РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ ДО 5500 ГПа

А. О. Бликов ^{a,b,c*}, М. А. Мочалов ^{a,b}, Е. В. Шувалова ^{a,b}, Е. А. Бакулина ^{a,b},

А. Л. Гамов $^{a,b,c^{**}}$

^а Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики 607188, Саров, Нижегородская обл., Россия

^b Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева 603155, Нижний Новгород, Россия

^с Саровский физико-технический институт — филиал НИЯУ МИФИ 607189, Саров, Нижегородская обл., Россия

> Поступила в редакцию 5 декабря 2024 г., после переработки 15 мая 2025 г. Принята к публикации 17 июня 2025 г.

Проведено численное моделирование сжатия газов (дейтерия и гелия) по методике ЛЭГАК в сквозной постановке в области давлений до 5500 ГПа и плотностей около 8 г/см³. В двумерном расчетном исследовании рассматривались разработанные в РФЯЦ – ВНИИЭФ сферические двухкаскадные устройства двух типов. Проведена верификация математической модели конструкции системы инициирования для достижения наилучшего совпадения с имеющимися экспериментальными результатами.

DOI: 10.31857/S0044451025080140

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних пятнадцати лет в РФЯЦ – ВНИИЭФ проведен ряд экспериментов по измерению квазиизэнтропической сжимаемости газов в области высоких давлений [1–17]. Экспериментальные конструкции представляют собой цилиндрические и сферические двухкаскадные системы. Основным результатом эксперимента является регистрация движения границ оболочек каскадов на моменты времени, близкие к моменту максимального сжатия газа центральной полости с помощью рентгенографического комплекса РФЯЦ – ВНИИЭФ, включающего импульсные источники мощного рентгеновского излучения: три бетатрона БИМ234.3000 [18] и линейный ускоритель ЛИУ-Р-Т [19]. Полученные рентгенограммы используются для восстановления границ оболочек, что позволяет в дальнейшем определить

среднюю плотность сжатого газа. При этом соответствующие значения давления определяются из результатов расчетного моделирования.

Экспериментальное исследование проводится в два этапа: 1) опыты с макетами, в которых регистрируются кинематические параметры движения оболочек и параметры симметрии их схождения; 2) опыты с полноразмерными устройствами для измерения сжимаемости газов. Цель проведения расчетов с макетами заключается в получении предварительной информации, необходимой, например, для определения мест расположения датчиков измерительных методик, защищенных от влияния возмущений, выбора размеров коллиматоров, устраняющих рассеянное рентгеновское излучение, ухудшающее качество рентгенограмм, и моментов времени рентгенографирования. Основной целью расчетного исследования полноразмерного устройства является получение параметров сжатия газа.

Численное моделирование работы полноразмерного устройства можно разделить на две части:

^{*} E-mail: mcleodjr@mail.ru

^{**} E-mail: al.gamov@physics.msu.ru

- доопытное, с целью анализа предполагаемых для получения результатов экспериментов, а также оптимизации их постановок;
- постопытное, с целью калибровки расчетной методики и оценки влияния параметров математической и физической постановок на термодинамические и газодинамические характеристики сжатых газов.

Ранее результаты доопытного численного моделирования сжатия дейтерия и гелия в сферических двухкаскадных устройствах, выполненного по методике ЛЭГАК [20], были представлены в [21]. Отметим, что в [21] использовали упрощенный способ моделирования системы инициирования.

В настоящей работе приводятся результаты постопытного численного моделирования сжатия дейтерия и гелия в двух сферических устройствах из работы [7] в постановке, приближенной к реальной конструкции системы инициирования. Конструкции [7] имеют одинаковые нагружающие устройства, состоящие из системы инициирования и заряда взрывчатого вещества (ВВ), но различные габариты внутренних каскадов.

Расчетное исследование, как и экспериментальное, состояло из двух этапов. На первом этапе выполнена калибровка динамики и асимметрии сжатия конструкции. На втором – определены параметры сжатия газов при использовании математической и физической постановок, подобранных по итогам первого этапа исследования.

2. ПОСТАНОВКА РАСЧЕТОВ

Начальная постановка двумерных расчетов двухкаскадных сферических устройств из работ [2, 3, 5, 7, 14], представленных 1/4 частью окружности, приведена на рис. 1: полусферические макеты устройств № 1 и № 2 на рис. 1 *а* и 1 *b*, полноразмерные устройства № 1 и № 2 на рис. 1 *с* и 1 *d*. Геометрические характеристики сферических устройств приведены в табл. 1.

В полноразмерных устройствах центральная полость и пространство между стальными оболочками заполняются исследуемым газом, в макете газ отсутствует. В устройстве №1 между внешним каскадом и ВВ расположен слой из оргстекла.

Макет представляет собой полусферическое устройство, в центре которого вместо каскада II расположен измерительный приемник (элемент 7 на рис. 1 a и 1 b) с электроконтактами и датчиками



Рис. 1. Начальная расчетная постановка экспериментальных устройств: а) макет устройства № 1, b) макет устройства № 2, c) устройство № 1, d) устройство № 2 (1 — газ, 2 — оболочка каскада I (внешнего), 3 — оболочка каскада II, 4 — ВВ, 5 — оргстекло, 6 — ВВ, система инициирования, 7 — измерительный приемник с датчиками, 8 опора, 9 — подставка)

РDV [22] для измерения асимметрии и динамики движения ударной волны (УВ) и внутренней границы оболочки (ВГО). Результаты опытов с макетами устройств №1 и №2 частично опубликованы ранее [2,5].

Расчетная область полноразмерного устройства ввиду симметрии конструкции составила 1/4 часть центральной плоскости. Двумерные расчеты проведены в осесимметричной постановке (ось симметрии — ось x на рис. 1) на неподвижной сферической сетке. Внешний радиус математической области был задан равным 25 см. Вещество окружения экспериментальной сборки задано вакуумом. Использовалось пространственное разбиение такое же, как и в доопытном исследовании [21]: размер ячейки по радиусу составлял 0.01 см, по углу — 0.5°. Общее количество точек в расчетах составило 0.35-0.7 млн. В табл. 2 представлены параметры начального состояния веществ: плотность ρ_0 и давление P_0 . Для описания поведения веществ использовались уравнения состояния (УРС) библиотеки УРС-ОФ [23]. Для газов выбраны УРС, описание которых представлено в [24-26]. Для оргстекла использовано УРС из работы [27].

Моделирование упругопластического деформирования стальных оболочек осуществлялось с по-

	Каскад I Каскад II					
№ устройства	$R_{\rm I}, {\rm cm}$	<i>h</i> _I , см	R _{II} , см	<i>h</i> _{II} , см	R^* , см	Наличие оргстекла
1	7.5	0.4	5.8	0.4	18	+
2	10.16	0.7	4.5	0.5	18	_

Таблица 1. Характеристики сферических устройств ($R_{I,II}$ и $h_{I,II}$ — внешние радиусы и толщины оболочек каскадов I и II, R^* — внешний радиус заряда BB

Таблица	2.	Начальные	параметры	веществ
---------	----	-----------	-----------	---------

№ области	Вещество	№ устройства	$ ho_0,$ г/см 3	$P_0, \Gamma \Pi a$
	D	D 1		0.013
1	D	2	0.036	0.026
1	Но	1	0.025	0.0168
	IIe	2	0.038	0.0268
2, 3, 7, 8	сталь	1, 2	7.85	0
4, 6	ВВ (октоген)	1, 2	1.86	0
5, 9	оргстекло	1	1.18	0

мощью модели с постоянным пределом текучести Y = 0.9 ГПа с коэффициентом Пуассона 0.3 (модель Мизеса [28]). Для стали использовалась бинарная модель разрушения, в которой в дополнение к хрупкому отколу со значением откольной прочности 4 ГПа [29] вводится разрушение по пороговому значению интенсивности пластических деформаций $e_{max}^{pl} = 0.6$ [30].

Система одновременного инициирования состояла из большого числа элементов, которые покрывают 60 % сферической поверхности основного ВВ. Времена срабатывания этих элементов были определены экспериментально. В результате использования такого способа инициирования ВВ возникают следующие особенности:

- энергоотбор оболочек от продуктов взрыва оказывается несколько меньше, чем при инициировании ВВ по всей поверхности;
- движущаяся к центру детонационная волна формируется из множества волн, исходящих от отдельных инициирующих элементов, поэтому она имеет области повышенного и пониженного давления и асимметрию фронта.

При численном моделировании сжатия устройств необходимо учитывать обе эти особенности. С этой целью для расчетов была выбрана упрощенная двумерная инициирующая система, состоящая из семи кольцевых элементов (аналогичный подход используется в работе [31]). Как показано на рис. 1, элементы расположены в слое ВВ у внешней поверхности. Их выгорание задается мгновенным, что, как известно [32], приводит к снижению энергоотбора. Варьируя толщину элементов, можно имитировать потери, связанные с системой инициирования. Расчет детонации основного ВВ проводился из точек фронта, определенного по основаниям и торцам кольцевых элементов, согласно методу из работы [33]. В рамках численного исследования были проведены расчеты следующих систем:

- полусферических макетов устройств №№1, 2 с измерительным приемником;
- сферических устройств №№1, 2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

На начальном этапе экспериментального исследования проводились опыты с полусферическими макетами, затем – опыт со сферическим устройством. В опытах с полусферическими макетами зафиксированы следующие величины:

- времена прихода детонационной и ударной волн с помощью электроконтактных датчиков, расположенных на границах веществ;
- радиальная скорость ВГО внешнего каскада с помощью метода лазерной интерферометрии;

 рентгеновские изображения оболочки внешнего каскада для регистрации траектории ее движения.

В опытах с полноразмерными устройствами зарегистрированы рентгенографические изображения положения границ оболочек вблизи момента максимального сжатия. Использование методики из работ [34, 35] позволило восстановить границы оболочек каскадов, по которым определено максимальное значение плотности газа в центральной полости устройства.

3.1. Макеты устройств №№1, 2

Исследование полусферических макетов проводилось с целью калибровки расчетной модели на экспериментальные результаты динамики и асимметрии полета оболочки внешнего каскада. Проведены расчеты с вариацией толщины элементов инициирования в пределах от 4.5 до 6 мм. По итогам сравнения расчетных и экспериментальных результатов наилучшее описание получено при толщине элементов 4.5 мм. Для демонстрации процесса детонации основного ВВ, а также процесса формирования детонационной волны из множества волн системы инициирования на рис. 2 приведены поля распределения веществ с изолиниями давления на следующие моменты времени: t = 32, 33 мкс — формирование детонационной волны, t = 36 мкс — приближение ее к внешней границе оргстекла, t = 40 мкс завершение детонации основного ВВ и выход УВ на внешнюю границу оргстекла. Отсчет времени в настоящей работе проводится от момента подрыва инициирующих элементов.

На рис. 3 приведено сравнение расчетного времени выхода детонационной волны на наружную границу оргстекла с экспериментальными значениями. Отметим, что эта величина не зависит от номера устройств, так как в их конструкции используется одна и та же система инициирования и одинаковые заряды ВВ. Как видно на рис. 3, расчетные значения находятся внутри интервала экспериментальных значений.

На рис. 4 и 5 приведены зависимости времен срабатывания электроконтактных датчиков при выходе УВ на внутреннюю границу оболочки внешнего каскада от угла для макетов устройств №1 и №2 соответственно. Рис. 4 и 5 демонстрируют, что расчетные времена выхода УВ на ВГО хорошо согласуются с экспериментальными результатами.



Рис. 2. Динамика процесса детонации в макете устройства № 1



Рис. 3. Зависимость времени выхода детонационной волны на внутреннюю границу ВВ от угла (макет устройства № 1): квадраты — эксперимент, сплошная линия — расчет

Рис. 4. Зависимость времени выхода УВ на ВГО внешнего каскада от угла (макет устройства № 1): квадраты — эксперимент, сплошная линия — расчет

Рис. 5. Зависимость времени выхода УВ на ВГО внешнего каскада от угла (макет устройства № 2): квадраты — эксперимент, сплошная линия — расчет

Рис. 6. Зависимость скорости ВГО внешнего каскада от времени (макет устройства № 1): сплошная линия — эксперимент, штриховая — расчет

Из рис. 6 и 7 видно, что расчеты воспроизводят скорости движения ВГО внешнего каскада для обоих макетов.

Рис. 7. Зависимость скорости ВГО внешнего каскада от времени для углов θ от 0 до 45° (макет устройства № 2): черные сплошная, штриховая, пунктирная линии и серая сплошная — эксперимент, цветные сплошные — расчет

Рис. 8. Зависимость времени удара экрана по приемнику от угла (макет устройства № 1): квадраты — эксперимент, сплошная линия — расчет

Рис. 9. Зависимость времени удара экрана по приемнику от угла (макет устройства № 2): квадраты — эксперимент, сплошная линия — расчет

На рис. 8 и 9 представлены результаты расчетов и экспериментальные значения времен срабатывания электроконтактных датчиков при ударе о приемник для макетов устройств № 1 и № 2 соответ-

Рис. 10. Границы стальной оболочки на рентгенограмме в момент времени 47 мкс: сплошные линии — экспериментальное положение границ, штриховые — расчетное

Рис. 11. Границы стальной оболочки на рентгенограмме в момент времени 48.5 мкс: сплошные линии — экспериментальное положение границ, штриховые — расчетное

ственно. Расчетные значения находятся внутри интервала экспериментальных результатов, полученных для разных полярных углов расположения датчиков регистрации.

На рис. 10, 11 приведено сравнение расположения расчетных границ стальной оболочки внешнего каскада с результатами обработки изображений из опыта с макетом устройства № 1 на времена рентгенографирования 47 и 48.5 мкс соответственно. Обработка рентгенограмм была выполнена методом функциональной трассировки [34,35]. Экспериментальные и расчетные кривые согласуются друг с другом.

3.2. Сферическое устройство №1

В соответствии с математической моделью, откалиброванной по результатам газодинамических исследований, были проведены расчеты сферических двухкаскадных устройств, в которых исследовался процесс квазиизэнтропического сжатия дейтерия и гелия.

Для демонстрации процесса сжатия на примере моделирования работы устройства № 1 на рис. 12 приведены поля распределения веществ в характерные моменты времени: t = 43-46 мкс — выход УВ на внешние границы внешнего и внутреннего каскадов соответственно, t = 53 мкс — движение оболочек к центру, t = 54 мкс — момент, близкий к максимальному сжатию центрального газа.

На рис. 13 приведены рентгенограммы сферического устройства № 1 с дейтерием [2], на которые нанесены границы газовой полости и положение УВ на моменты, близкие к максимальному сжатию центрального газа. Как видно на рис. 13, на стадии максимального сжатия и особенно при разлете на грани-

Рис. 12. Динамика сжатия устройства № 1

це газ–оболочка растут возмущения за счет неустойчивости Релея – Тейлора.

На рис. 14 приведены временные зависимости средней плотности дейтерия и эквивалентного радиуса внутренней границы оболочки каскада II (R(t)-диаграмма), полученные в расчете и опыте [2]. Как видно, максимальное сжатие газа в эксперименте и расчете вероятнее всего происходит между временами рентгенографирования 54.36 и 54.76 мкс. Стоит отметить, что расчетные значения плотности газа и эквивалентного радиуса внутренней оболочки на этапе разворота и разлета системы заметно от-

Рис. 13. Границы полости и отраженной УВ на рентгенограмме (устройство № 1, дейтерий): красная линия экспериментальное положение границы газа, желтая расчетное; зеленая — экспериментальное положение УВ, синяя — расчетное

t, мкс	$P_{calc},$ ГПа	$ ho_{calc}, { m r/cm}^3$	$ ho_{exp},$ г/см 3 $[2,5]$	Примечание
54.36	2100	4.6		момент максимального сжатия из эксперимента
54.53	2500	5.1	$4.3 {\pm} 0.9$	момент максимального сжатия в расчете
54.45	2100	4.8		момент максимального сжатия в расчете [21]

Таблица 3. Параметры сжатия дейтерия (устройство № 1)

Таблица 4. Параметры сжатия гелия (устройство № 1)

t, мкс	$P_{calc},$ ГПа	$ ho_{calc}, {\rm g}/{ m cm}^3$	$ ho_{exp}, \mathrm{r/cm}^3$ [2]	Примечание
54.36	1300	3.2		момент максимального сжатия из эксперимента
54.7	1700	3.7	$3.8{\pm}0.8$	момент максимального сжатия в расчете
54.65	1500	3.6		момент максимального сжатия в расчете [21]

Рис. 14. Зависимость плотности дейтерия от времени (сплошная линия и квадраты) и R(t)-диаграмма (штриховая линия и кружки) для устройства № 1 из работы [2]: значки — эксперимент, линии — расчет

личаются от экспериментальных. Это различие, по всей видимости, вызвано образованием неустойчивости на границе газ-оболочка и, как следствие, менее точной обработкой экспериментальных рентгенограмм. Объяснение этого эффекта также демонстрирует рис. 13 *b*, где видно, что расчетная граница газа лучше согласуется с экспериментом, в то время как трассировка завышает объем газа.

В табл. З приведены основные результаты расчета в виде следующих значений: ρ_{calc} , P_{calc} — расчетные значения средней плотности и давления центрального газа в момент его максимального сжатия. Расчетное давление P_{calc} вычисляется как средневзвешенное: $P_{calc} = \sum_i M_i P_i / \sum_i M_i$, где i — номер ячейки счетной области; P_i , M_i — давление и масса газа в ячейке i. Экспериментальное значение средней плотности газа ρ_{exp} определено из закона сохранения массы газа и с учетом объема полости, полученного в результате трассировки границ газа

на экспериментальном снимке методикой [34,35].

Из представленных на рис. 14 и в табл. 3 результатов видно, что расчетное значение максимальной плотности дейтерия выше аналогичного значения из расчета, проведенного до опыта [21]. Все расчетные значения плотности согласуются с экспериментальным значением с учетом погрешности.

Рис. 15. Границы полости и отраженной УВ на рентгенограмме (устройство № 1, гелий): красная линия — экспериментальное положение границы газа, желтая — расчетное; зеленая — экспериментальное положение УВ, синяя расчетное

Наложение границ полости и отраженной УВ из расчета сжатия гелия в устройстве №1 на экспериментальные рентгенограммы для моментов времени, близких к максимальному сжатию центрального газа, показано на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что, как и в случае сжатия дейтерия, внутренняя граница оболочки в расчетах с гелием имеет возмущения.

На рис. 16 приведены временные зависимости средней плотности гелия и R(t)-диаграмма, полученные в расчете и опыте [2]. Видно, что с учетом

Рис. 16. Зависимость плотности гелия от времени (сплошная линия и квадраты) и R(t)-диаграмма (штриховая линия и кружки) для устройства № 1 из работы [2]: значки — эксперимент, линии — расчет

экспериментальной погрешности расчетные значения совпадают с экспериментальными за исключением участка кривой, соответствующего разлету оболочки внутреннего каскада.

В табл. 4 приведены основные результаты расчета и экспериментальные значения сжатия гелия. Из представленных результатов видно, что значение максимальной плотности гелия, полученное в расчете, выше максимального значения из расчета, предваряющего опыт [21]. Как и при расчетном моделировании сжатия дейтерия, все значения ρ_{calc} согласуются с экспериментальным значением ρ_{exp} с учетом погрешности.

3.3. Сферическое устройство № 2

На рис. 17 представлены рентгенограммы, полученные при сжатии дейтерия в опытах со сферическим устройством № 2 [5,14]. На рентгенограммы нанесены расчетные и экспериментальные границы газовой полости и отраженной УВ на моменты времени, близкие к максимальному сжатию газа. Видно, что расчет качественно воспроизводит форму газовой полости. В расчете устройства № 2 получается форма полости, отличная от полости устройства № 1. На границе газ–оболочка развиваются длинноволновые возмущения, которые придают полости форму «бабочки», что согласуется с видом полости на экспериментальных снимках.

На рис. 18 представлены значения плотности центрального газа, а также R(t)-диаграмма и значения этих величин, полученные в опыте [5,14]. Как и в случае сжатия устройства № 1, отличия расчетных результатов от экспериментальных наблюдаются на этапе разлета системы.

Рис. 17. Границы полости и отраженной УВ на рентгенограмме (устройство № 2, дейтерий): красная линия экспериментальное положение границы газа, желтая расчетное; голубая — экспериментальное положение УВ, синяя — расчетное

Основные расчетные параметры дейтерия приведены в табл. 5 в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Также в табл. 5 представлены результаты расчета из работы [21]. Видно, что расчетные значения максимальной плотности центрального газа согласуются с экспериментальным значением ρ_{exp} с учетом погрешности.

На рис. 19 представлены рентгенограммы, полученные при сжатии гелия в опытах со сферическим устройством № 2 [3], с границами газовой полости и отраженной УВ. Видно, что экспериментальная и расчетная кривые качественно совпадают.

Рис. 18. Зависимость плотности дейтерия от времени (сплошная линия и светлые квадраты) и R(t)-диаграмма (штриховая линия и темные квадраты) для устройства № 2 из работ [5,14]: значки — эксперимент, линии — расчет

На рис. 20 приведены расчетные и экспериментальные значения плотности газа в центральной полости, а также представлено сравнение временных зависимостей внутреннего радиуса оболочки каскада II, полученных в расчете и опыте [3].

Основные результаты расчетов и экспериментально полученное значение максимальной плотно-

t, мкс	$P_{calc},$ ГПа	$ ho_{calc}, {\rm g}/{ m cm}^3$	$ ho_{exp}, \mathrm{r/cm^3}$ [14]	Примечание
59.21	4800	7.2		NONOME NOROMNO II NODO ANOMUM NO OKADONNOME
59.43	4500	7.0	6.5 ± 1.1	момент максимального сжатия из эксперимента
59.27	5400	7.6		момент максимального сжатия в расчете
59.13	5300	7.6		момент максимального сжатия в расчете [21]

Таблица 5. Параметры сжатия дейтерия (устройство № 2)

Таблица 6. Параметры сжатия гелия (устройство № 2)

t, мкс	$P_{calc},$ ГПа	$ ho_{calc}, { m r/cm}^3$	$ ho_{exp}, \mathrm{r/cm}^3$ [8]	Примечание
59.55	4200	6.7		момент максимального сжатия из эксперимента
59.43	4500	7.0	$7.4{\pm}1.0$	момент максимального сжатия в расчете
59.36	4600	7.0		момент максимального сжатия в расчете [21]

Рис. 19. Границы полости и отраженной УВ на рентгенограмме (устройство № 2, гелий): красная линия — экспериментальное положение границы газа, желтая — расчетное; зеленая — экспериментальное положение УВ, синяя расчетное

Рис. 20. Зависимость плотности гелия от времени (сплошная линия и квадраты) и R(t)-диаграмма (штриховая линия и кружки) для устройства № 2 из работы [3]: значки — эксперимент, линии — расчет

сти гелия приведены в табл. 6 наряду с результатами расчета из работы [21]. Видно, что расчетные значения максимальной плотности гелия в центральной полости согласуются с экспериментальным значением с учетом погрешности, как и при аналогичном численном исследовании сжатия дейтерия.

С целью анализа разных способов инициирования и сравнения с экспериментальными результатами на рис. 21 и 22 приведены результаты расчетов из табл. 3–6 в виде зависимостей давления от плотности для дейтерия и гелия соответственно.

3.4. Обобщение результатов

На рис. 21 представлены результаты опытов, выполненных в РФЯЦ – ВНИИЭФ за последние десятилетия, по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия в сферических устройствах в диапазоне давлений от 1 до 20 ТПа из работ [1,2,5,7,9,11,14,15,26].

Аналогичные экспериментальные результаты приведены для гелия на рис. 22 для сферических устройств из работ [2, 3, 5, 6, 8, 10, 11, 14, 15, 17]. Следует отметить, что в рассмотренном диапазоне состояний экспериментальные результаты других мировых лабораторий отсутствуют.

На рис. 21 и 22 представлены изэнтропы, рассчитанные по УРС из [24] и УРС из [25] соответственно, описывающие начальные и конечные состояния газа в опытах. Значения приращения энтропии $\delta S = S - S_0$ получены численным интегрированием по указанным УРС. В качестве начала отсчета выбрано значение энтропии S_0 , соответствующее исходному состоянию газа в устройстве № 2. Как видно, эксперименты по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия и гелия, представленные в се-

Рис. 21. Зависимость $P(\rho)$ для дейтерия. Эксперименты: $\diamond - [26]$, $\circ - [1, 9, 11, 15]$; • — устройства № 1 [2] и № 2 [5, 7, 14]. Расчеты: звездочки — результаты настоящей работы (закрашенные — устройство № 1, пустые — № 2), $\Box - [21]$. Линии — изэнтропы, рассчитанные по УРС [24]: черная — проходящая через начальное состояние газа устройства № 2, $\delta S = 0$; красная — устройства № 1, $\delta S = 1.36 \ \text{Дж/г-K}$; зеленая — $\delta S = 13.66 \ \text{Дж/r-K}$; синяя — $\delta S = 12.21 \ \text{Дж/r-K}$

Рис. 22. Зависимость $P(\rho)$ для гелия. Эксперименты: о — [5,6,8,10,11,14,15,17]; • — устройства № 1 [2] и № 2 [3,8]. Расчеты: звездочки — результаты настоящей работы (закрашенные — устройство № 1, пустые — № 2), \Box — [21]. Линии — изэнтропы, рассчитанные по УРС [25]: черная проходящая через начальное состояние газа устройства № 2, $\delta S = 0$; красная — устройства № 1, $\delta S = 0.95 \ Дж/г\cdotК$; зеленая — $\delta S = 8.35 \ Дж/г\cdotК$; синяя — $\delta S = 5.30 \ Дж/г\cdotК$

рии работ РФЯЦ – ВНИИЭФ, образуют обширную и цельную совокупность данных по УРС сильносжатой и разогретой плазмы, покрывающую значительную область фазовой диаграммы от суб- до мультимегабарных давлений и плотностей, в 100 раз превышающих соответствующие значения для жидких фаз рассматриваемых газов. Результаты настоящей работы согласуются с общей картиной экспериментальных значений по квазиизэнтропическому сжатию газов и с результатами доопытного расчетного моделирования [21].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная задача создания двумерных моделей состоит в их применении для исследовательских расчетов, например, при вариации сжимаемости газа с целью подбора уравнения состояния. В результате выполненной работы созданы калиброванные расчетные двумерные модели, с использованием которых впервые проведено сквозное моделирование квазиизэнтропического сжатия дейтерия и гелия в двух сферических устройствах в области давлений до 5500 ГПа. Хотя полученные модели являются приближенными (реальная конструкция имеет существенно трехмерные элементы), они значительно лучше описывают асимметрию движения оболочек и сжатие газов за счет учета развития неустойчивости Рэлея-Тейлора при торможении стальной оболочки на сжатом газе по сравнению с проведенными ранее одномерными расчетами и двумерными расчетами с упрощенным подходом к моделированию инициирования BB. Впервые получено удовлетворительное согласование формы и размеров газовой полости на этапе ее разлета. Плотности газов (дейтерия и гелия), полученные в расчетах с использованием УРС Копышева – Хрусталева для дейтерия и для гелия, согласуются с экспериментальными данными (входят в экспериментальную погрешность). Расчетные результаты качественно и количественно описывают форму газовых полостей на этапе максимального сжатия. Так же, как и в эксперименте, на этапе разлета расчеты показывают рост неустойчивости, который, в свою очередь, затрудняет трассировку контуров газовых полостей на экспериментальных снимках.

Финансирование. Настоящая работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по Государственному контракту № Н.4ц.241.4Д.23.1085 и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по созданию молодежных лабораторий (научная тема № FSWE-2024-0004 «Газодинамика и физика взрыва»).

ЛИТЕРАТУРА

- М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Измерение сжимаемости дейтериевой плазмы при давлении 1800 ГПа, Письма в ЖЭТФ 92, 336 (2010).
- М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия и дейтерия при давлениях 1500-2000 ГПа, ЖЭТФ 142, 669 (2012).
- М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия при давлении 5000 ГПа, Письма в ЖЭТФ 96, 172 (2012).
- М. В. Жерноклетов, В. К. Грязнов, В. А. Аринин и др., Квазиизэнтропическое сжатие плотного газообразного гелия в области давлений до 500 ГПа, Письма в ЖЭТФ 96, 479 (2012).
- М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Исследование квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия при давлениях 1500–5000 ГПа, ЖЭТФ 146, 169 (2014).
- М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Термодинамические свойства неидеальной плазмы гелия при квазиизэнтропическом сжатии в 575 раз давлением 3000 ГПа, Письма в ЖЭТФ 101, 575 (2015).
- М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Квазиизэнтропическая сжимаемость сильнонеидеальной плазмы дейтерия при давлениях до 5500 ГПа: эффекты неидеальности и вырождения, ЖЭТФ 151, 592 (2017).
- М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Термодинамические параметры гелия при ударноволновом и квазиизэнтропическом сжатиях в области давлений до 4800 ГПа и при степенях сжатий до 900, ЖЭТФ 152, 1113 (2017).
- М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Квазиизэнтропическая сжимаемость дейтерия в области давлений 12 ТПа, Письма в ЖЭТФ 107, 173 (2018).
- 10. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Измерение квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия при давлении ~ 10 ТПа, Письма в ЖЭТФ 108, 692 (2018).
- М. В. Жерноклетов, В. А. Раевский, С. Ф. Маначкин и др., Результаты экспериментов по квазиизоэнтропическому сжатию дейтерия и гелия до экстремальных давлений ~ 3000 ГПа, ФГВ 54 (5), 13 (2018).

- Г. В. Борисков, А. И. Быков, Н. И. Егоров и др., Исследование нулевой изотермы изотопов водорода в области сверхвысоких давлений, ЖЭТФ 157, 221 (2020).
- 13. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Квазиизэнтропическое сжатие неидеальной плазмы дейтерия и его смеси с гелием в области давлений до 250 ГПа, ЖЭТФ 159, 1118 (2021).
- 14. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Сжимаемость неидеальной плазмы дейтерия и гелия до 20 ТПа, ЖЭТФ 160, 735 (2021).
- 15. М. В. Жерноклетов, С. Ф. Маначкин, Н. Б. Давыдов и др., Квазиизэнтропическое сжатие газообразных дейтерия и гелия в сферических конструкциях при терапаскальных давлениях, ЖЭТФ 163, 260 (2023).
- 16. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Квазиизэнтропическое сжатие неидеальной плазмы гелия при постоянной конечной температуре 21000 К при давлениях до 600 ГПа, ЖЭТФ 163, 439 (2023).
- 17. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, С. В. Ерунов и др., Экспериментальное исследование сжимаемости плазмы гелия при давлении до 20 ТПа, Письма в ЖЭТФ 118, 579 (2023).
- Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov et al., Uncored Betatron BIM-M a Source of Bremsstrahlung for Flash Radiography, in 11th IEEE Pulsed Power Conference, Digest of Technical Papers, ed. by G. Cooperstein and I. Vitkovitsky, Vol. 2, (1997), p. 1669.
- 19. В. Ф. Басманов, В. С. Гордеев, А. В. Гришин и др., Обзор сильноточных импульсных ускорителей электронов, созданных в РФЯЦ – ВНИИ-ЭФ на базе ступенчатых линий, Труды РФЯЦ – ВНИИЭФ 20, 172 (2015).
- 20. С. М. Бахрах, С. В. Величко, В. Ф. Спиридонов и др., Комплекс программ ЛЭГАК для расчета нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы реализации комплекса на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью, ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов № 3, 14 (2001).
- 21. А. О. Бликов, М. А. Мочалов, Е. В. Шувалова и др., Доопытное моделирование квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия в области высоких давлений по методике ЛЭГАК, ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, № 2, 40 (2022).

- 22. O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez et al., Compact System for High-Speed Velocimetry Using Heterodyne Techniques, Rev. Sci. Instrum. 77, 083108 (2006).
- 23. Д. Г. Гордеев, Н. Н. Жильникова, Д. Н. Кидямкина и др., Библиотека программ «УРС-ОФ» расчета свойств веществ, адаптированная для вычислительных систем с возможностью параллельных и векторизованных вычислений, ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов № 1, 27 (2022).
- **24**. В. П. Копышев, В. В. Хрусталев, Уравнение состояния водорода до 10 Мбар, ПМТФ **21**, 122 (1980).
- 25. В.П. Копышев, Термодинамическая модель плотной жидкости, ПМТФ 12, 119 (1971).
- 26. В. П. Копышев, В. Д. Урлин, Изэнтропическая сжимаемость и уравнение состояние водорода до давления 1 ТПа, в сб. Ударные волны и экстремальные состояния вещества под ред. В. Е. Фортова, Л. В. Альтшулера, Р. Ф. Трунина, А. И. Фунтикова, Наука, Москва (2000), с. 297.
- 27. Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов, С. И. Киршанов и др. Экспериментальные исследования свойств ударно-сжатого карбогала. Уравнения состояния карбогала и оргстекла, ФГВ 40 (3), 104 (2004).
- 28. R. v. Mises, Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand, in Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Math.-Phys. Kl., Vol. 1913 (1913), S. 582 [P. Мизес. Механика твердых тел в пластическидеформированном состоянии, в сб. Теория пластичности под ред. Ю. Н. Работнова, Госиноиздат, Москва (1948), с. 57.]
- **29.** J. S. Rinehart, Some Quantitative Data Bearing on the Scabbing of Metals under Explosive Attack, J.

Аррl. Phys. 22, 555 (1951) [Дж. Райнхарт, Некоторые количественные данные об отколе металла, подвергнутого взрывному нагружению, в сб. Механика, вып. 3 (19), Госиноиздат, Москва (1953), с. 96.]

- 30. С. М. Бахрах, С. В. Михайлов, А. О. Наумов и др., Реализация в комплексе ЛЭГАК разностной схемы расчета упругопластичности с определением ускорений на сторонах счетных ячеек и использование ее для расчета разрушения материалов, ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов № 3, 72 (2001).
- 31. М. А. Аношин, Л. Я. Габзетдинова, Е. А. Козлов и др., Численное моделирование процессов разрушения в экспериментах с обжимаемыми оболочками, Деформация и разрушение материалов 7 (3), 23 (2011).
- 32. А. Г. Иванов, Г. Я. Карпенко, О разгоне тонких пластин продуктами взрыва при различных способах инициирования ВВ, ФГВ 16, 84 (1980); errata, ФГВ 17, 156 (1981).
- 33. Н. А. Володина, С. А. Краюхин, Алгоритм итерационной коррекции времен детонации за счет учета направления движения детонационной волны в методике ЛЭГАК, ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов № 3, 35 (2019).
- 34. В. А. Аринин, Функциональный метод трассировки границ раздела двух сред, имеющих цилиндрическую геометрию, Цифровая обработка сигналов № 2, 52 (2006).
- **35.** V. A. Arinin and B. I. Tkachenko, Achieving the Ultimate Quality of Image Registration in Radiography, Pattern Recogn. Image Anal. **19**, 63 (2009).