

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЙ СЖИМАЕМОСТИ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ 1500–5000 ГПа

М. А. Мочалов^{a,}, Р. И. Илькаев^a, В. Е. Фортков^b, А. Л. Михайлов^a, В. А. Раевский^a,
В. А. Огородников^a, А. А. Юхимчук^a, А. И. Давыдов^a, Н. Н. Анашкин^a, В. А. Аринин^a,
А. О. Бликов^a, А. Ю. Баурин^a, Н. Б. Давыдов^a, В. А. Комраков^a, А. И. Логвинов^a,
С. Ф. Маначкин^a, А. В. Рыжков^a, Б. И. Ткаченко^a, А. В. Федоров^a, С. А. Финюшин^a,
Д. А. Калашников^a, Е. А. Чудаков^a, Е. А. Пронин^a, Е. А. Бакулина^a*

^aРФЯЦ-ВНИИЭФ

607188, Саров, Нижегородская обл., Россия

^bОбъединенный институт высоких температур Российской академии наук
125412, Москва, Россия

Поступила в редакцию 30 октября 2013 г.

Приведены результаты измерения квазиизэнтропической сжимаемости плазмы дейтерия и гелия в области давлений 1500–5000 ГПа и плотностей до 8 г/см³ с использованием экспериментальных устройств сферической геометрии и рентгенографического комплекса, состоящего из трех бетатронов и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений. Результаты наших исследований показывают возможности экспериментальной физики высоких плотностей энергии в воспроизведении экстремальных состояний вещества, типичных для Вселенной, в лабораторных условиях с использованием энергии традиционных конденсированных взрывчатых веществ.

DOI: 10.7868/S0044451014070189

1. ВВЕДЕНИЕ

Газообразные водород и гелий, а также их плазма, при высоких давлениях и температурах являются основным состоянием вещества в перспективных энергетических установках и в ряде астрофизических объектов [1–3]. Вот почему исследование физических свойств сильносжатых и нагретых водорода и гелия существенно расширяет наши знания о материи, структуре и эволюции звезд и планет-гигантов. В звездах, где плазма полностью ионизована и почти идеальна, ее физическое описание не встречает особых трудностей. Однако исследования Юпитера, Сатурна, коричневых карликов и т. д. требуют информации о поведении сильнонеидеальной (когда отношение энергии кулоновского взаимодействия заряженных частиц к их кинетической энергии намного больше единицы) и частично вырожденной водородной и гелиевой плазмы. Создание новых спосо-

бов генерации и диагностики состояния плазмы водорода и гелия в мегабарной области давлений дает чрезвычайно важную информацию для описания их свойств.

Квазиизэнтропическая сжимаемость газообразного водорода в области давлений до 1200 ГПа впервые исследована в устройствах сферической геометрии в конце прошлого века [4–6]. В области давлений до 500 ГПа квазиизэнтропическая сжимаемость газообразного дейтерия и гелия измерена в двухкаскадных устройствах цилиндрической геометрии с использованием энергии традиционных твердых взрывчатых веществ (ВВ) [7, 8] и магнитокумулятивных генераторов МК-1 [9, 10]. В последние три года во ВНИИЭФ проведены эксперименты, в которых измерена сжимаемость газообразных дейтерия и гелия до чрезвычайно высоких плотностей 4–8 г/см³ [11–13] с использованием двухкаскадных устройств сферической геометрии и рентгенографического комплекса, позволяющего в одном эксперименте регистрировать до девяти фаз сжатия.

*E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

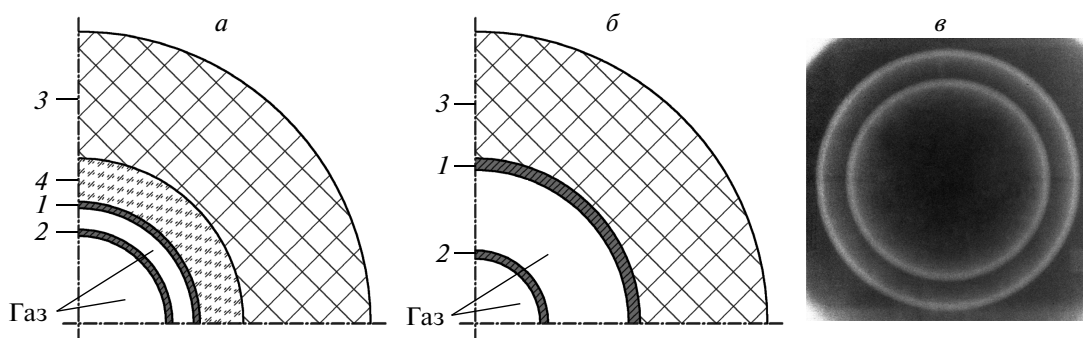


Рис. 1. Схематическая конструкция (1/4 часть) экспериментальных устройств: *a* — устройство № 1; *б* — устройства № 2 и № 3; *в* — рентгеновское изображение оболочек в устройстве № 1

В настоящей работе приведены результаты новых экспериментов, в которых измерена квазиизэнтропическая сжимаемость дейтерия и гелия в области давлений порядка 2000 ГПа. С использованием устройства, описанного в работе [13], диапазон измерения квазиизэнтропической сжимаемости газообразного дейтерия расширен до 5000 ГПа. Кроме того, применение методов современной лазерной интерферометрии [14] в специально проведенных опытах позволило детально выяснить динамику движения сферических оболочек в разработанных экспериментальных устройствах.

Плотность сжатых газов измерена рентгенографическим методом по положению границ оболочек экспериментальных сферических нагружающих устройств, а также получена, наряду со значениями давлений и температур, из газодинамических расчетов. Для регистрации положения границ оболочки, сжимающей исследуемое вещество, в устройствах использован рентгенографический комплекс РФЯЦ-ВНИИЭФ, состоящий из трех безжелезных импульсных бетатронов [15].

Проведен анализ полученных результатов с использованием одномерных и двумерных газодинамических расчетов. Сделан вывод о степени применимости использованных уравнений состояния дейтерия и гелия для описания их сжимаемости в области давлений 1500–5000 ГПа.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах по измерению квазиизэнтропической сжимаемости газообразных дейтерия и гелия авторы использовали экспериментальные сферические устройства, схематически приведенные на рис. 1.

Устройство № 1 (рис. 1*a*) использовали ранее при исследовании сжимаемости дейтерия и гелия в области давлений $P \approx 2000$ ГПа [12]. Внешняя прочная оболочка 1 устройства рассчитана на начальное давление газа до 30 МПа. Сжатие газа во внутренней полости оболочки 2 в такой конструкции происходит через слой того же газа, и эта полость защищена от прямого воздействия ВВ 3 на материал оболочки, что практически исключает выброс частиц металла в полость, где измеряется средняя плотность сжатой плазмы [16]. Промежуток между ВВ и оболочкой 1 заполнен прокладкой из плексигласа 4, которая к тому же сглаживает возмущения от системы инициирования ВВ. Рентгеновское изображение экспериментального устройства № 1 в исходном состоянии приведено на рис. 1*в*.

В устройстве № 2 (рис. 1*б*) плексигласовая прокладка исключена. Это позволило увеличить диаметр внешней оболочки устройства, повысить уровень отбора энергии от ВВ оболочкой первого каскада и достичь давления $P \approx 5000$ ГПа в сжатой плазме гелия [13] и дейтерия (в настоящей работе).

В новых экспериментах с дейтерием и гелием в области давлений $P \approx 2000$ ГПа в настоящей работе использовано устройство № 3 (рис. 1*б*), отличающееся от устройства № 2 большим диаметром оболочки 2 второго каскада и ее материалом (титан ВТ-14).

Характеристики экспериментальных устройств, использованных в работах [12, 13] и в настоящей работе, приведены в табл. 1. В нее включены также параметры однокаскадного сферического экспериментального устройства (№ 4) из работы [11]. Для разгона оболочек и сжатия газа во всех экспериментах использован блок ВВ массой около 55 кг в тротиловом эквиваленте.

Таблица 1. Характеристики экспериментальных устройств из работ [11–13] и настоящей работы

№ устройств	Газ	Материал оболочек*		Диаметр оболочек/ /толщина, мм		Начальные параметры газа		Прокладка
		Каскад I	Каскад II	Каскад I	Каскад II	P_0 , атм	T_0 , °C	
1 [12]	D ₂	ЭИ712	ЭИ712	150/4	116/4	128	19.1	Плексиглас
1 [12]	He	ЭИ712	ЭИ712	150/4	116/4	167	27.2	Плексиглас
2 [13]	He	30ХГСА	30ХГСА	203.2/7	90/5	270	29.4	Нет
2	D ₂	30ХГСА	30ХГСА	203.2/7	90/5	264	29.0	Нет
3	D ₂	ЭИ659	ВТ-14	202/8	109/6	250	4.0	Нет
3	He	ЭИ659	ВТ-14	202/8	109/6	250	–5.0	Нет
4 [11]	D ₂	ЭИ659	Нет	113/5.5	Нет	267	10.5	Полиэтилен

Примечание. *В устройствах №№ 1, 2, 4, а также в первом каскаде устройства № 3 оболочки изготовлены из инструментальных сталей; оболочка второго каскада в устройстве № 3 изготовлена из титана.

Для заполнения экспериментальных камер дейтерием использована система напуска, основу которой составлял термодесорбционный источник [17]. Изотопная чистота газообразного дейтерия в эксперименте, измеренная с помощью хроматографической установки «Цвет-800», составила примерно 98.9 % (остальное — протий). Для заполнения камеры гелием применен термокомпрессор, позволяющий заполнять газом чистотой 99.99 % объемы около 2 л до давлений 50 МПа (500 атм).

Первоначально исследуемый газ в таких устройствах сжимается проходящей ударной волной (УВ). При ее многократных отражениях от центра симметрии устройства и сходящейся (обжимающей) оболочки во внутренней полости с газом формируется серия УВ, которые сжимают и нагревают его. Движение оболочки к центру происходит до тех пор, пока возрастающее давление внутри исследуемой плазмы ее не остановит. В этот момент достигается максимальное сжатие при существенном снижении доли теплового давления и более длительном удержании вещества при высоком давлении по сравнению с воздействием однократной УВ. При таком способе нагружения реализуются состояния вещества на изэнтропах, положение которых зависит от массы ВВ и геометрии экспериментальных устройств, т. е. от параметров, которые можно менять в широком диапазоне.

Схема эксперимента на рентгенографическом комплексе РФЯЦ-ВНИИЭФ, использованная в экспериментах [11–13] и в настоящей работе, приведе-

на на рис. 2. Теневое изображение границ внутренней оболочки, сжимающей исследуемый газ, получено при одновременном использовании тормозного излучения трех мощных бетатронов 1 с граничной энергией электронов 60 МэВ [15], расположенных под углами 45° друг к другу в защитном бетонном сооружении 2. Особенностью рентгенографического комплекса является возможность каждого излучателя работать в трехимпульсном режиме, что позволяет за один эксперимент регистрировать до девяти фаз движения оболочки и таким образом проследить за всей динамикой процесса сферического сжатия плазмы. Это улучшает воспроизводимость опытов по сравнению с использованием однокадровой системы регистрации [4–6]. При исследовании движения оболочки для каждого бетатрона используется индивидуальная оптико-электронная система детектирования, имеющая квантовую эффективность около 40 % и динамический диапазон регистрации до 10^3 , которая активируется синхронно с импульсами бетатрона, что и позволяет получать три независимых рентгеновских изображения. В качестве гамма-конверторов в данной системе используются монокристаллы йодистого натрия, активированного таллием, NaI(Tl), диаметром 150 мм ($\lambda_{max} = 410$ нм, время высвечивания 250 нс) и силикат лютеция LSO диаметром 80 мм ($\lambda_{max} = 420$ нм, время высвечивания 50 нс) [15].

Для устранения влияния рассеянного излучения на высокочувствительные регистраторы 3 размер поля регистрации в каждой из трех проекций огра-

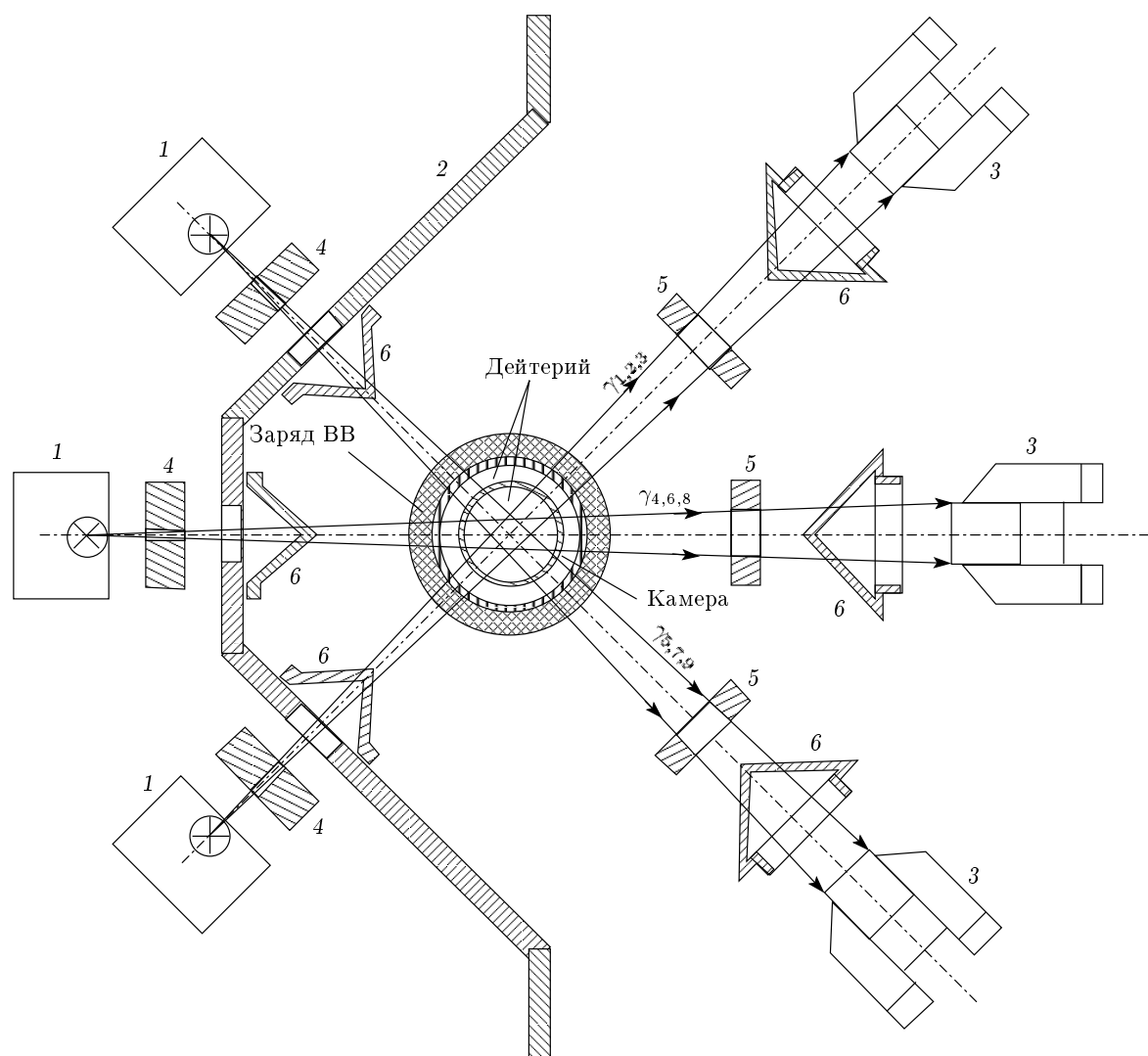


Рис. 2. Схема эксперимента на рентгенографическом комплексе ВНИИЭФ

ничивается свинцовыми коллиматорами 4 и 5. Для защиты бетатронов 1 и оптико-электронных регистраторов рентгеновского излучения 3 применены алюминиевые конусы 6.

Возможности использованного рентгеновского комплекса и двухкаскадного экспериментального устройства для регистрации сжимаемости гелия до плотности 8 г/см^3 были ранее показаны в эксперименте [13].

3. ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ОТРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Детальное изучение $R(t)$ -диаграмм движения оболочек экспериментальных устройств на началь-

ном участке траектории, когда влиянием газа можно пренебречь, является важным обстоятельством для уточнения и тестирования численных расчетов, использованных для описания разработанных авторами экспериментальных устройств и правильного выбора размеров свинцовых коллиматоров, ограничивающих поле регистрации по объекту до 100 мм.

С этой целью в настоящей работе проведено дополнительное тестирование движения детонационной и ударной волн по элементам экспериментальных устройств № 1 и № 2, использованных ранее при исследовании квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия в работах [11–13]. Кроме того, одновременно были изучены динамика разгона и симметрия полета стальной оболочки первого кас-

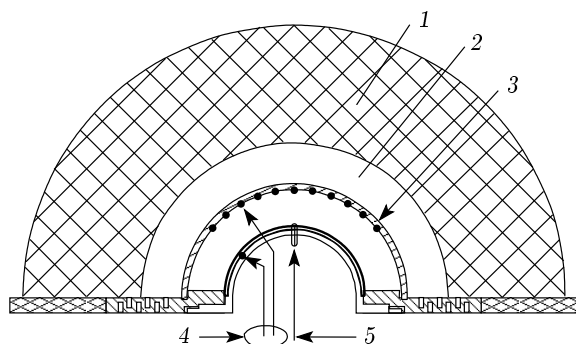


Рис. 3. Схема эксперимента по регистрации динамики движения стальной оболочки первого каскада экспериментального устройства №1: 1 — ВВ; 2 — плексиглас; 3 — оболочка; 4 — электроконтактные датчики; 5 — PDV-датчик

када экспериментальных устройств, а также определено ее состояние (наличие откола и последующего компактирования). Данная информация позволила уточнить характер диссипативных процессов при работе используемых экспериментальных устройств (в частности, роль вязкости и динамической прочности на сжатие и растяжение) и методику расчета процесса сжатия.

Схема эксперимента при тестировании устройства №1 приведена на рис. 3. Для регистрации параметров движения ударной и детонационной волн использована электроконтактная методика (более 200 датчиков). Динамика движения внешней сферической оболочки регистрировалась рентгенографической и гетеродин-интерферометрической (PDV [14]) методиками. Физический принцип работы гетеродин-интерферометра основан на эффекте доплеровского изменения длины волны зондирующего лазерного излучения, отраженного от исследуемой поверхности. Регистрация изменения длины волны отраженного излучения осуществляется с помощью широкополосных фотодетекторов и осциллографов.

На рис. 4 приведена рентгенограмма оболочки первого каскада на момент времени $t = 16.3$ мкс, а на рис. 5 — диаграмма скорости оболочки, зарегистрированная методикой PDV. Здесь и далее время отсчитывается от начала инициирования ВВ.

Анализ результатов эксперимента показал, что разновременность выхода УВ на внутреннюю границу и подлета оболочки к экрану является незначительной ($\Delta t_{max} \approx 0.07$ мкс) и находится на пределе разрешающей способности электроконтактной методики. По результатам доплеровской и рентгенографической методик регистрации (см. рис. 4, 5)

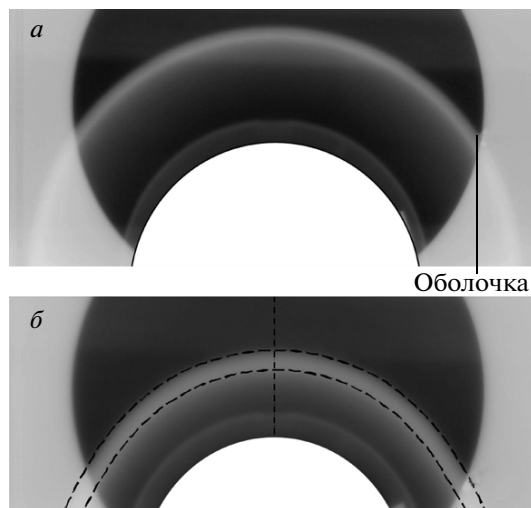


Рис. 4. Рентгенограмма полета исследуемой оболочки: а — исходное состояние; б — на момент времени $t = 16.3$ мкс (штриховые линии — границы оболочки)

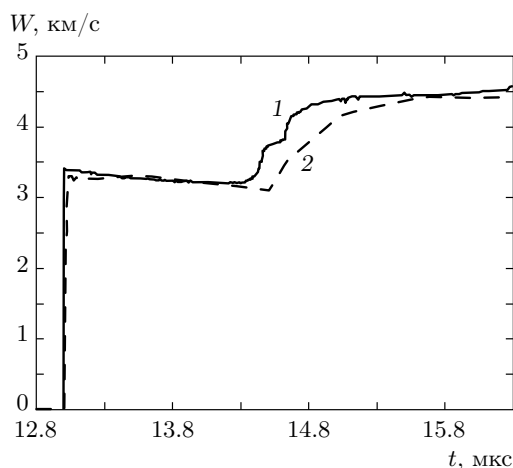


Рис. 5. Диаграмма скорости движения внутренней границы внешней оболочки в экспериментальном устройстве №1: кривая 1 — эксперимент; 2 — расчет

оболочка не имеет заметных возмущений и откольного разрушения. Как видно из рис. 5, результаты расчетов, выполненных по одномерной газодинамической программе [18], удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами, полученными с использованием методики PDV [14].

Результаты газодинамического тестирования экспериментального устройства №1 приведены на рис. 6 вместе с рассчитанными $R(t)$ -диаграммами

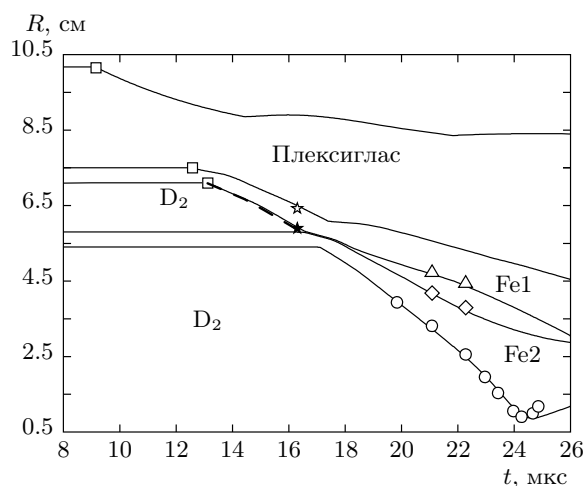


Рис. 6. $R(t)$ -диаграммы движения оболочек экспериментального устройства: $\square$ — электроконтактные измерения движения УВ; штриховая линия — траектория движения внутренней границы внешней оболочки (Fe1) по данным лазерной PDV-методики; результаты рентгенографирования [12]: $\triangle$ — внутренняя граница оболочки первого каскада (Fe1); $\diamond$ — внешняя граница оболочки второго каскада (Fe2); $\circ$ — внутренняя граница оболочки второго каскада (Fe2); $\star$ и $\times$ — соответственно наружная и внутренняя границы оболочки первого каскада (настоящая работа)

и данными рентгенографирования из работы [12]. Как видно из рис. 6, проведенные исследования подтвердили правильность методики расчета экспериментальных устройств, использованной при обработке данных из работы [12].

В аналогичной редакции опыта исследования движение оболочки первого каскада и для устройства № 2. Результаты регистрации движения внешней оболочки экспериментального устройства PDV-датчиком и одномерного газодинамического расчета показаны на рис. 7. Как видно из рисунка, расчет по программе [18] качественно и количественно согласуется с экспериментальной зависимостью, полученной с использованием методики PDV [14]. Из зарегистрированных профилей $W(t)$ следует, что при выходе на границу свободной поверхности оболочки реализуется откольный слой металла, который в дальнейшем смыкается. Результаты эксперимента по зарегистрированному профилю скорости свободной поверхности, $W(t)$, позволили оценить величину откольной прочности использованной стали, которая составляет $\sigma_x \approx 3.6$ ГПа, что удовлетворительно согласуется с данными ра-

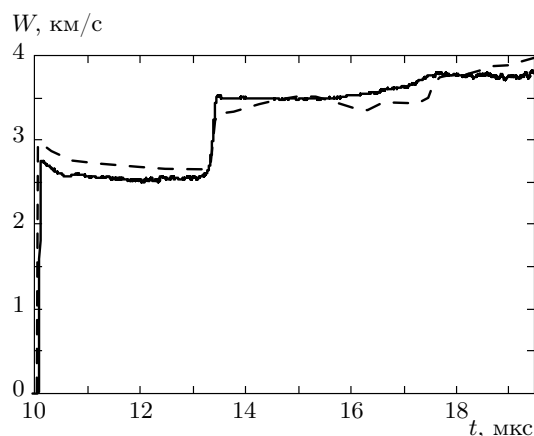


Рис. 7. Сравнение экспериментальной (сплошная линия) и теоретической (штриховая) зависимостей скорости движения оболочки внешнего каскада для экспериментального устройства № 2

боты [19] и подтверждает корректность выбранной методики учета процесса откольного разрушения в настоящей работе.

Результаты газодинамического эксперимента и их сравнение с результатами расчета приведены ниже.

4. КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ГАЗООБРАЗНОГО ДЕЙТЕРИЯ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ $P \approx 5000$ ГПа

Описанное выше экспериментальное устройство № 2 было использовано в двух опытах по измерению сжимаемости газообразного дейтерия при $P \approx 5000$ ГПа. Цель проведения двух опытов связана с необходимостью прецизионного определения момента максимального сжатия дейтерия (радиуса «остановки» оболочки). В каждом эксперименте для контроля начального состояния дейтерия (давление и температура) использовали тензометрический датчик давления и хромель-алюмелевые термодатчики. Специально разработанная конструкция термодатчиков позволила разместить ее внутри экспериментальной камеры и, следовательно, напрямую измерить начальную температуру газообразного дейтерия.

Зависимости давления и температуры дейтерия в экспериментальной камере от времени напуска газа приведены на рис. 8. Как видно из рисунка, начальное давление газа в момент подрыва заряда ВВ составило $P_0 = 26.4$ МПа и $P_0 = 28.3$ МПа

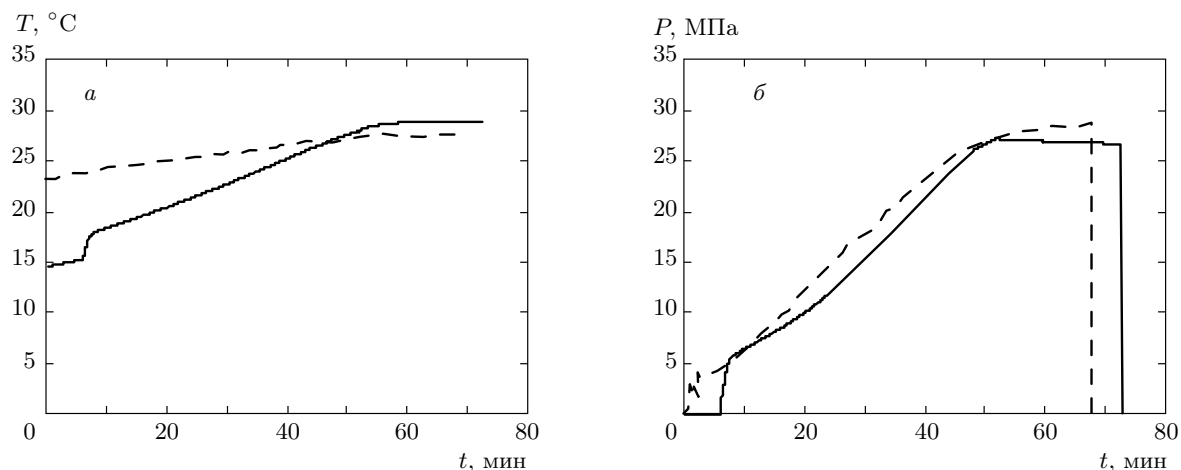


Рис. 8. Начальные параметры газообразного дейтерия в экспериментах с устройством № 2: *a* — температура газа в камере; *б* — давление в камере. Сплошные линии — опыт № 1, $T_0 = 28.9^{\circ}\text{C}$, $P_0 = 26.4$ МПа; штриховые — опыт № 2, $T_0 = 27.8^{\circ}\text{C}$, $P_0 = 28.3$ МПа

Таблица 2. Результаты обработки рентгенограмм при измерении квазиизэнтропической сжимаемости газообразного дейтерия в опытах № 1 и № 2

Опыт № 1									
№ кадра	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t , мкс	25.86	26.96	27.34	27.73	28.10	28.32	28.67	28.86	29.20
R , мм	31.01	22.38	18.80	15.68	11.73	9.37	7.61	8.00	9.48
δR , мм	0.10	0.16	0.14	0.20	0.20	0.27	0.63	0.61	1.51
Опыт № 2									
№ кадра	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t , мкс	26.95	27.70	27.81	28.40	28.51	29.11	—	—	—
R , мм	23.42	16.39	15.07	8.08	7.71	10.55	—	—	—
δR , мм	0.56	0.44	0.20	0.46	0.28	1.15	—	—	—

соответственно при температурах $T_0 = 28.9^{\circ}\text{C}$ и $T_0 = 27.8^{\circ}\text{C}$.

Во всех выполненных экспериментах начальную плотность газообразного дейтерия поддерживали практически постоянной $\rho_0 \approx 0.04$ г/см³ путем корректировки начального давления при измеренной начальной температуре газа. Начальную плотность дейтерия оценивали с учетом данных работы [20]. Абсолютная погрешность измерения начального давления датчиком с классом точности 0.6 по эталонному манометру ВИКА составляет 0.5 атм. При начальном давлении газа $P_0 \approx 25$ МПа (250 атм) относительная погрешность измерения давления

около 0.2 %. Абсолютная погрешность измерения начальной температуры для хромель-алюмелевой термопары по эталонной температурной системе «Julabo 90» в диапазоне температур $-30 \dots +30^{\circ}\text{C}$ равна 0.3 К. При начальной температуре $T_0 = 300$ К относительная погрешность измерения температуры около 0.1 %. С учетом приведенных выше оценок в опытах № 1 и № 2 плотность газообразного дейтерия в исходном состоянии составила соответственно $\rho_0 = 0.036$ г/см³ и $\rho_0 = 0.038$ г/см³.

Рентгенограммы полостей оболочки со сжатым газом в различные моменты времени для опытов № 1 и № 2 показаны на рис. 9 и 10. В двух прове-

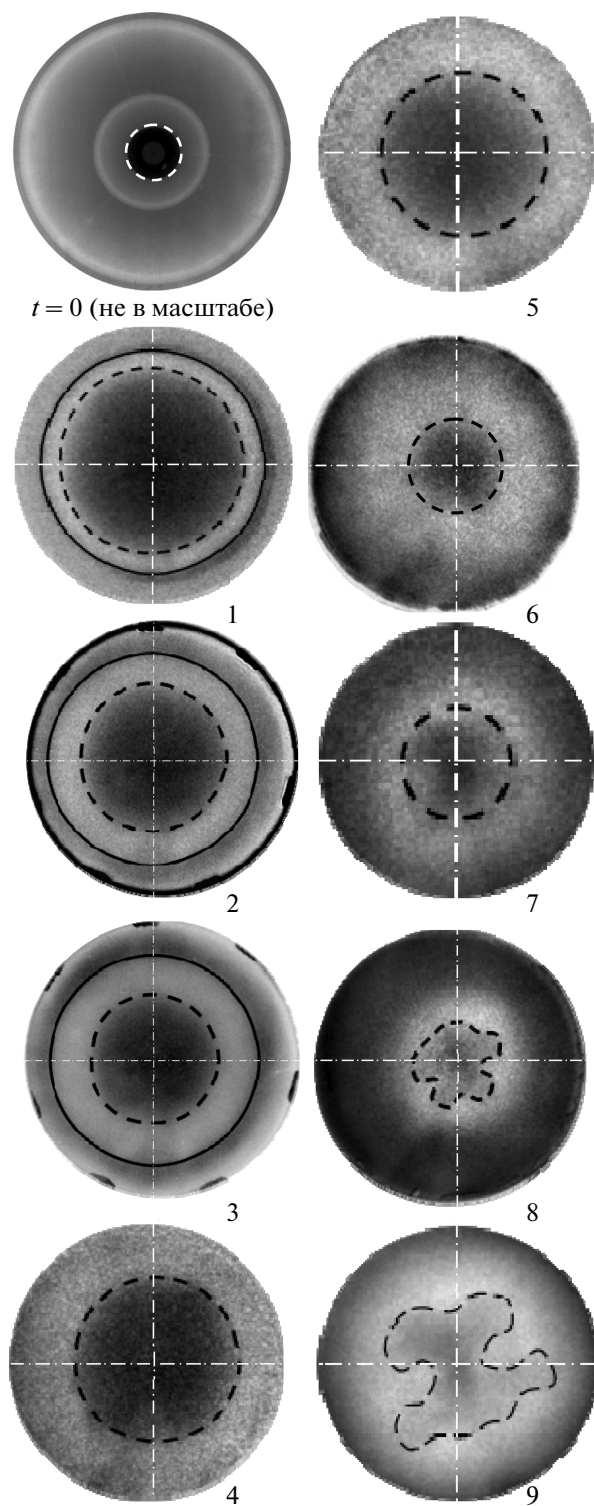


Рис. 9. Рентгенограммы сферической камеры со сжатым дейтерием в опыте № 1. На предварительном снимке ($t = 0$) показана область регистрации изображений оболочки при $t > 0$ (белые штрихи); штрихпунктир — оси симметрии газовой полости; черные штрихи и сплошные линии — эквивалентные радиусы соответственно газовой полости и внешней границы внутренней оболочки

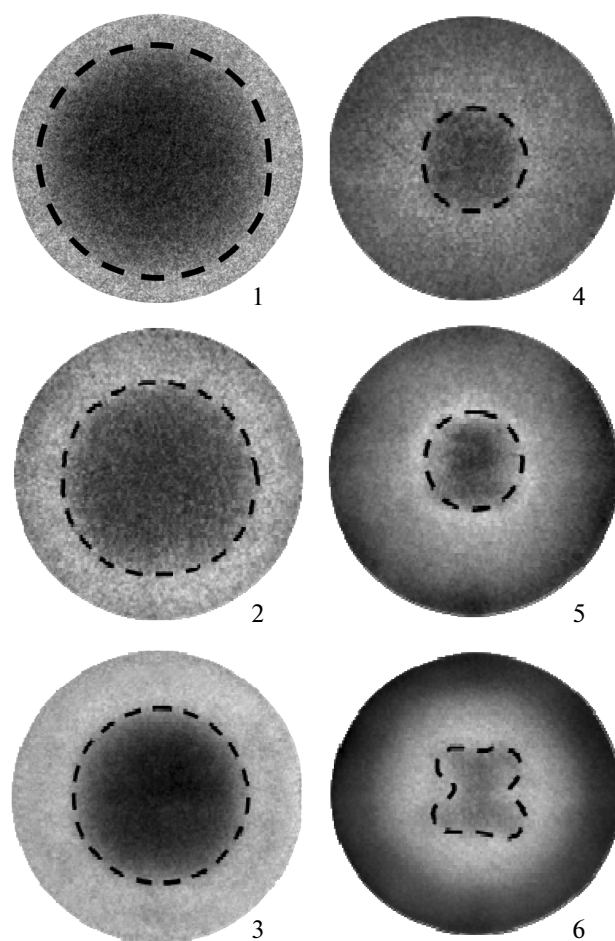


Рис. 10. То же, что на рис. 9, для опыта № 2

денных опытах получено 15 рентгенограмм, детально воспроизводящих процесс сжатия плазмы дейтерия в использованном сферическом экспериментальном устройстве, что позволило надежно зафиксировать момент ее максимального сжатия. Все полученные рентгенограммы обработаны методом, изложенным в работе [21]. Сущность метода — экстраполяция функций плотности почернения материала регистратора, лежащего слева и справа от границы, с целью нахождения точки их пересечения, которая и принимается за точку границы. При обработке были определены и исключены из анализа участки артефактов, имеющие anomalно высокий контраст (дефекты, точки, царапины). По рентгенограммам объекта определяли его радиус в плоскости регистрации (на сцинтилляторе). Угол интегрирования при трассировке составил 30° , т. е. асимметрию δR газовой полости вычисляли по двенадцати независимым измерениям. Результаты обработки приведены

в табл. 2, из которой видно, что минимальный радиус сжатой полости с дейтерием $R_{min} = 7.610$ мм зарегистрирован в опыте № 1 (кадр 7); это соответствует степени сжатия плазмы $\sigma = \rho/\rho_0 = 145$. Кадры 8 и 9 в опыте № 1, а также кадр 6 в опыте № 2 соответствуют фазе разлета оболочки после достижения максимального сжатия. Как видно из рентгенограмм, полость оболочки в этом случае сильно искажена, что связано с возникновением гравитационной неустойчивости Рэлея–Тэйлора на границе раздела оболочки и сжимаемой среды [22, 23].

Относительная погрешность трассировки (определения) радиуса газовой полости изложенным методом [21] определена авторами на основании экспериментов со статическими макетами и составляет около 4 % для объектов радиусом примерно 10 мм. С учетом погрешностей трассировки газовой полости измерения начальной плотности газа и абсолютной погрешности (0.02 мм) измерения начального диаметра (90 мм) газовой полости относительная погрешность измерения плотности квазиизэнтропически сжатой плазмы дейтерия в настоящей работе оценивается величиной $\Delta\rho/\rho \approx \pm 13\%$.

$R(t)$ -диаграмма процесса сжатия газообразного дейтерия, полученная по результатам обработки экспериментальных рентгенограмм (см. рис. 9, 10), приведена на рис. 11. Там же нанесены рассчитанные $R(t)$ -траектории, учитывающие результаты газодинамической отработки использованного экспериментального устройства № 2. Как видно из рис. 11, данные, полученные в результате проведенного газодинамического исследования динамики движения оболочки первого каскада, позволили откалибровать методику расчета экспериментального устройства, использованного для измерения в настоящей работе сжимаемостей дейтерия и гелия при давлении $P \approx 5000$ ГПа [13].

5. КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ГАЗООБРАЗНЫХ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ $P \approx 2000$ ГПа. НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для подтверждения полученных ранее [12] результатов в настоящей работе проведены дополнительные эксперименты по измерению сжимаемости плазмы дейтерия и гелия при $P \approx 2000$ ГПа с использованием устройства № 3 (см. табл. 1).

В результате экспериментов с новым устройством получены рентгенографические данные по сжатию плазмы, приведенные в табл. 3 и на рис. 12,

13 для дейтерия и гелия соответственно вместе с рассчитанными $R(t)$ -траекториями. На обоих рисунках также приведены результаты электроконтактных измерений начала движения наружной границы оболочки первого каскада.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании экспериментальных данных по динамике движения оболочек давление в сжатой плазме дейтерия и гелия определяли из газодинамического расчета с учетом реальных термодинамических и прочностных свойств элементов, составляющих экспериментальное устройство. Расчеты выполняли по одномерной газодинамической программе [18], предназначенной для численного решения нестационарных газодинамических задач различной геометрии с учетом теплопроводности и упруго-пластических свойств среды, из которых получены $R(t)$ -диаграммы движения границ сферического устройства и распределения давления, плотности, температуры и массы счетных ячеек по радиусу газовой полости на момент максимального сжатия. Продукты взрыва ВВ на основе октогена описывали уравнением состояния из работы [24]. Движение оболочек из титана описано без учета сдвиговой и откольной прочности с использованием уравнения состояния в форме Ми–Грюнайзена с параметрами из работы [25].

При выборе уравнения состояния железа анализировались экспериментальные данные работ [25–28] и их описание различными моделями из работ [29–33] (рис. 14). В расчетах РФЯЦ-ВНИИЭФ широко используется однофазное уравнение состояния железа [29], которое хорошо описывает ударную адиабату, но сглаживает фазовый переход α – ϵ первого рода при $P \approx 13$ ГПа. Уравнения состояния железа из библиотеки SESAME [30] и работы [31], учитывающие фазовый переход, показаны на том же рисунке. Анализ результатов по измерению сжимаемости железа из работ [25–28] показывает, что описание экспериментальных данных по уравнению состояния из [29] выше фазового перехода и до давлений $P \approx 300$ ГПа практически не отличается от описания по уравнению состояния из [30]. Однако, как видно из рис. 14, наилучшее описание совокупности экспериментальных данных в области давлений до $P \approx 6000$ ГПа, имеет уравнение состояния железа из [29], уточненное в области высоких давлений по модели из [32]. Данная модель уравнения состояния железа и была использована

Таблица 3. Результаты трассировки газовой полости в новых экспериментах с дейтерием и гелием

D ₂	t , мкс	25.3	26.3	27.3	27.75	28.15	28.95	—	—	—
	R , мм	32.12	24.68	14.93	10.47	9.77	11.86	—	—	—
	δR , мм	0.34	0.39	0.38	0.36	0.53	0.43	—	—	—
He	t , мкс	25.29	26.28	27.05	27.32	27.54	27.54	27.76	28.00	28.77
	R , мм	31.56	23.67	15.75	13.63	11.65	11.75	11.09	10.34	13.10
	δR , мм	0.41	0.36	0.20	0.41	0.26	0.38	0.39	0.38	0.87

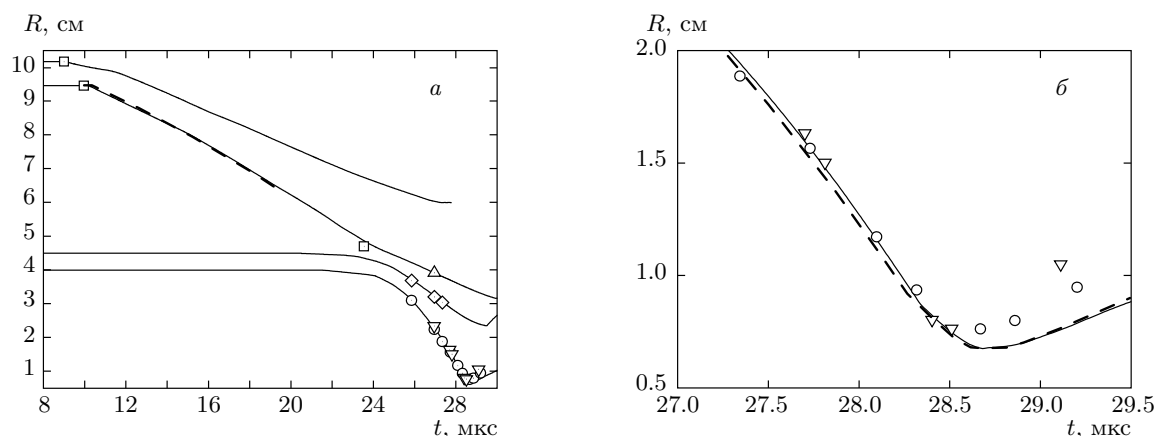


Рис. 11. а) $R(t)$ -диаграммы движения оболочек экспериментального устройства № 2: сплошные линии — рассчитанные траектории движения границ устройства; $\square$ — электроконтактные измерения движения УВ; штриховая линия — зарегистрированная методом PDV траектория движения внутренней границы внешней оболочки (Fe1); результаты рентгенографирования: $\triangle$ — внутренняя граница оболочки первого каскада (Fe1); $\diamond$ — внешняя граница оболочки второго каскада (Fe2); внутренняя граница оболочки второго каскада (Fe2): $\circ$ — опыт № 1; ∇ — опыт № 2; б) — $R(t)$ -диаграммы движения внутренней границы оболочки второго каскада (Fe2) в увеличенном масштабе, рассчитанные с уравнением состояния дейтерия в форме Копышева – Хрусталева (сплошная линия) и SESAME (штриховая)

в расчетах настоящей работы. Расчет с учетом фазового перехода в железе с уравнением состояния из [31] не привел к существенному изменению результатов. Упругопластические свойства стали для внешнего каскада не учитывали (использовали гидродинамическое приближение). Для внутренней оболочки влияние упругопластических свойств учитывали по модели динамического деформирования [34] со специально подобранными для стали коэффициентами. Разрушение стали для обеих оболочек описывали моделью хрупкого откола с параметром $\sigma_x = -4$ ГПа.

В расчетах для дейтерия использовали уравнение состояния из [35], калиброванное по экспериментальным данным [4–6], а также уравнение состояния из библиотеки [36]. Окончательный подбор параметров расчетной схемы проводили по результатам тестирования движения УВ по элементам экспери-

ментальных устройств и рентгенограммам начальной фазы процесса схождения сферической оболочки, когда влиянием исследуемого газа можно пренебречь. Для уточнения полученных результатов с целью учета двумерных факторов используемых сферических устройств проведены расчеты сжатия в программном комплексе ЛЭГАК-3D [37].

6.1. Дейтерий

$R(t)$ -диаграмма процесса сжатия газообразного дейтерия, полученная по результатам обработки экспериментальных рентгенограмм (см. рис. 9, 10), приведена на рис. 11 вместе с результатами газодинамической отработки использованного экспериментального устройства. Начальное состояние газа в обоих опытах с устройством № 2 оказалось практически идентичным, поэтому результаты проведенных экс-

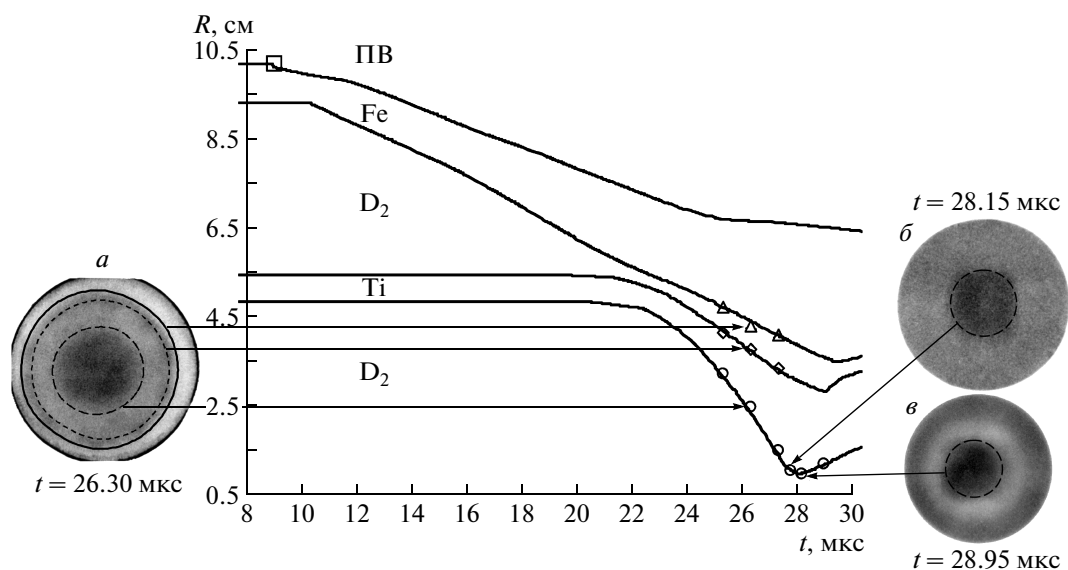


Рис. 12. $R(t)$ -диаграммы движения оболочек экспериментального устройства № 3 в опыте с дейтерием (ПВ — продукты взрыва). Времена отсчитываются от начала детонации заряда ВВ: $\square$ — электроконтактные измерения движения УВ; результаты рентгенографирования: $\triangle$ — внутренняя граница оболочки первого каскада (Fe); $\diamond$ и $\circ$ — соответственно внешняя и внутренняя границы оболочки второго каскада (Ti). Изображение v — момент максимального сжатия. Штрихами показаны границы оболочек, полученные в результате обработки рентгенограмм

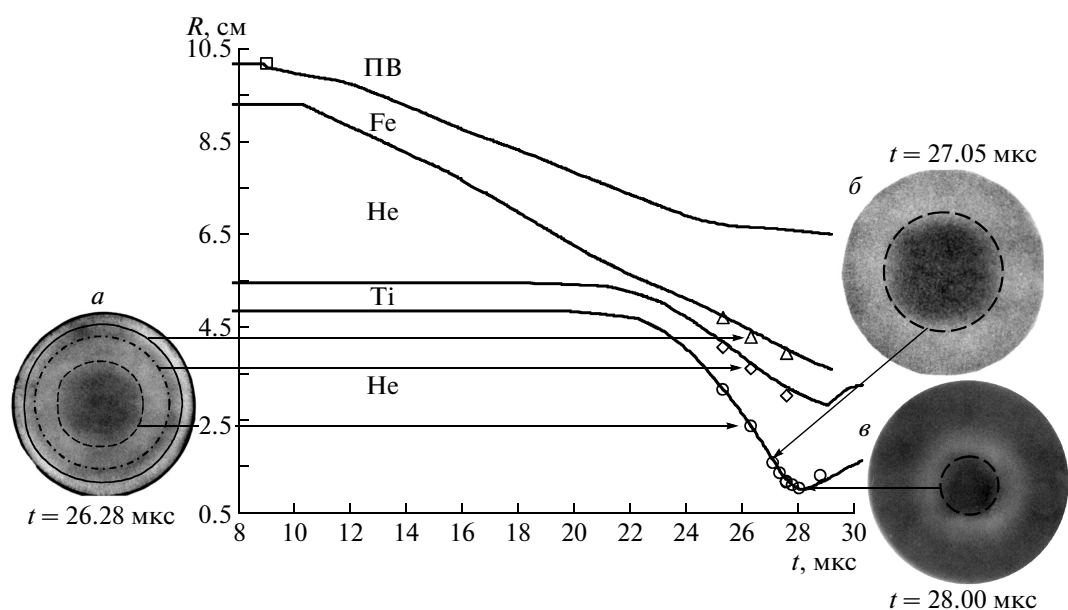


Рис. 13. То же, что на рис. 12, для гелия

периментов описаны одним газодинамическим расчетом.

В нашем подходе основным критерием истинности получаемого в расчете давления газа можно считать удовлетворительное описание всей $R(t)$ -тра-

ектории сжатия полости, причем расчетная модель должна описывать сжатие плазмы не только в области давлений, реализующихся во внутреннем каскаде оболочки (до 5000 ГПа), но и динамику сжатия во внешнем каскаде при более низких давлениях.

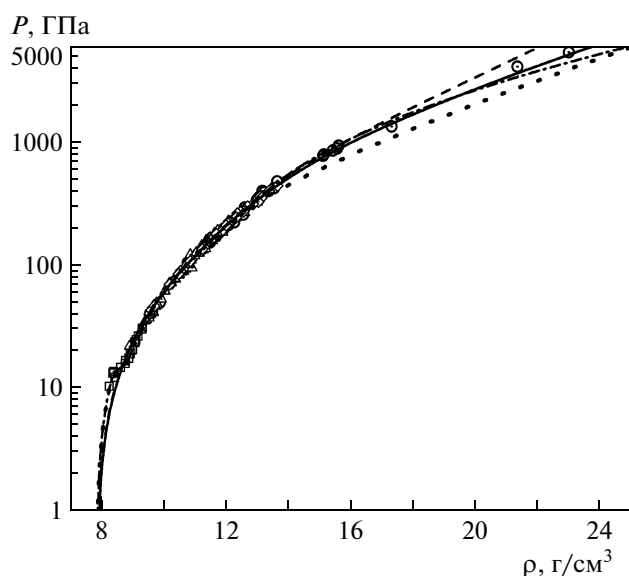


Рис. 14. Сравнение экспериментальных данных для стали с расчетами по различным уравнениям состояния. Эксперимент: $\diamond$ — [25]; $\square$ — [26]; $\triangle$ — [27]; $\circ$ — [28]. Расчет: штриховая кривая — [29]; пунктирная — [30]; штрихпунктирная — [31]; сплошная — [32]

Как видно из рис. 11а, выбранная модель расчета удовлетворяет указанным выше условиям в широком диапазоне сжатий. Однако при максимальном сжатии, как видно из рис. 11б, расчетная модель при использовании уравнения состояния дейтерия из [35], не описывает экспериментальных данных. В момент максимального сжатия это отклонение составляет 12.6 % по радиусу. Экспериментальное значение плотности сжатого дейтерия в этом эксперименте $\rho = 5.3 \pm 1.3$ г/см³ оказалось примерно на 30 % меньше вычисленного в одномерном приближении значения средневзвешенной плотности дейтерия $\rho_{mean} = 7.8$ г/см³. Нет согласия результатов экспериментов и с расчетной зависимостью при использовании уравнения состояния дейтерия из [36]. С учетом этого обстоятельства на рис. 15 приведены формальные распределения давления, плотности и температуры в сжатом дейтерии по радиусу полости, полученные из газодинамического расчета использованного устройства на момент максимального сжатия.

Учитывая сложный характер рассчитанных распределений, связанный с кумулятивным характером процесса сжатия, для оценки основных термодинамических параметров сжатой плазмы авторы использовали средневзвешенные значения давления

P_{mean} , температуры T_{mean} и плотности ρ_{mean} в плазме дейтерия в момент ее максимального сжатия, полученные усреднением по массе расчетных значений $P(R)$, $T(R)$ и $\rho(R)$. Такой метод расчетного определения давления, температуры и плотности учитывает распределение сжатой плазмы в полости устройства, основная масса которой сосредоточена вблизи оболочки и уменьшается к центру, что представляется наиболее оправданным в данной работе.

Ясно, что процесс сжатия газа в используемых устройствах носит сугубо трехмерный характер, связанный с влиянием систем инициирования ВВ, качеством изготовления стальных оболочек (их разнотолщинностью и отклонением от сферичности) и их центровкой при сборке всего устройства. Все эти факторы приводят, в конечном счете, к асимметричности оболочек, особенно при больших степенях сжатия. В качестве примера на рис. 16а показана рентгенограмма сжатой полости с дейтерием, зарегистрированная в устройстве № 2 в опыте № 1 на момент максимального сжатия газа, где показан реальный профиль полости оболочки по результатам функциональной обработки рентгенограммы и ее идеализированный профиль, по которому определен эквивалентный радиус сжатой полости. Наблюдаемая на экспериментальной рентгенограмме несферичность полости по нашим оценкам составляет ± 8.3 %.

В качестве дополнительного шага для уточнения полученных данных для устройства № 2 проведены двумерные расчеты сжатия дейтерия в комплексе ЛЭГАК-3D [37]. Результат двумерного расчета, приведенный черными штрихами на рис. 16а, на момент максимального сжатия показывает практически полную качественную идентичность экспериментального и рассчитанного профилей сжатой полости с плазмой дейтерия. Анализ полученных данных показал, что учет двумерных факторов привел к увеличению средневзвешенного давления на 0.3 % и увеличению плотности на 0.7 % без существенного изменения температуры. Значение радиуса «остановки» практически не изменилось (0.67 см — одномерный расчет и 0.66 см — двумерный). По результатам расчета ЛЭГАК методом Монте-Карло проведено численное рентгенографическое моделирование устройства № 2 на момент максимального сжатия дейтерия (рис. 16б). В расчетах устройство «облучали» тормозным излучением со спектром, соответствующим бетатрону БИМ234.3000 [15]. Для получения расчетной рентгенограммы, позволяющей оценить влияние динамической нерезкости, тормозное излучение бетатрона выделялось за 100 нс с учетом экспериментально измеренной зависимости интенсивности из-

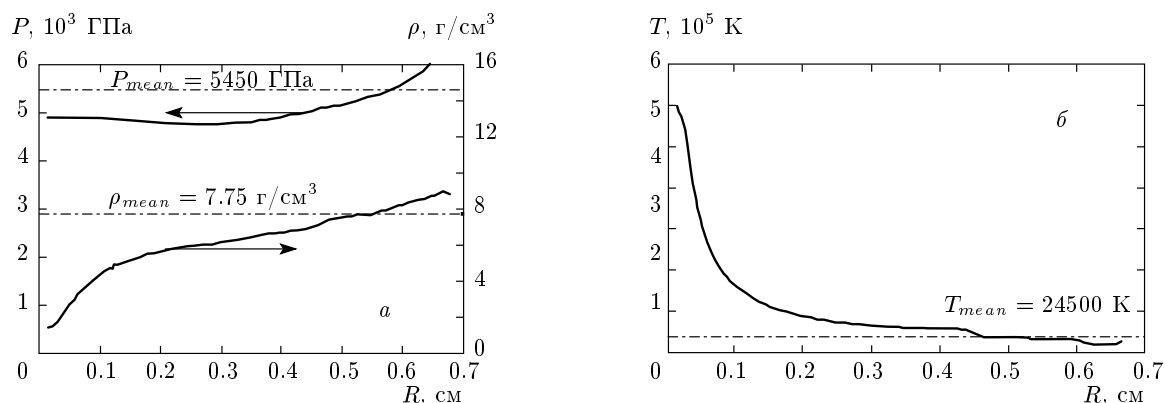


Рис. 15. Рассчитанные распределения давления, плотности (а) и температуры (б) сжатого дейтерия по радиусу полости R в устройстве № 2

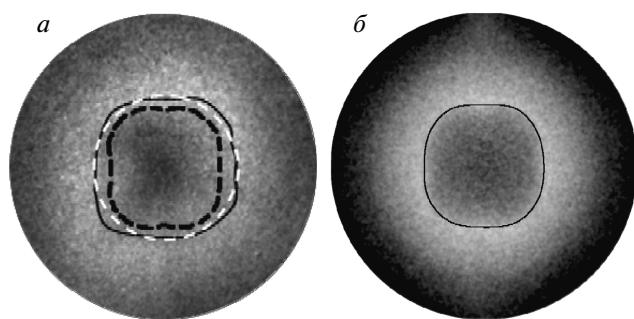


Рис. 16. Изображение полости со сжатым дейтерием для экспериментального устройства № 2 при давлении 5000 ГПа на момент «остановки»: а — оригинальная рентгенограмма (сплошная черная кривая — реальный экспериментальный профиль сжатой полости с газом; белые штрихи — эквивалентный радиус сжатой оболочки; черные штрихи — расчеты ЛЭГАК профиля сжатой полости с газом); б — расчетная рентгенограмма (сплошная кривая — результат трассировки)

лучения от времени. Значение радиуса, найденное по такой динамической рентгенограмме, согласуется с расчетным на момент максимального сжатия и составляет 0.65 см. Исходя из сказанного выше можно сделать вывод о том, что учет двумерных особенностей работы устройства № 2 также не позволяет количественно описать результаты эксперимента.

Рассчитанные распределения давления и плотности сжатого дейтерия в полости оболочки для нового экспериментального устройства № 3 приведены на рис. 17. Анализ полученных данных показал, что отличие экспериментально измеренной плотности плазмы сжатого дейтерия $\rho_{exp} = 4.5 \pm 0.7$ г/см³ от

рассчитанного среднего значения $\rho_{mean} \approx 5.0$ г/см³ составляет примерно 10 %.

Результаты экспериментальных исследований квазиизэнтропической сжимаемости плазмы дейтерия в области давлений $P \approx 5000$ ГПа из настоящей работы, вместе с ранее полученными данными из работ [11–13], приведены в табл. 4 и на рис. 18. На этом же рисунке нанесены изэнтропы, рассчитанные по уравнениям состояния дейтерия из работ [35, 38]. При расчете изэнтроп использовали следующий подход. Рассчитывали ударные адиабаты дейтерия, сжатого на основной ударной волне, в координатах P – ρ . Затем из состояний, достигнутых в экспериментах в момент максимального сжатия газа, строили изэнтропу до пересечения с соответствующей ударной адиабатой, решая обратную задачу нахождения исходного состояния на ударной адиабате. Таким образом, квазиизэнтропическое сжатие газа аппроксимировали двумя процессами: ударно-волновым и изэнтропическим.

Рассчитанные ударные адиабаты состояния дейтерия 1, 2 и 3, приведенные на рис. 18а, соответственно относятся к экспериментам из работ [11, 12] и настоящей, с различающимися конструкциями экспериментальных устройств и начальными параметрами газа (см. табл. 1). На том же рисунке нанесены изэнтропы, рассчитанные по модели из [38]. Как видно из рис. 18а, результаты из [11] и настоящей работы хорошо описываются энтропией $S/R = 16$, результат из [12] — энтропией $S/R = 18$. Отметим, что в эксперименте настоящей работы и в [12], т. е. на двух конструктивно различных сферических устройствах, но с одинаковой системой нагружения, получены практически одинаковые плотности плазмы сжатого дейтерия $\rho \approx 4$ г/см³. Все достигнутые

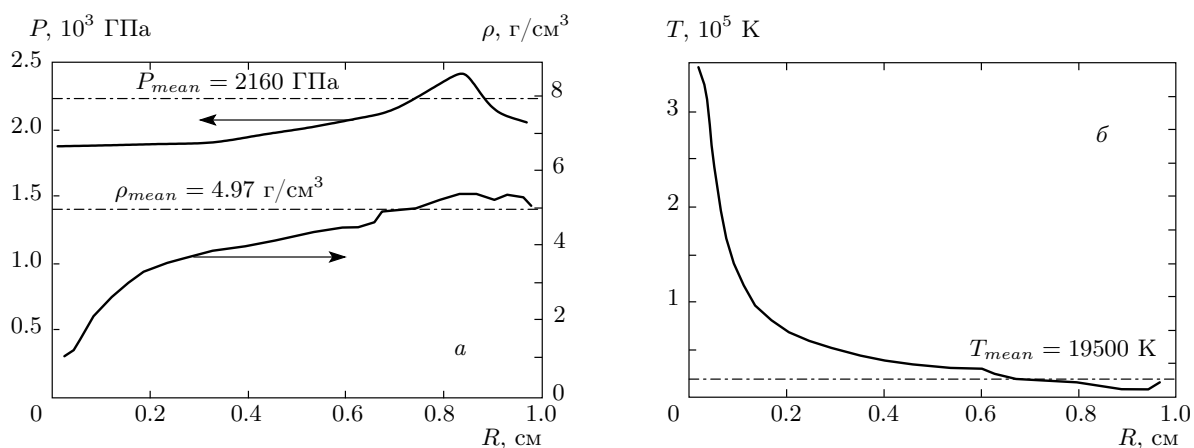


Рис. 17. То же, что на рис. 15, но для устройства № 3

Таблица 4. Результаты экспериментов по измерению сжимаемости газообразных дейтерия и гелия из настоящей работы и из работ [11–13]. Расчеты выполнены в одномерном приближении

№ устройства	Газ	ρ_0 , г/см ³	R_{min} , мм	ρ_{exp} , г/см ³	P_{calc} , ГПа	ρ_{calc} , г/см ³	T_{calc} , 10 ³ К
1 [12]	D ₂	0.020	9.1	4.3 ± 0.9	2210	4.6	22
1 [12]	He	0.025	10.0	3.8 ± 0.9	1580	3.4	74
2	D ₂	0.036	7.6	5.5 ± 0.7	5450 (5470)	7.8 (7.7)	24.5 (24.5)
2 [13]	He	0.038	6.6	8.4 ± 1.9	4750 (4760)	7.2 (7.1)	74 (74)
3	D ₂	0.037	9.8	4.5 ± 0.7	2160	5.0	19.5
3	He	0.039	10.3	4.0 ± 0.4	1950	4.5	59
4 [11]	D ₂	0.040	10.7	4.3 ± 0.7	1830	4.7	15

Примечание. В скобках приведены результаты двумерного расчета.

состояния описываются энтропией $S/R = 16$ –18, что повышает уверенность в адекватности экспериментальных данных по сжимаемости дейтерия в области давлений $P \approx 2000$ ГПа.

Однако указанные выше изэнтропы не описывают данные по сжатию дейтерия при давлении $P \approx 5000$ ГПа. Удовлетворительное согласие с экспериментом достигается в расчете только при значении энтропии $S/R = 22$. Данное обстоятельство указывает на необходимость поиска новых теоретических соображений, возможно связанных с корректировкой уравнения состояния водорода в данной области давлений или с получением новых экспериментальных данных.

6.2. Гелий

$R(t)$ -диаграммы движения оболочек экспериментального устройства № 3 в опыте с гелием приведены выше на рис. 13. В расчетах для гелия использовалось уравнение состояния в табличной форме, разработанное на основе модифицированной модели сжимаемого коволюма [35, 39], в которой учитывали результаты расчетов термодинамических свойств жидкости, выполненные методом Монте-Карло, с обратным степенным потенциалом взаимодействия между частицами, $\varphi(r) = \varepsilon(\sigma/r)^n$ [40]. Для определения начальной плотности гелия использовали табличные данные из работы [41]. Как видно из рис. 13, эксперименты с гелием в пределах экспериментальной погрешности описываются существующими

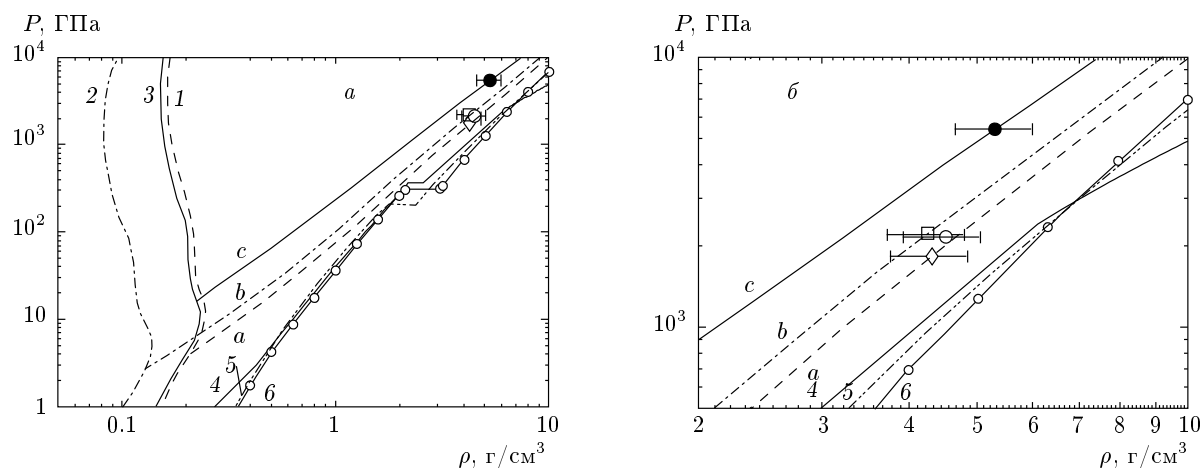


Рис. 18. Квазиизэнтропическая сжимаемость газообразного дейтерия в области давлений до 5000 ГПа. Эксперимент: $\bullet$, $\circ$ — настоящая работа; $\diamond$ — [11]; $\square$ — [12]. Ударные адиабаты дейтерия (расчет): 1 и 2 — соответственно для экспериментов [11] и [12]; 3 — настоящая работа. Изотермы (расчет): 4 — $T = 300$ К [38]; 5 — $T = 0$ К [36]; 6 — $T = 0$ К [35]. Изэнтропы (расчет по модели [38]): a — $S/R = 16$; b — $S/R = 18$; c — $S/R = 22$. б) P - ρ -диаграмма в увеличенном масштабе (S — энтропия, R — универсальная газовая постоянная)

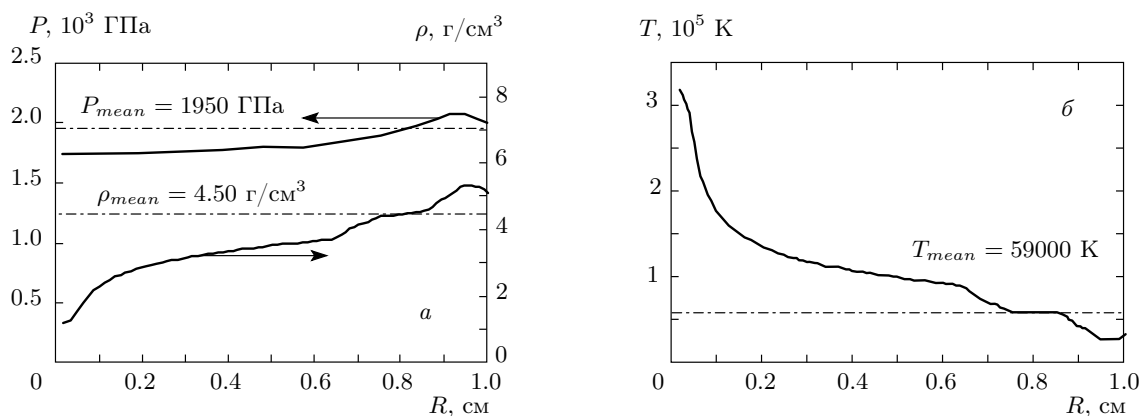


Рис. 19. Рассчитанные распределения давления, плотности (а) и температуры (б) по радиусу R сжатого гелия на момент максимального сжатия газа в устройстве № 3

ющим во ВНИИЭФ уравнением состояния Хрусталева для гелия.

Рассчитанные распределения давления, плотности и температуры в гелии на момент максимального сжатия в устройстве № 3 приведены на рис. 19. Средневзвешенное давление гелия в этом эксперименте составляет величину $P_{mean} = 1950$ ГПа, температура — $T_{mean} = 59000$ К. Экспериментально измеренная величина плотности $\rho_{mean} = 4.0 \pm \pm 0.4$ г/см³ согласуется с рассчитанным значением $\rho_{mean} = 4.5$ г/см³ в пределах 11 %. Экспериментальные результаты по квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия из работ [8, 12, 13] и настоящей приведены на рис. 20. Видно, что экспериментальные данные хорошо описываются изэнтро-

пами, рассчитанными как по уравнению состояния ВНИИЭФ, так и по модели Saha–He [33, 42]. Тактика расчета изэнтроп, приведенных на рис. 20, подробно изложена в работе [8].

Экспериментальные и рассчитанные данные по квазиизэнтропической сжимаемости гелия в области давлений выше 1500 ГПа из настоящей работы и из работ [11–13] обобщены в табл. 4.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экспериментах на устройствах сферической геометрии с использованием рентгенографического комплекса, состоящего из трех бетатронов и многоканальной оптико-электронной системы регистра-

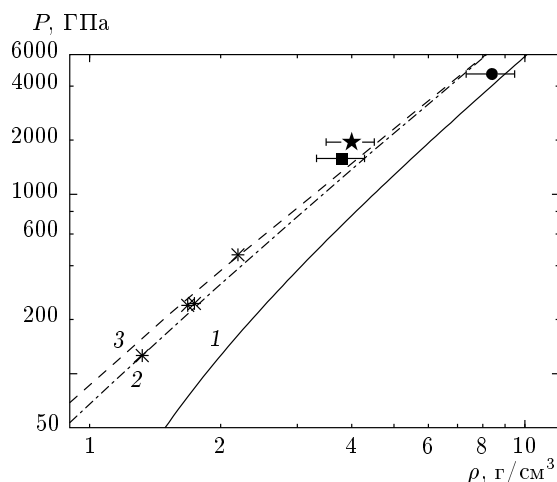


Рис. 20. Квазиизэнтропическая сжимаемость газообразного гелия в области давлений до 5000 ГПа. Эксперимент: ★ — настоящая работа; * — [8], ■ [12], ● — [13]. Расчет: 1 — изотерма $T = 0$; 2 — изэнтропа (уравнение состояния ВНИИЭФ) [8]; 3 — изэнтропа (модель Saha – He) [8, 33]

ции рентгеновских изображений существенно расширен диапазон измерений квазиизэнтропической сжимаемости газообразных дейтерия и гелия.

В конструкциях экспериментальных устройств № 2 и № 3, использованных в настоящей работе, устранено соударение оболочек в процессе сжатия и реализовано более «мягкое» изэнтропическое сжатие газа по сравнению со сжатием плазмы дейтерия и гелия в экспериментах из работ [11, 12].

Измерена сжимаемость газообразного гелия в области плотностей 4–8 г/см³ при давлениях 1500–5000 ГПа. Достигнут рекордный параметр сжатия плазмы гелия $\sigma = \rho/\rho_0 \approx 200$. Анализ полученных данных показывает, что в пределах экспериментальной погрешности результаты экспериментов с гелием описываются существующим во ВНИИЭФ уравнением состояния гелия.

Измерены плотности квазиизэнтропически сжатого дейтерия в диапазоне 3.8–5.4 г/см³ в области давлений 1800–5400 ГПа. При давлениях сжатого дейтерия $P \approx 1800$ –2000 ГПа экспериментальные данные, полученные с использованием различных сферических конструкций, согласуются друг с другом и с результатами одномерных газодинамических расчетов. Обнаружено, что при давлении $P \approx 5400$ ГПа в момент максимального сжатия отклонение экспериментальной $R(t)$ -траектории от расчетной составляет 12.6% по радиусу при использовании в расчетах уравнения состояния дейтерия ВНИИЭФ. Нет согласия результатов эксперимен-

тов и с расчетной зависимостью при использовании уравнения состояния дейтерия из библиотеки SESAME.

Данное обстоятельство, по-видимому, требует проведения дополнительного теоретического анализа полученных результатов и новых экспериментальных исследований сжимаемости дейтерия в данной области давлений, в том числе с использованием экспериментальных устройств иного типа и (или) при более высоких давлениях сжатия. Для повышения точности экспериментальных данных необходимо уменьшение несферичности схождения оболочек при высоких степенях сжатия, что потребует разработки новых нагружающих устройств с минимальным разбросом в системе инициирования ВВ.

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Хрусталеву за возможность использовать в расчетах разработанное им уравнение состояния гелия, за полезные обсуждения и замечания по существу выполненной работы, Т. В. Семеновой за любезно предоставленную расчетную рентгенограмму, а также сотрудникам, принимавшим участие в организации, проведении экспериментов и обработке полученных данных: А. И. Лебедеву, А. В. Белову, С. Е. Елфимову, Р. В. Борисову, О. А. Есину, В. Ю. Пешеходько, Ю. В. Ледневу, В. Д. Орлову, А. В. Романову, С. Ю. Согрину, Д. П. Турутину, В. И. Скокову, А. Н. Малышеву, Д. Н. Замотаеву.

Настоящая работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильносжатого вещества» и РФФИ (грант № 13-02-00396).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Фортон, *Физика высоких плотностей энергии*, Физматлит, Москва (2012).
2. V. E. Fortov, *Extreme States of Matter*, Springer (2010).
3. N. W. Ashcroft, in *High Pressure Phenomena*, ed. by R. Y. Hemley et al., IOS Press, Amsterdam (2002), p. 151.
4. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова и др., Письма в ЖЭТФ **16**, 286 (1972).
5. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова и др., ЖЭТФ **75**, 1683 (1978).
6. В. П. Копышев, В. Д. Урлин, 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).
7. V. E. Fortov, R. I. Il'kaev, V. A. Arinin et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 185001 (2007).
8. М. В. Жерноклетов, В. К. Грязнов, В. А. Аринин и др., *Письма в ЖЭТФ* **96**, 479 (2012).
9. G. V. Boriskov, A. I. Bykov, R. I. Il'kaev et al., *Phys. Rev. B* **71**, 092104 (2005).
10. Г. В. Борисков, А. И. Быков, Н. И. Егоров и др., в *сб. XI Харитоновские научные чтения*, под ред. А. Л. Михайлова, РЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2009), с. 771.
11. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., *Письма в ЖЭТФ* **92**, 336 (2010).
12. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., *ЖЭТФ* **142**, 696 (2012).
13. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., *Письма в ЖЭТФ* **96**, 172 (2012).
14. O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez et al., *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 083108 (2006).
15. Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov et al., in *11th IEEE Pulsed Power Conf., Digest of Technical Papers*, ed. by G. Cooperstein and I. Vukobitsky (1997), p. 1669.
16. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. В. Бурцев и др., *ЖЭТФ* **136**, 615 (2009).
17. A. N. Golubkov, A. A. Kononenko, and A. A. Yukhimchuk, *Fusion Sci. and Technol.* **48**, 527 (2005).
18. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин и др., ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, вып. 3 (1982), с. 11.
19. О. А. Клещевников, Ю. Н. Тюняев, В. Н. Софронов и др., *Физика горения и взрыва* **22**, 102 (1986).
20. A. Michels, W. de Graff, T. Wassenaar et al., *Physica* **25**, 25 (1959).
21. В. А. Аринин, Цифровая обработка сигналов **8**(2), 52 (2006).
22. G. I. Taylor, *Proc. Roy. Soc. London* **201**, 1065 (1950).
23. А. Г. Иванов, В. А. Огородников, Г. Я. Карпенко и др., *ПМТФ* **35**, 163 (1994).
24. В. Н. Зубарев, А. А. Евстигнеев, *Физика горения и взрыва* **20**, 114 (1984).
25. J. M. Brown, J. N. Fritz, and R. S. Hixson, *J. Appl. Phys.* **88**, 5496 (2000).
26. B. J. Jensen, G. T. Gray III, and R. S. Hixson, *J. Appl. Phys.* **105**, 103502 (2009).
27. *LASL Shock Hugoniot Data*, ed. by S. P. Marsh, Univ. of California Press, Berkley-Los Angeles-London (1980).
28. Р. Ф. Трунин, Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов, Г. В. Симаков, *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ*, под ред. Р. Ф. Трунина, РЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2006).
29. Б. Л. Глушак, Л. Ф. Гударенко, Ю. М. Стяжкин, В. А. Жеребцов, *Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов*, вып. 1 (1991), с. 32.
30. *SESAME: Los Alamos National Laboratory Equation of State Database*, ed. by S. P. Lyon and J. D. Johnson, Group T-1, Los Alamos National Laboratory Document LA-UR-92-3407 (1992), p. 1.
31. Б. А. Надикто, А. И. Ломайкин, И. Н. Павлуша, М. О. Ширшова, ВАНТ, сер. Теоретическая и прикладная физика, вып. 2 (2012), с. 43.
32. Б. Л. Глушак, Л. Ф. Гударенко, Ю. М. Стяжкин, ВАНТ, сер. Матем. моделирование физических процессов, вып. 2, 57 (1991), с. 57.
33. В. Е. Фортов, *Уравнения состояния вещества от идеального газа до кварк-глюонной плазмы*, Физматлит, Москва (2012).
34. Б. Л. Глушак, О. Н. Игнатова, ВАНТ, сер. Матем. моделирование физических процессов, вып. 2 (1998), с. 45.
35. В. П. Копышев, В. В. Хрусталева, *ПМТФ* **21**, 122 (1980).
36. G. Kerley, *Equation of State for Hydrogen and Deuterium*, Sandia National Laboratory Report SAND2003-3613 (2003).
37. С. М. Бахрах, С. В. Величко, В. Ф. Спиридонов и др. ВАНТ, сер. Матем. моделирование физических процессов, вып. 4 (2004), с. 1.
38. В. Д. Урлин, *Уравнения состояния и фазовые диаграммы изотопов водорода*, Препринт № 109-2011, РЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2011).
39. В. П. Копышев, *ПМТФ* **12**, 103 (1971).
40. W. G. Hoover, S. G. Gray, and K. W. Johnson, *J. Chem. Phys.* **55**, 1128 (1971).
41. Н. Б. Варгафтик, *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*, Наука, Москва (1972).
42. V. K. Gryaznov, I. L. Iosilevskiy, and V. E. Fortov, <http://www.ihep.ras.ru/npp2011/pres/gryaznov.pdf>.