

Квазиизэнтропическая сжимаемость дейтерия в области давлений ~ 12 ТПа

М. А. Мочалов¹⁾, Р. И. Илькаев⁺, В. Е. Фортгов*, А. Л. Михайлов⁺, В. А. Аринин⁺, А. О. Бликов⁺,
В. А. Комраков⁺, И. П. Максимкин⁺, В. А. Огородников⁺, А. В. Рыжков⁺

⁺Российский Федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия

*Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

Поступила в редакцию 14 ноября 2017 г.

Представлен экспериментальный результат по квазиизэнтропической²⁾ сжимаемости сильно-неидеальной плазмы дейтерия, сжатой до плотности $\rho \approx 10 \text{ г/см}^3$ давлением $P = 11400 \text{ ГПа}$ (114 Мбар) в устройстве сферической геометрии. Описаны характеристики экспериментального устройства, методы диагностики и результаты эксперимента. Траектория движения металлических оболочек, сжимающих дейтериевую плазму, регистрировалась с помощью мощных импульсных источников рентгеновского излучения с граничной энергией электронов до 60 МэВ. Значение плотности плазмы дейтерия $\rho \approx 10 \text{ г/см}^3$ определено по измеренному значению радиуса оболочки в момент ее “остановки”. Давление сжатой плазмы получено на основе газодинамических расчетов, учитывающих реальные характеристики экспериментального устройства.

DOI: 10.7868/S0370274X18030062

1. Экспериментальное устройство. Для исследования сжимаемости дейтерия при давлении 11400 ГПа (114 Мбар) использовалось двухкаскадное сферическое устройство МБ5, аналогичное примененному ранее при исследованиях сжимаемости дейтерия и гелия в работах [1–5]. Схематическая конструкция устройства приведена на рис. 1. Сжатие плазмы дейтерия осуществляется под действием стальных сферических оболочек 1 и 2, разгоняемых к центру симметрии устройства продуктами взрыва мощного конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) 3, изготовленного на основе октогена, и системой ударных волн, циркулирующих в полости оболочки 2, внутренняя поверхность которой защищена от прямого воздействия наружной оболочки смягчающим слоем из исследуемого газа, что в значительной мере исключает выброс частиц металла во внутреннюю плазменную полость. Для дополнительного снижения возмущений от системы инициирования между блоком ВВ 3 и внешней оболочкой 1 использована прокладка из плексигласа 4. Оболочки 1 и 2 изготовлены из высокопрочной стали методом пайки из двух полусфер каждая [6, 7]. Для сжатия дейтерия в заявленной области давлений в экспери-

менте использовано более мощное, чем в [1–5], конденсированное ВВ с массой $m \approx 85 \text{ кг}$ в тротиловом эквиваленте.

Для заполнения экспериментальных устройств нерадиоактивными изотопами водорода высокого давления использовалась система напуска, основу которой составляют термодесорбционные источники [8]. Изотопная чистота газообразного дейтерия составляла 98.9% (остальное – протий). Начальное давление газа в процессе заполнения измерялось датчиком S-10 фирмы WIKA (класс точности 0.25). Температура газа контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, расположенной внутри трубопровода, использованного для напуска газа. Давление газа в полостях оболочек 1 и 2 было одинаковым. Начальная плотность дейтерия ρ_0 рассчитывалась по измеренным значениям давления и температуры с использованием справочных данных [9].

2. Газодинамическое моделирование экспериментального устройства. Для правильного выбора времен регистрации в эксперименте по измерению сжимаемости плазмы дейтерия необходима достоверная информация о работе всех элементов нового экспериментального устройства, включая определение времени “остановки” внутренней границы внутренней оболочки (ВГО2) с точностью по времени не хуже 0.05 мкс. С этой целью был проведен предварительный газодинамический экс-

¹⁾e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

²⁾Сохраняем исторически сложившееся в РФЯЦ-ВНИИЭФ написание слова “изэнтропа” и его производных.

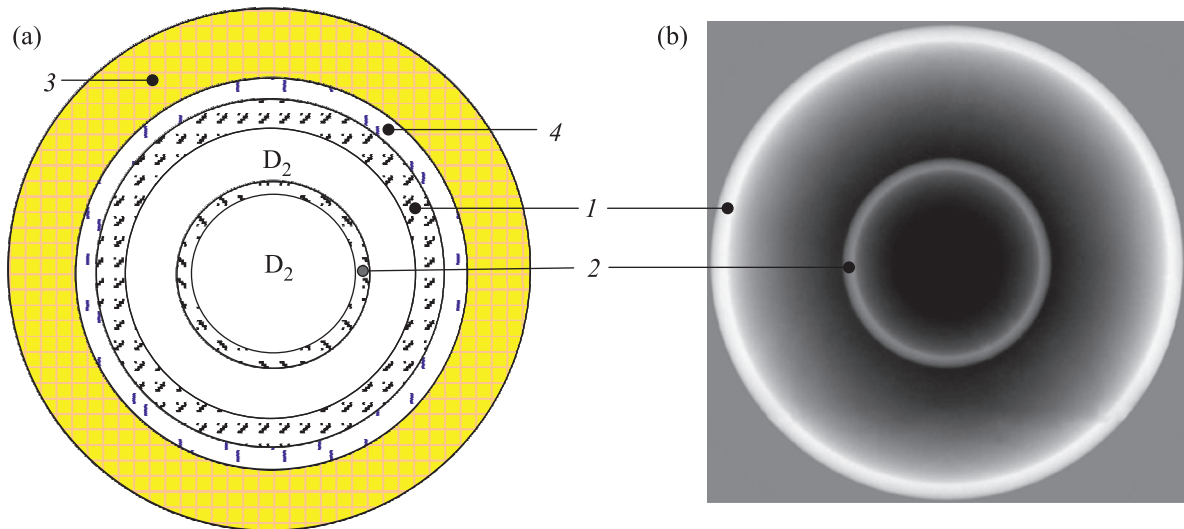


Рис. 1. (Цветной онлайн) Двухкаскадное сферическое экспериментальное устройство МБ5: (а) – схема конструкции, (б) – рентгенограмма устройства в исходном состоянии; 1 – внешняя оболочка (Fe1) $\varnothing 203.2 \times 7$ мм; 2 – внутренняя оболочка (Fe2) $\varnothing 72 \times 5$ мм, 3 – ВВ, 4 – плексиглас

Таблица 1. Начальные условия модельного эксперимента и данные движения ударных волн по элементам устройства

Начальные параметры гелия			Контактные датчики		Гетеродин-интерферометр	
ρ_0 (г/см ³)	P_0 (кгс/см ²)	T_0 (С)	τ_o (мкс)	τ_1 (мкс)	τ_2 (мкс)	τ_3 (мкс)
0.036	258.8	27.5	9.98 ± 0.01	13.92 ± 0.01	15.23 ± 0.01	25.95 ± 0.01

Здесь: ρ_0 , P_0 , T_0 – плотность, давление и температура, τ_o – время входа УВ в оболочку из плексигласа, τ_1 , τ_2 , τ_3 – времена выхода УВ на внутреннюю границу оболочек из плексигласа, первого и второго каскадов соответственно.

перимент с полусферическим макетом, моделирующим геометрию конструкции и технологию эксперимента. Схематическая конструкция полусферического макета, использованного в предварительном опыте, показана на рис. 2. Макетирование проведе-

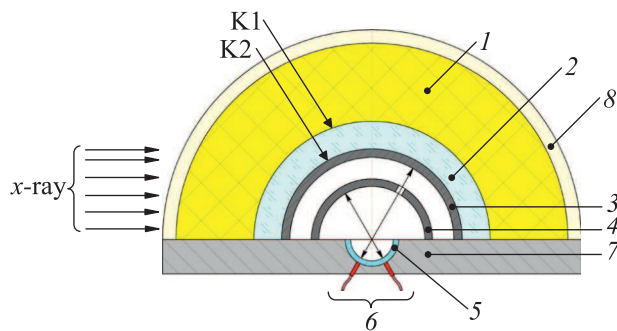


Рис. 2. (Цветной онлайн) Полусферический макет экспериментального устройства: 1 – ВВ, 2 – плексиглас, 3 – внешняя оболочка, 4 – внутренняя оболочка, 5 – оптическое окно, 6 – PDV-датчики (4 пары); 7 – стальной экран; 8 – система инициирования ВВ; K1 и K2 – электроконтактные датчики (7 пар)

но с заполнением полостей полусферического блока газообразным гелием при начальном давлении

$P_o \approx 26$ МПа (258.8 кгс/см²). В эксперименте одновременно использованы несколько методик: электроконтактная – для регистрации движения ударной волны (УВ) по плексигласу (датчики располагали на двух уровнях K1 и K2); рентгенографическая – для регистрации движения оболочек; гетеродин-интерферометрическая с PDV-датчиками [10] для измерения скорости полета стальных оболочек (8 датчиков). Регистрацию PDV-датчиками и герметизацию полостей с газом обеспечивало оптическое окно из кварцевого стекла, вклеенное в стальной экран.

В результате проведенного эксперимента зарегистрированы моменты входа УВ в плексиглас и в оболочку первого каскада, а также время движения УВ по плексигласу; измерены скорость и траектория движения оболочек обоих каскадов. Полученные данные показаны на рис. 3 и приведены в табл. 1 и 2. Здесь и далее времена указаны от момента инициирования ВВ.

3. Экспериментальные данные по сжимаемости дейтерия при давлении ~ 12 ТПа. Схема эксперимента (рис. 4) аналогична той, которая применена ранее в работе [11]. Теневое изображение гра-

Таблица 2. Сводные данные по результатам трассировки границ по оси полусферического устройства

τ (мкс)	Внешняя оболочка (Fe1)		Внутренняя оболочка (Fe2)	
	R_{IN} (мм)	R_{OUT} (мм)	R_{IN} (мм)	R_{OUT} (мм)
18.31	85.80 ± 0.073	93.58 ± 0.074	30.94 ± 0.076	35.89 ± 0.080
25.29	56.74 ± 0.081	72.20 ± 0.115	30.87 ± 0.105	35.78 ± 0.125
29.30	38.25 ± 0.064	60.78 ± 0.116	27.34 ± 0.167	32.08 ± 0.071

Здесь: τ – времена рентгенографирования, R_{IN} и R_{OUT} – радиусы внутренней и наружной границ оболочек соответственно.

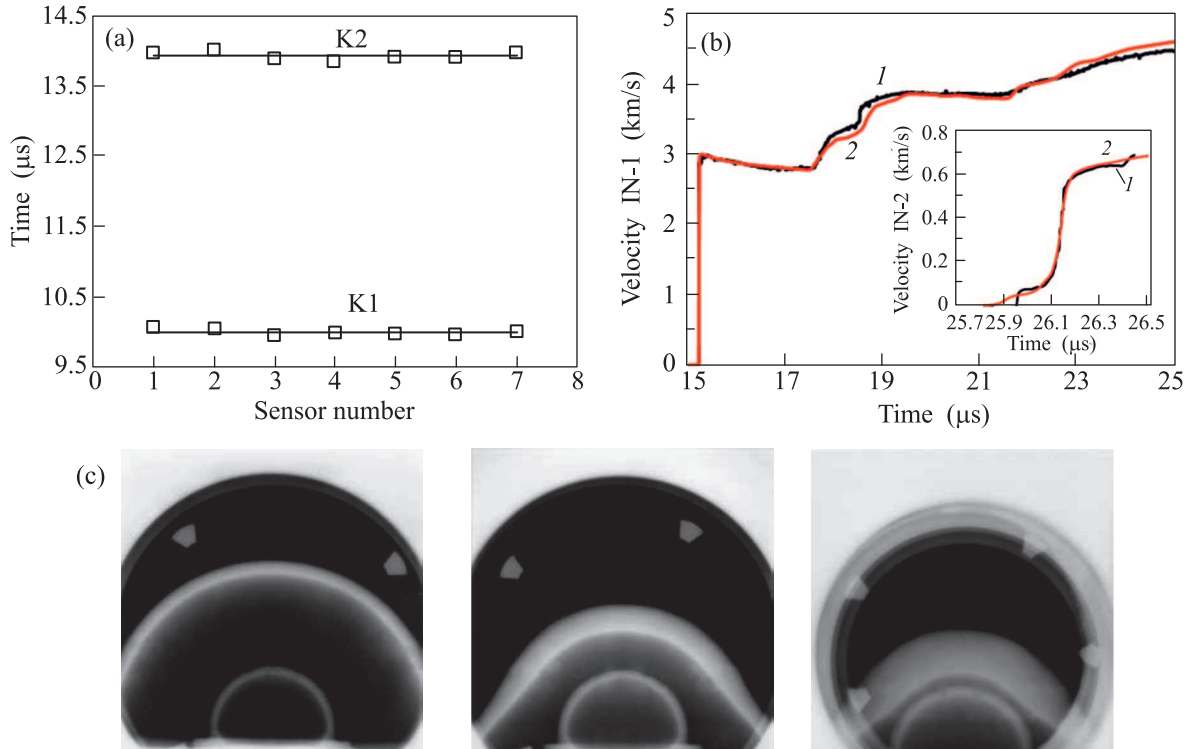


Рис. 3. (Цветной онлайн) Результаты эксперимента с полусферическим макетом: (а) – время движения УВ по плексигласу (электроконтактная методика); (б) – скорость движения внутренней границы оболочек обоих каскадов (методика гетеродин-интерферометра): черная линия, 1 – данные PDV-датчиков, красная линия, 2 – расчеты; (с) – траектория движения оболочек (рентгенографическая методика)

ниц оболочек, сжимающих исследуемый газ, получено при одновременном использовании тормозного излучения трех мощных бетатронов 1 с граничной энергией электронов ≈ 60 МэВ [12], расположенных под углами 45° друг к другу в защитном бетонном сооружении 2, работающих в режиме последовательной генерации трех импульсов рентгеновского излучения. При этом длительность каждого импульса составляла ~ 150 – 180 нс. В опыте использовалась индивидуальная оптико-электронная система детектирования 3, имеющая динамический диапазон регистрации $\sim 10^3$, которая активируется синхронно с импульсами бетатрона, что позволяет получать в каждой проекции три независимых рентгеновских изображения. В качестве преобразователей рентгеновского излучения в видимое в данной системе ис-

пользовались монокристаллы йодистого натрия и силикат лютеция. Для устранения влияния рассеянного излучения на высокочувствительные детекторы 3 размер поля регистрации в каждой из трех проекций ограничивается свинцовыми коллиматорами 4. Для защиты бетатронов 1 и оптико-электронных регистраторов рентгеновского излучения 3 применены алюминиевые конусы 5.

В эксперименте зарегистрированы девять фаз сжатия дейтериевой плазмы и последующего разлета газовой полости, находящейся в центре устройства. Характерные экспериментальные кадры показаны на рис. 5. Для трассировки границ сферических оболочек, как и в [1–5], применен функциональный метод [13], в основе которого лежит использование априорной информации о функции плотности

Таблица 3. Параметры плазмы дейтерия в эксперименте

Начальное состояние газа					Максимальное сжатие					
P_0 (ГПа)	T_0 (°C)	ρ_0 (г/см ³)	R_0 (мм)	S/R	R_{\min} (мм)	ρ_{exp} (г/см ³)	P_{calc} (ГПа)	ρ_{calc} (г/см ³)	T_{calc} (кК)	S/R
0.02138	-17	0.0353	31	13.3	4.76	$10^{+1.3}_{-0.9}$	11400^{+2000}_{-2000}	11.0	36.5	80.2

Здесь: R_0 – начальный радиус ВГО2, R_{\min} – радиус ВГО2 при максимальном сжатии, S_0/R и S/R – относительная энтропия в начальном состоянии и при максимальном сжатии соответственно, ρ_{exp} – измеренное значение средней плотности плазмы дейтерия, ρ_{calc} , P_{calc} , T_{calc} – усредненные по массе рассчитанные значения плотности, давления и температуры плазмы дейтерия в момент максимального сжатия соответственно.

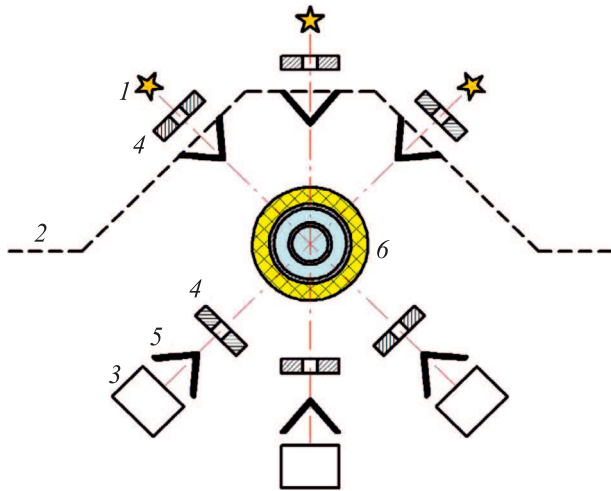


Рис. 4. (Цветной онлайн) Схема эксперимента: 1 – источники рентгеновского излучения [11], 2 – защитное сооружение, 3 – регистраторы, 4 – коллиматоры (Pb), 5 – конус (Al), 6 – экспериментальное устройство (см. рис. 1)

почернения фотоматериала в окрестности протяженных границ. Сущность метода [13] – экстраполяция приграничных функций, лежащих слева и справа от границы, с целью нахождения точки их пересечения, которая и принимается за координату границы. Для нахождения устойчивого решения число итераций при выборе аппроксимирующей функции составляло не менее 50. Результаты трассировки внутренних границ оболочек приведены на рис. 5. В качестве отклонений по радиусам даны значения асферичности газовой полости.

Расчеты характеристик экспериментального устройства выполнены по одномерной газодинамической программе [14], предназначенной для численного моделирования неустановившихся движений сплошной среды, тестированной по экспериментальным данным, полученным в России и за рубежом. Продукты взрыва ВВ описаны уравнением состояния в форме [15] с коэффициентами, подобранными докт. физ.-мат. наук А.Б.Медведевым. Расчеты выполнены с фактической начальной плотностью взрывчатого вещества. В газодинамических расчетах для дейтерия использовалось уравнение

состояния (УРС) Копышева-Хрусталева (КХ) [16], построенное по данным [17, 18]. Для плексигласа использовали УРС в форме Ми-Грюнаизена с параметрами: $\rho_0 = 1.18 \text{ г/см}^3$, $c_0 = 2.83 \text{ км/с}$, $n = 4.25$, $h = 5.1$, которое удовлетворительно описывает еще и ударную адиабату для пористых образцов с $\rho_0 = 0.11 \text{ г/см}^3$ [19]. Для учета влияния упругопластических свойств стальных оболочек в настоящей работе использована дислокационная модель [20], учитывающая затухание упругого предвестника и релаксацию сдвиговых напряжений в волнах нагружения. Дополнительно в газодинамическом расчете учитывалась возможность хрупкого разрушения для оболочек.

Полученные в эксперименте данные по сжимаемости плазмы дейтерия приведены на рис. 6 вместе с результатами выполненного газодинамического расчета. На том же графике нанесены и экспериментальные результаты, полученные в модельном полусферическом эксперименте, использованные для тестирования модельных расчетов. Из графика на рис. 6 следует, что расчет с использованием УРС дейтерия [16] при учете упругопластических свойств для металла оболочек по модели [20] хорошо описывает контрольные точки (pt.1, pt.2) движения УВ по плексигласовой оболочке, а также измеренные рентгенографическим методом значения границ внешней оболочки экспериментального устройства. Данные расчета воспроизводят также динамику движения внутренней границы оболочек обоих каскадов (Fe1 и Fe2), зарегистрированную методом гетеродин-интерферометра.

Как следует из анализа выполненного расчета, в момент максимального сжатия в дейтериевой плазме реализуется давление $P_{\text{calc}} = 11400 \text{ ГПа}$ и температура $T_{\text{calc}} = 36500 \text{ К}$ при измеренной плотности сжатой плазмы $\rho_{\text{exp}} = 10 \pm 1.3 \text{ г/см}^3$ и величине сжатия $\sigma = \rho_{\text{exp}}/\rho_0 = 300$. Рассчитанное значение средней плотности $\rho_{\text{calc}} = 11 \text{ г/см}^3$ согласуется с экспериментально измеренной величиной с неопределенностью в 10%. Критерием истинности определенного давления является хорошее совпадение экспериментальных данных и рассчитанной диаграммы $R(t)$.

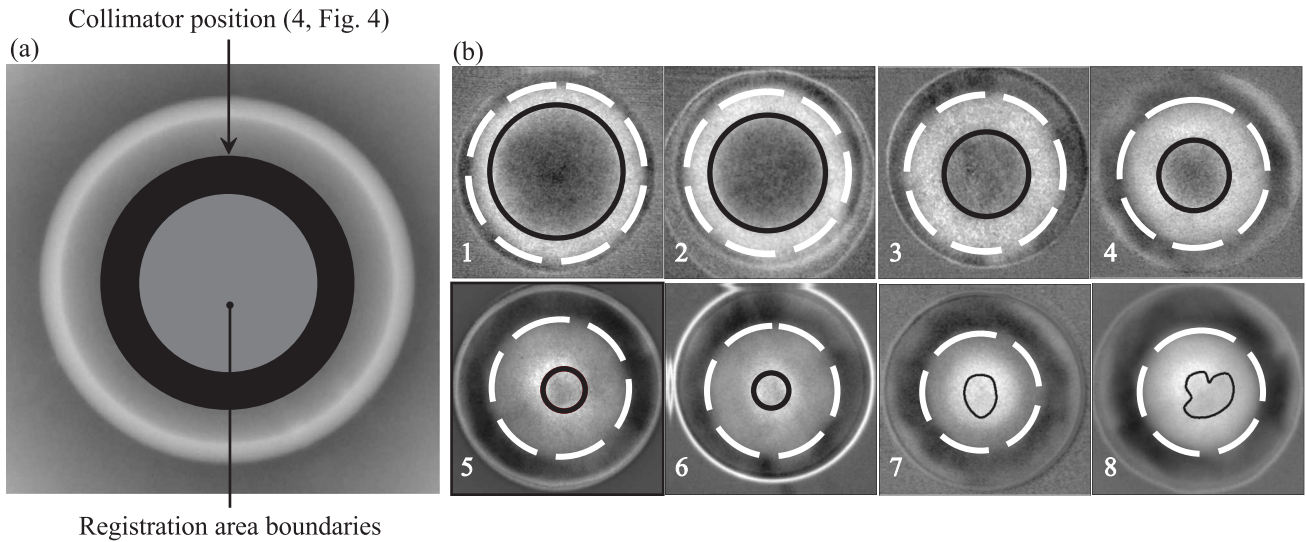


Рис. 5. Рентгенографическое изображение внутренней (Fe2, рис. 1) оболочки экспериментального устройства: (а) – в исходном состоянии; (б) – в зависимости от времени сжатия: 1–5 – фазы подлета, 6 – момент “остановки”, 7, 8 – фазы разлета. Результаты трассировки ее границ: пунктир – внешняя граница оболочки, сплошная – внутренняя

Результат настоящей работы приведен в табл. 3 вместе с параметрами газа в начальном состоянии и показан на рис. 7. На том же рисунке изображе-

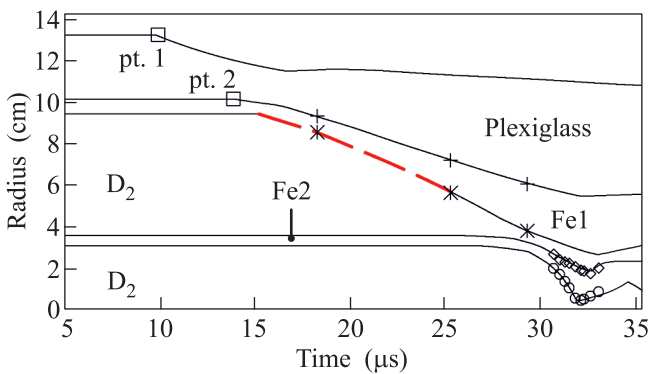


Рис. 6. (Цветной онлайн) Экспериментальные данные и рассчитанные $R(t)$ диаграммы: \square – электроконтактная методика, * и + – данные рентгенографирования из модельного эксперимента, --- PDV-методика, \circ , \diamond – данные основного эксперимента, — - 1D-расчет

на рассчитанная ударная адиабата дейтерия и изэнтропа, описывающая состояние плазмы дейтерия при максимальном сжатии.

Результат настоящей работы представлен на рис. 8 вместе с данными по сжимаемости плазмы дейтерия из работы [5], в которой зафиксирован скачок плотности $(\partial P/\partial \rho)_S = 0$ в диапазоне $\Delta \rho = 1.46\text{--}1.68 \text{ г/см}^3$ при температуре $T \approx 3700 \text{ К}$ и давлении $P \approx 150 \text{ ГПа}$, а также изменение в наклоне производной $dP/d\rho$ после скачка плотности

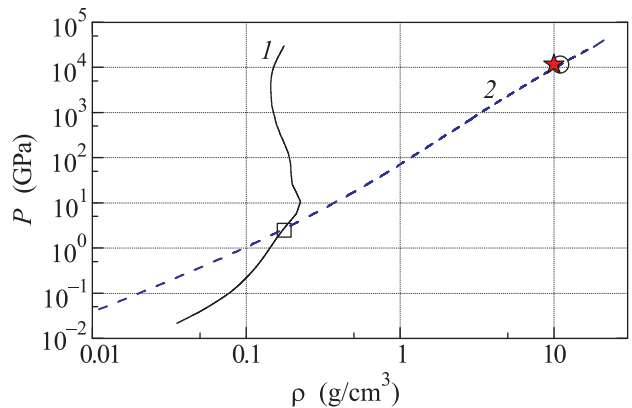


Рис. 7. (Цветной онлайн) Зависимость давления от плотности при ударно-волновом сжатии дейтерия и на изэнтропе разгрузки. Эксперимент: \star – настоящая работа. Расчет: 1 – ударная адиабата дейтерия, 2 – изэнтропа разгрузки, \circ – состояние плазмы дейтерия при максимальном сжатии, \square – состояние плазмы дейтерия на ударной адиабате ($\rho_H = 0.176 \text{ г/см}^3$, $P_H = 2.659 \text{ ГПа}$)

(независимо от величины $\Delta \rho$ этого скачка), что в [5] связывается с плазменным фазовым переходом. На том же графике приведены две изэнтропы: 1 – изэнтропа, рассчитанная с использованием УРС дейтерия РФЯЦ-ВНИИЭФ до давлений $P = 150 \text{ ГПа}$, и 2 – изэнтропа, рассчитанная по УРС SANA-D из работы [5] выше давлений $P = 150 \text{ ГПа}$, которая хорошо описывает результат настоящей работы. Как следует из рис. 8, вся совокупность полученных

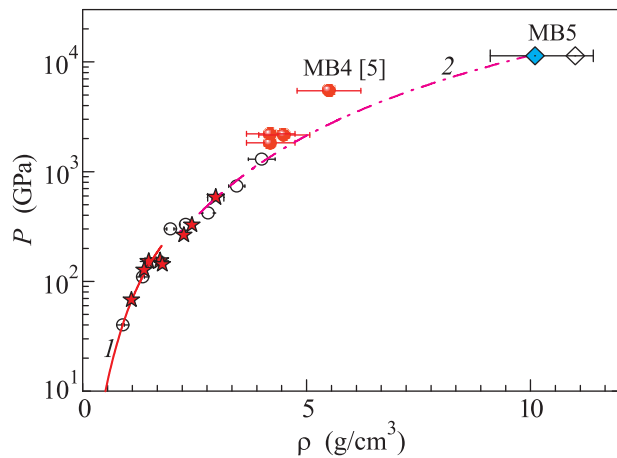


Рис. 8. (Цветной онлайн) Сравнение экспериментальных данных и теоретических расчетов квазиизэнтропического сжатия дейтерия. Эксперимент: \star – цилиндрические опыты [5], \bullet – сферические опыты [5], \circ – сферические опыты [16], \blacklozenge – настоящая работа (т. MB5). Расчет: \diamond – настоящая работа, 1 – изэнтропа в области давлений до 150 ГПа [5] (расчет по УРС ВНИИЭФ), 2 – “усредненная” изэнтропа ($S = 26.0$ Дж/г·К) для области выше 150 ГПа [5] (Расчет по УРС SANA-D)

данных указывает на особенность поведения сжатой плазмы дейтерия в точке MB4 [5] ($P \sim 5500$ ГПа), что уже было отмечено ранее в работе [5]. Для окончательного вывода о необходимости корректировки УРС дейтерия авторы намерены провести более тщательное исследование поведения сжатой плазмы дейтерия в области давлений 4000–6000 ГПа, а также расширить диапазон исследований квазиизэнтропической сжимаемости плазмы дейтерия до уникально высоких давлений 20000–30000 ГПа.

Заключение. В результате проведенной работы получен результат по сжимаемости дейтерия при рекордном на данный момент давлении $P \approx 11400$ ГПа и плотности $\rho \approx 10$ г/см³ (степень сжатия $\sigma \approx 300$). Из данных модельного эксперимента получены результаты по динамике движения оболочек и ударных волн, что позволило откалибровать манеру расчета работы экспериментального устройства. На основании анализа проведенного эксперимента и ранее полученных данных по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия в цилиндрических и сферических нагружающих устройствах обнаружена особенность в поведении сжимаемости плазмы дейтерия в области давлений $P \approx 5500$ ГПа, которая не описывается расчетом с использованием УРС-дейтерия Копышева–Хрусталева. Для окончательного вывода о необходимости корректировки УРС-дейтерия необходимо проведение дополнительных опытов в диа-

пазоне давлений 4000–6000 ГПа, а также постановка экспериментов в уникально высокой области давлений ~ 20000 –30000 ГПа.

Авторы выражают благодарность сотрудникам, принимавшим участие в организации, проведении экспериментов и обработке полученных данных: А.И. Лебедеву, С.Е. Елфимову, Р.В. Борисову, Е.П. Волкову, Р.В. Тилькунову, О.А. Есину, В.В. Ковалдову, А.В. Романову, Д.П. Турутину, А.С. Пупкову, С.В. Ерунову, Г.С. Яндубаеву, А.В. Федорову, Д.А. Калашникову, Е.А. Чудакову, С.А. Финюшину, И.В. Шмелеву, М.В. Логинову, Е.В. Шевнину, А.И. Гуркину, А.И. Ломайкину.

Настоящая работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН “Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физики сильно-сжатого вещества” и РФФИ (грант 16-02-00275).

1. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, А. Ю. Баурин, В. А. Комраков, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, А. А. Юхимчук, Письма в ЖЭТФ **96**, 172 (2012).
2. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др. (Collaboration), ЖЭТФ **146**, 169 (2014).
3. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, В. А. Комраков, А. В. Рыжков, В. А. Огородников, А. А. Юхимчук, Письма в ЖЭТФ **101**, 575 (2015).
4. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, Ю. М. Макаров, В. А. Аринин, А. О. Бликов, А. Ю. Баурин, В. А. Комраков, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, Е. А. Пронин, А. А. Юхимчук, ЖЭТФ **142**, 696 (2012).
5. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, А. О. Бликов, В. А. Огородников, В. К. Грязнов, И. Л. Иосилевский, ЖЭТФ **151**, 592 (2017).
6. А. О. Бликов, И. С. Калинин, В. А. Комраков, М. А. Мочалов, В. А. Огородников, А. В. Романов, Патент (RU) 2545289 C1, бюлл. № 9, 27.03.2015.
7. А. О. Бликов, А. Ю. Гусев, В. А. Комраков, А. В. Котин, Д. А. Линяев, М. А. Мочалов, В. А. Огородников, С. Н. Шошин, Патент (RU) 168263 U1, бюлл. № 3, 25.01.2017.
8. A. N. Golubkov, A. A. Kononenko, and A. A. Yukhimchuk, Fusion Science and Technology **48**, 527 (2005).
9. A. Michels, W. De Graaff, T. Wassenaar, J. M. H. Levett, and P. Louwse, Physica **25**, 25 (1959).
10. O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez, T. L. Whitworth, and W. W. Kuhlow, Rev. Sci. Instrum. **77**, 083108 (2006).

11. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, Ю. М. Макаров, В. А. Аринин, С. К. Гришечкин, А. О. Бликов, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, В. К. Грязнов, Письма в ЖЭТФ **92**, 336 (2010).
12. Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov, D. I. Zenkov, and V. F. Tkachenko, in: *11th IEEE Pulsed Power Conference Baltimor*, Maryland, USA (1997), p. 1669.
13. V. A. Arinin and V. I. Tkachenko, *Pattern Recognition and Image Analysis* **19**, 63 (2010).
14. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин, В. Н. Софронов, ВАНТ. Сер.: Методики и программы числ. решения задач матем. физ. Вып. **3**, 11 (1982).
15. В. Н. Зубарев, А. А. Евстигнеев, ФГВ **20**, 114 (1984).
16. В. П. Копышев, В. В. Хрусталева, ПМТФ **21**, 122 (1980).
17. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова, А. П. Толочко, В. Д. Урлин, Письма в ЖЭТФ **16**, 286 (1972).
18. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова, А. П. Толочко, В. Д. Урлин, ЖЭТФ **75**, 1683 (1978).
19. Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов, С. И. Киршанов, А. Е. Ковалев, В. Г. Куделькин, Т. С. Лебедева, А. И. Ломайкин, М. А. Мочалов, Г. В. Симаков, А. Н. Шуйкин, И. М. Воскобойников, ФГВ **40**, 104 (2004).
20. И. Р. Трунин, С. В. Корицкая, В. Арнолд, Препринт 75-2000, Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ (2000), 65 с.