Artamonov M. V., Bakhrakh S. M., Velichko S. V., Volodina N. A., Vorobyeva N. M., Egorshin S. P., Esayeva E. N., Kovalyeva A. D., Luchinin M. V., Pronevich S. N., Spiridonov V. F., Taraday I. Yu., Tarasova A. N., Shuvalova E. V. Kompleks programm LEGAK dlya raschyeta nestatsionarnykh techeniy mnogokomponentnoy sploshnoy sredy i printsipy realizatsii kompleksa na mnogoprotsessornykh EVM s raspredelyennoy pamyatyu // *Tam zhe*. 2001. Вып. 3. С. 14—18.
 - Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Форттов В. Е., Михайлов А. Л., Макаров Ю. М., Аринин В. А., Гришечкин С. К., Бликов А. О., Огородников В. А., Рыжков А. В., Грязнов В. К.* Измерение сжимаемости дейтериевой плазмы при давлении 1800 ГПа // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. Вып. 5. С. 336—340.
Mochalov M. A., Ilkaev R. I., Fortov V. E., Mikhaylov A. L., Makarov Yu. A., Arinin V. A., Grishechkin S. K., Blikov A. O., Ogorodnikov V. A., Ryzhkov A. V., Gryaznov V. K. Izmerenie szhimaemosti deyterievoy plazmy pri davlenii 1800 GPa // *Pisma v ZhETF*. 2010. Т. 92. Вып. 5. С. 336—340.
 - Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Форттов В. Е., Михайлов А. Л., Макаров Ю. М., Аринин В. А., Бликов А. О., Баурин А. Ю., Комраков В. А., Огородников В. А., Рыжков А. В., Грязнов В. К.* Измерение сжимаемости дейтериевой плазмы при давлении 1800 ГПа // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. Вып. 5. С. 336—340.

- ков А. В., Пронин Е. А., Юхимчук А. А. Измерение квазиизентропической сжимаемости гелия и дейтерия при давлениях 1500–2000 ГПа // ЖЭТФ. 2012. Т. 142. Вып. 4 (10). С. 696–709.
- Mochalov M. A., Ilkaev R. I., Fortov V. E., Mikhaylov A. L., Makarov Yu. A., Arinin V. A., Grishchkin S. K., Blikov A. O., Baurin A. Yu., Komrakov V. A., Ogorodnikov V. A., Ryzhkov A. V., Pronin E. A., Yukhimchuk A. A.* Izmerenie kvaziizentropicheskoy szhimaemosti geliya i deyteriya pri davleniyakh 1500–2000 GPa // ZhETF. 2012. T. 142. Vyp. 4 (10). S. 696–709.
11. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Форттов В. Е., Михайлов А. Л., Аринин В. А., Бликов А. О., Баурин А. Ю., Комраков В. А., Огородников В. А., Рыжков А. В., Юхимчук А. А. Измерение квазиизентропической сжимаемости гелия при давлении ~5000 ГПа // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. Вып. 3. С. 172–177.
- Mochalov M. A., Ilkaev R. I., Fortov V. E., Mikhaylov A. L., Arinin V. A., Grishchkin S. K., Blikov A. O., Baurin A. Yu., Komrakov V. A., Ogorodnikov V. A., Ryzhkov A. V., Yukhimchuk A. A.* Izmerenie kvaziizentropicheskoy szhimaemosti geliya pri davlenii ~5000 GPa // Pisma v ZhETF. 2012. T. 96. Vyp. 3. S. 172–177.
12. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Форттов В. Е., Михайлов А. Л., Раевский В. А., Огородников В. А., Юхимчук А. А., Давыдов А. И., Анашкин Н. Н., Аринин В. А., Бликов А. О., Баурин А. Ю., Давыдов Н. Б., Комраков В. А., Логвинов А. И., Маначкин С. Ф., Рыжков А. В., Ткаченко Б. И., Федоров А. В., Финюшин С. А., Калашников Д. А., Чудаков Е. А., Пронин Е. А., Бакулина Е. А. Исследование квазиизентропической сжимаемости дейтерия и гелия при давлениях 1500 – 5000 ГПа // ЖЭТФ. 2014. Т. 146. Вып. 1 (7). С. 169–185.
- Mochalov M. A., Ilkaev R. I., Fortov V. E., Mikhaylov A. L., Rayevskiy V. A., Ogorodnikov V. A., Yukhimchuk A. A., Davydov A. I., Anashkin N. N., Arinin V. A., Blikov A. O., Baurin A. Yu., Davydov N. B., Komrakov V. A., Logvinov A. I., Manachkin S. F., Ryzhkov A. V., Tkachenko B. I., Fyedorov A. V., Finyushin S. A., Kalashnikov D. A., Chudakov E. A., Pro-*
- nin E. A., Bakulina E. A.* Izmerenie kvaziizentropicheskoy szhimaemosti deyteriya i geliya pri davleniyakh 1500 – 5000 GPa // ZhETF. 2014. T. 146. Vyp. 1 (7). S. 169–185.
13. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Форттов В. Е., Михайлов А. Л., Аринин В. А., Бликов А. О., Комраков В. А., Максимкин И. П., Огородников В. А., Рыжков А. В. Квазиизентропическая сжимаемость дейтерия в области давлений ~12 ТПа // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. Вып. 3. С. 173–179.
- Mochalov M. A., Ilkaev R. I., Fortov V. E., Mikhaylov A. L., Arinin V. A., Blikov A. O., Komrakov V. A., Maksimkin I. P., Ogorodnikov V. A., Ryzhkov A. V.* Kvaziizentropicheskaya szhimaemost deyteriya v oblasti davleniy ~12 TPa // Pisma v ZhETF. 2018. T. 107. Vyp. 3. S. 173–179.
14. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Форттов В. Е., Михайлов А. Л., Аринин В. А., Бликов А. О., Огородников В. А., Рыжков А. В., Комраков В. А., Максимкин И. П. Измерение квазиизентропической сжимаемости газообразного гелия при давлении ~10 ТПа // Там же. 2018. Т. 108. Вып. 10. С. 692–696.
- Mochalov M. A., Ilkaev R. I., Fortov V. E., Mikhaylov A. L., Arinin V. A., Blikov A. O., Ogorodnikov V. A., Ryzhkov A. V., Komrakov V. A., Maksimkin I. P.* Izmerenie kvaziizentropicheskoy szhimaemosti gazoobraznogo geliya pri davlenii ~10 TPa // Tam zhe. 2018. T. 108. Vyp. 10. S. 692–696.
15. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Форттов В. Е., Ерунов С. В., Аринин В. А., Бликов А. О., Комраков В. А., Максимкин И. П., Огородников В. А., Рыжков А. В., Грязнов В. К., Иосилевский И. Л., Левашов П. Р. Сжимаемость неидеальной плазмы дейтерия и гелия до 20 ТПа // ЖЭТФ. 2021. Т. 160. Вып. 5 (11). С. 735–756.
- Mochalov M. A., Ilkaev R. I., Fortov V. E., Erunov S. V., Arinin V. A., Blikov A. O., Komrakov V. A., Maksimkin I. P., Ogorodnikov V. A., Ryzhkov A. V., Gryaznov V. K., Iosilevskiy I. L., Levashov P. R.* Szhimaemost idealnoy plazmy deyteriya i geliya do 20 TPa // ZhETF. 2021. T. 160. Vyp. 5 (11). S. 735–756.

16. *Аринин В. А.* Функциональный метод трассировки границ раздела двух сред, имеющих цилиндрическую геометрию // Цифровая обработка сигналов. 2006. Вып. 2. С. 52–55.
Arinin A. V. Funktsionalnyy metod trassirovki granits razdela dvukh sred, imeyushchikh tsilindricheskuyu geometriyu // Tsifrovaya obrabotka signalov. 2006. Vyp. 2. S. 52–55.
17. *Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L., Kuhlow W. W.* Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // Review Scientific Instruments. 2006. Vol. 77. Paper 083108.
18. *Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф.* Метод концентраций расчета нестационарных течений сплошной среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 32–36.
Bakhrakh S. M., Spiridonov V. F. Metod kontsentratsiy raschyeta nestatsionarnykh techeniy sploshnoy sredy // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 1999. Vyp. 4. S. 32–36.
19. *Гордеев Д. Г., Голубкова Е. Ф., Гударенко Л. Ф., Куделькин В. Г., Сапронова О. В.* Современное состояние пакета программ УРС-ОФ для расчета термодинамических и механических свойств веществ // XII Межд. конф. "Супервычисления и математическое моделирование": сб. науч. тр. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. С. 115–118.
Gordeev D. G., Golubkova E. F., Gudarenko L. F., Kudelkin V. G., Sapronova O. V. Sovremennoe sostoyanie paketa programm URS-OF dlya raschyeta termodinamicheskikh i mekhanicheskikh svoystv veshchestv // XII Mezhd. konf. "Supervychisleniya i matematicheskoe modelirovanie": sb. nauch. tr. Sarov: RFYaTs-VNIEF, 2010. S. 115–118.
20. *Копышев В. П., Хрусталева В. В.* Уравнение состояния водорода до 10 Мбар // ПМТФ. 1980. Вып. 1. С. 122–128.
Kopyshov V. P., Khrustal'eva V. V. Uravnenie sostoyaniya vodoroda do 10 Mbar // PMTF. 1980. Vyp. 1. S. 122–128.
21. *Копышев В. П.* Термодинамическая модель плотной жидкости // Там же. 1971. Вып. 1. С. 119–122.
Kopyshov V. P. Termodinamicheskaya model plotnoy zhidkosti // PMTF. 1971. Vyp. 1. P. 119–122.
22. *Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Михайлова О. Л., Толочко А. П., Урлин В. Д.* Уравнение состояния молекулярного водорода. О фазовом переходе в металлическое состояние // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. Вып. 5 (11). С. 1683–1693.
Grigorev F. V., Kormer S. B., Mikhaylova O. L., Tolochko A. P., Urlin V. D. Uravnenie sostoyaniya molekulyarnogo vodoroda. O fazovom perekhode v metallichesкое sostoyanie // ZhETF. 1978. T. 75. Vyp. 5 (11). S. 1683–1693.
23. *Глушак Б. Л., Игнатова О. Н.* Уругопластическая модель динамического деформирования ^{238}U и его сплава с Мо // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1998. Вып. 2. С. 45–49.
Glushak B. L., Ignatova O. N. Urugoplasticheskaya model dinamicheskogo deformirovaniya ^{238}U u ego splava s Mo // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 1998. Vyp. 2. S. 45–49.
24. *Бахрах С. М., Михайлов С. В., Наумов А. О., Спиридонов В. Ф., Шувалова Е. В.* Реализация в комплексе ЛЭГАК разностной схемы расчета уругопластичности с определением ускорений на сторонах счетных ячеек и использование ее для расчета разрушения материалов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 3. С. 72–79.
Bakhrakh S. M., Mikhaylov S. V., Naumov A. O., Spiridonov V. F., Shuvalova E. V. Realizatsiya v komplekse LEGAK raznostnoy skhemy raschyeta urugoplastichnosti s opredeleniem uskoreniy na storonakh schyetykh yacheek i ispolzovanie ee dlya raschyeta razrusheniya materialov // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2001. Vyp. 3. S. 72–79.
25. *Володина Н. А., Краюхин С. А.* Алгоритм итерационной коррекции времен детонации

- за счет учета направления движения детонационной волны в методике ЛЭГАК // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып. 3. С. 35–47.
- Volodina N. A., Krayukhin S. A.* Algoritm iteratsionnoy korrektsii vremyen detonatsii za schyet uchyeta napravleniya dvizheniya detonatsionnoy volny v metodike LEGAK // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2019. Vyp. 3. S. 35–47.
26. *Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н.* Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Там же. 1982. Вып. 3. С. 11–14.
- Gavrilov N. F., Ivanova G. G., Selin V. I., Sofronov V. N.* Programma UP-OK dlya resheniya odnomernykh zadach mekhaniki sploshnoy sredy v odnomernom komplekse // Tam zhe. 1982. Vyp. 3. S. 11–14.
27. *Жерноклетов М. В., Раевский В. А., Маначкин С. Ф., Давыдов Н. Б., Панов К. Н., Рыжков А. В., Аринин В. А., Ткаченко Б. И., Логвинов А. И., Комраков В. А., Давыдов А. И., Анашкин Н. Н.* Результаты экспериментов по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия и гелия до экстремальных давлений ≈ 3000 ГПа // ФГВ. 2018. Т. 54. Вып. 5. С. 13–17.
- Zhernokletov M. V., Raevskiy V. A., Manachkin S. F., Davydov N. B., Panov K. N., Ryzhkov A. V., Arinin V. A., Tkachenko B. I., Logvinov A. I., Komrakov V. A., Davydov A. I., Anashkin N. N.* Rezultaty eksperimentov po kvaziizentropicheskomu szhatiyu deyteriya i geliya do ekstremalnykh davleniy ≈ 3000 GPa // FGV. 2018. T. 54. Vyp. 5. S. 13–17.
28. *Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Фортвов В. Е., Михайлов А. Л., Бликов А. О., Огородников В. А., Грязнов В. К., Иосилевский И. Л.* Квазиизэнтропическая сжимаемость сильнонеидеальной плазмы дейтерия при давлениях до 5500 ГПа: эффекты неидеальности и вырождения // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. Вып. 3. С. 592–620.
- Mochalov M. A., Ilkaev R. I., Fortov V. E., Mikhaylov A. L., Blikov A. O., Ogorodnikov V. A., Gryaznov V. K., Iosilevskiy I. L.* Kvaziizentropicheskaya szhimaemost silno neidealnoy plazmy deyteriya pri davleniyakh do 5500 GPa: efekty neidealnosti i vyrozhdeniya // ZhETF. 2017. T. 151. Vyp. 3. S. 592–620.

Статья поступила в редакцию 11.03.21.
