

АППАРАТУРА, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЙ СЖИМАЕМОСТИ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ 1500–5000 ГПА

*А. Ю. Баурин, А. О. Бликов, М. А. Мочалов, В. А. Аринин,
В. А. Огородников, А. В. Рыжков, А. А. Юхимчук*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.

Введение

Метод измерения квазиизэнтропического сжатия для целей изучения параметров уравнений состояния (УРС) веществ с использованием конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) в устройствах сферической и цилиндрической геометрии используется во ВНИИЭФ с 1970-х годов [1–4]. Сжатие в таких устройствах осуществляется серией ударных волн, циркулирующих в объеме газа, и сходящейся к центру устройства стальной оболочкой, разгоняемой продуктами взрыва (ПВ) мощного ВВ. При таком способе нагружения достигаются состояния сжатого газа на изэнтропах, положение которых зависит от массы ВВ и геометрии экспериментального устройства, т.е. параметров, которые можно менять в широком диапазоне.

Для регистрации положения оболочек, сжимающих исследуемое вещество, в устройствах с наличием больших масс металла и мощных ВВ во ВНИИЭФ широко используются конструкции безжелезных импульсных бетатронов (БИМ) [5, 6]. Современная экспериментальная база применена недавно в экспериментах по измерению квазиизэнтропического сжатия газообразных гелия и дейтерия до плотности $\sim 4 \text{ г/см}^3$ при давлении $P \approx 2000 \text{ ГПа}$ [7, 8]. С использованием устройств цилиндрической геометрии в диапазоне 100–500 ГПа исследована квазиизэнтропическая сжимаемость гелия в работе [9].

Исследование сжимаемости гелия и дейтерия представляет несомненный научный и практический интерес для описания различных высокоэнергетических состояний, широко распространенных в природе. Например, для изучения структуры планет-гигантов и происходящих в их недрах процессов необходимо использование УРС газов, при построении которых опираются на результаты экспериментов по исследованию их сжимаемости.

В настоящей работе получен новый рекордный результат по измерению квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия в устройстве сферической формы при давлении порядка 5000 ГПа.

Постановка экспериментов. Экспериментальное взрывное нагружающее устройство

Для достижения высокого давления в газе в настоящей работе, как и в [7, 8], использовалось двухкаскадное сферическое экспериментальное устройство, схема которого представлена на рис. 1. Внешняя прочная оболочка (1) такого устройства служит для создания высокого начального давления газа до 40 МПа и защищает внутренний каскад от прямого воздействия ПВ мощного ВВ. Внутренняя же оболочка (2) выделяет область исследуемого газа для создания высокого сжатия и защищает ее от попадания металлической пыли с внешней оболочки [10].

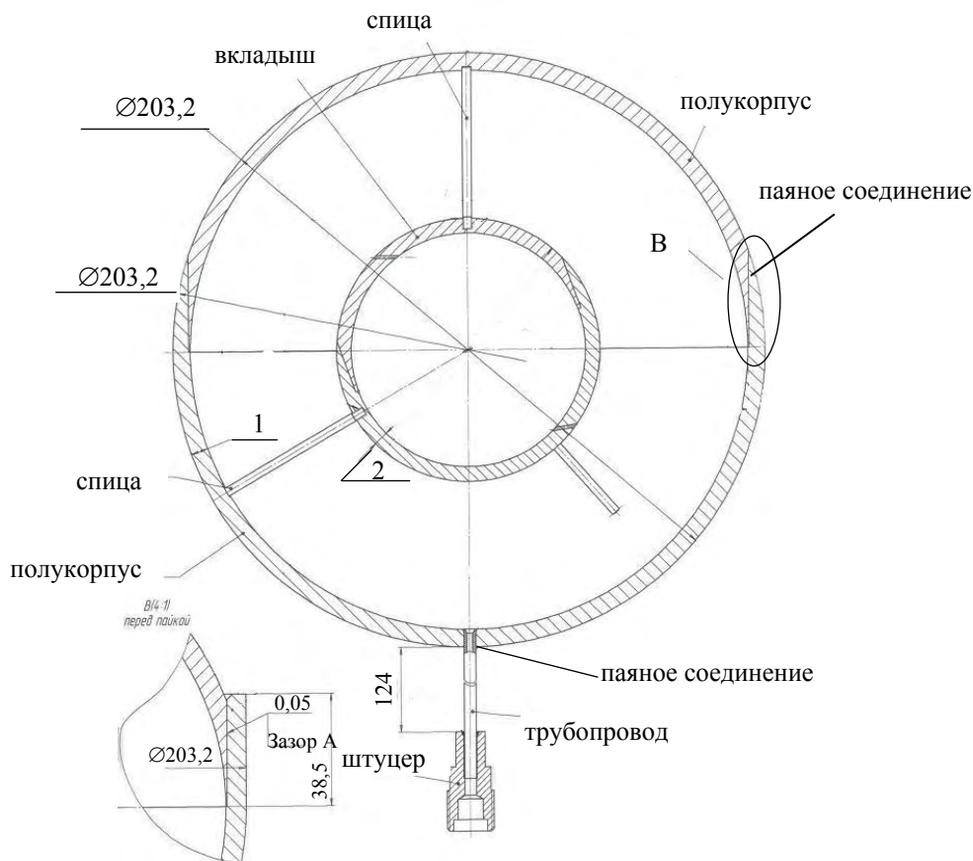


Рис. 1. Схема экспериментального устройства

Первоначально исследуемый газ в таких устройствах подвергается воздействию проходящей УВ, которая сжимает и нагревает его. В результате многократных отражений во внутренней полости газа формируется серия вторичных ударных волн, обеспечивающих сжатие практически без нагрева. Дополнительное сжатие осуществляется плавно сходящейся к центру внутренней

оболочкой, через смягчающий слой исследуемого газа, находящегося между оболочками. Таким образом, многократная циркуляция УВ и плавное сжатие оболочкой переводит ударно-волновое сжатие газа в квазиизэнтропическое при существенном снижении доли теплового давления и более длительном удержании газа при высоком давлении по сравнению с нагружением однократной УВ. Движение оболочки к центру происходит до тех пор, пока возрастающее давление внутри исследуемого газа ее не остановит. В этот момент и достигается максимальное сжатие газа.

Компоновка сферического устройства позволяла откачать обе полости экспериментальных камер от примесей воздуха в лабораторных условиях. Для разгона оболочек и сжатия газа в эксперименте использован блок ВВ с массой ~ 55 кг в тротиловом эквиваленте.

Для наполнения сферических камер в условиях полигона использовалась уникальная многофункциональная малогабаритная система напуска высокого давления, в составе которой применялись металлогидридный источник дейтерия на основе ванадия [19] и термокомпрессор, состоящий из двух емкостей высокого давления с нагревательными элементами. Данная установка позволяет дистанционно заполнять газом экспериментальные сборки объемом 3 литра до давлений 50 МПа. Принципиальное устройство системы напуска при проведении эксперимента представлено на рис. 2.

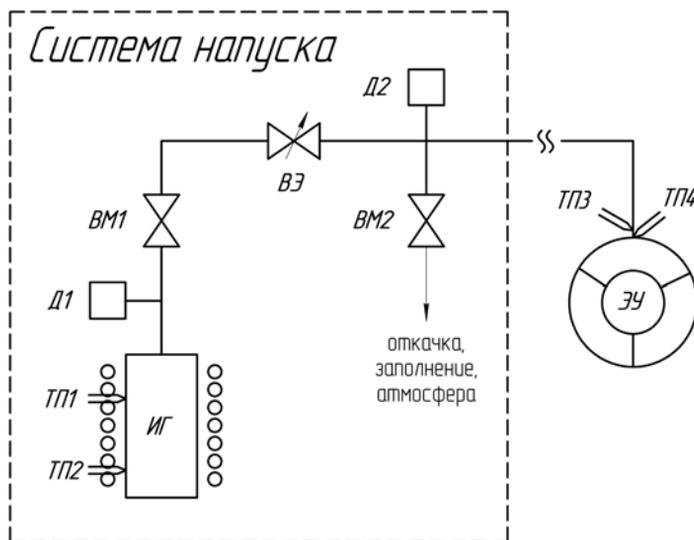


Рис. 2. Принципиальная схема системы напуска: ВМ1, ВМ2 – механические вентили; ВЭ – вентиль с электромеханическим приводом; Д1, Д2 – датчики давления АР1703; ТП1-ТП4 – термопары хромель-алюмель; ИГ – источник газа; ЭУ – экспериментальное устройство

Эксперименты проведены в постановке, показанной на рис. 3. Теневое изображение границ внутренней оболочки, сжимающей исследуемый газ, получено при одновременном использовании тормозного излучения трех мощных бетатронов (1) с граничной энергией электронов ≈ 60 МэВ [6], расположенных под углами 45° друг к другу в защитном сооружении (2). Особенно

стью 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 сжатия газа. Это облегчает проблемы воспроизводимости опытов, чего невозможно добиться при использовании однокадровой системы регистрации [1, 2]. При исследовании движения оболочки для каждого бетатрона используется индивидуальная оптико-электронная система детектирования, имеющая квантовую эффективность $\sim 40\%$ и динамический диапазон регистрации $\sim 10^3$. В качестве гамма-конверторов в данной системе используются монокристаллы йодистого натрия, активированного теллуром, $\text{NaI(Tl)} \text{ } \varnothing 150 \text{ мм}$ ($\lambda_{\text{max}} = 410 \text{ нм}$, время высвечивания 250 нс) и силикат лютеция $\text{LSO } \varnothing 80 \text{ мм}$ ($\lambda_{\text{max}} = 420 \text{ нм}$, время высвечивания 50 нс) [6].

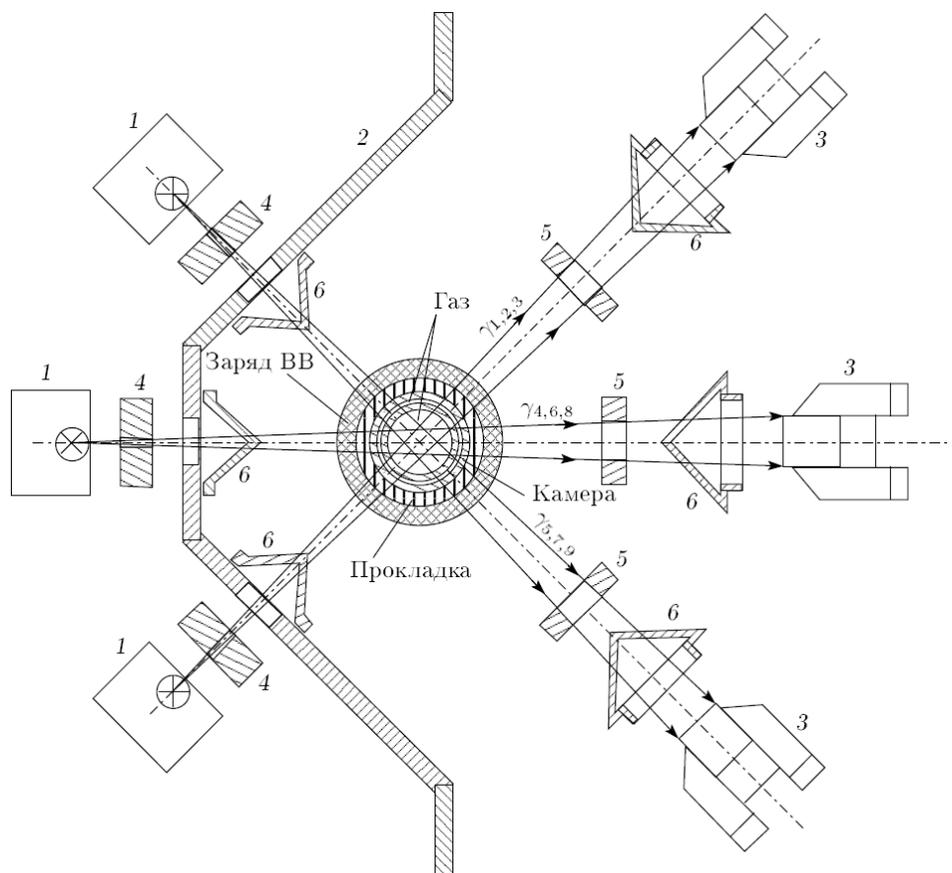


Рис. 3. Схема эксперимента по измерению квазиизэнтропической сжимаемости газов

Для устранения влияния рассеянного излучения на высокочувствительные регистраторы (3) размер поля регистрации в каждой из трех проекций ограничивается свинцовыми коллиматорами (4) и (5). Для защиты бетатронов (1) и оптико-электронных регистраторов рентгеновского излучения (3) применены алюминиевые конуса (6).

Ввиду трудностей прямого измерения давления в наших опытах, давление в газе определяли из газодинамических расчетов с учетом использования реальных термодинамических и прочностных свойств всех элементов экспериментальных устройств. Расчеты выполнены по одномерной газодинамической программе [11], предназначенной для численного решения одномерных нестационарных газодинамических задач различной геометрии с учетом теплопроводности и упругопластических свойств среды, из которых получены $R(t)$ диаграммы движения границ оболочек сферического устройства и распределения давления и температуры в плазме дейтерия (гелия) по радиусу полости на момент максимального сжатия. Продукты взрыва ВВ на основе гексогена описаны уравнением состояния из [12]. Для обеих оболочек из стали использовали уравнение состояния железа [13]. Это однофазное уравнение состояния хорошо описывает ударную адиабату, но сглаживает α - ϵ фазовый переход первого рода при $P \sim 13$ ГПа. Расчет с учетом фазового перехода в железе не привел к существенному изменению результатов. Упругопластические свойства стали для внешнего каскада не учитывались (использовалось гидродинамическое приближение). Для внутренней оболочки влияние упругопластических свойств учитывалось по модели динамического деформирования [14] со специально подобранными для стали коэффициентами. Разрушение стали для обеих оболочек описывалось моделью «хрупкого» откола с параметром $\sigma_{отк} = -4$ ГПа.

Для дейтерия использовалось уравнение состояния из [15], калиброванное по экспериментальным данным [1, 2]. Для гелия уравнение состояния в табличной форме рассчитано по модифицированной модели сжимаемого коволюма [15, 16] с использованием результатов расчетов методом Монте-Карло термодинамических свойств жидкости с обратным степенным потенциалом взаимодействия между частицами $\phi(r) = \epsilon(\sigma/r)^n$ [17].

Окончательный подбор параметров расчетной схемы экспериментальной конструкции проводился по результатам тестирования движения УВ по элементам конструкции и рентгенограмме сферической оболочки на начальной стадии ее движения (момент первого рентгенографирования), когда влиянием исследуемого газа можно пренебречь.

Результаты экспериментов

Проведены четыре эксперимента: по два опыта с дейтерием и гелием. Начальные параметры газа перед экспериментом приведены в табл. 1.

Таблица 1

Начальные параметры газа в экспериментах

№ опыта	№ устройства	газ	$T_0, ^\circ C$	$P_0, \text{МПа}$	$\rho_0, \text{г/см}^3$
1	I	D ₂	19,1	12,8	0,020
2		He	27,2	16,7	0,025
3	II	He	29,4	27,0	0,038
4		D ₂	28,8	26,4	0,037

Среднюю плотность сжатого газа измеряли по радиусу внутренней границы оболочки (ВГО) внутреннего каскада устройства в момент максимального сжатия газа. В предположении сохранения массы сжатого вещества его плотность для сферического устройства вычисляли из выражения:

$$\rho = \rho_0 \cdot (R_0 / R_{\min})^3, \quad (1)$$

где ρ_0 – начальная плотность газа, R_0 и R_{\min} – внутренний радиус оболочки в исходном состоянии и в момент ее «остановки», измеренный по рентгенограмме. Для конкретного эксперимента это значение является предельно достижимым. При этом ошибка измерения плотности в основном определяется ошибкой измерения размера полости оболочки и, следовательно, существенно зависит от качества рентгеновского снимка и способа его обработки.

Одной из основных задач одномерных расчетов является необходимость в тех или иных предположениях воспроизвести движение УВ по элементам устройства и положение оболочек на момент первого рентгенографирования. Выбирая энергетику заряда ВВ на стадии почти свободного полета оболочки, когда наличие газа в центральной полости еще кардинально не влияет на ее скорость, в некоторой степени исключается обратное влияние уравнения состояния исследуемого газа. Это «исключение» не является полным. Газ, находясь в полости между оболочками, влияет на передачу энергии от первого каскада ко второму. Однако, как показывают одномерные газодинамические расчеты, из-за небольшой его массы и кратковременности взаимодействия оболочек, это влияние не очень сильное. Большую часть времени этот газ находится в слабо сжатом состоянии, и даже его максимальное давление в 50 раз меньше достигаемого в центральной полости.

Рассмотрим более подробно эксперимент по квазиизэнтропическому сжатию гелия, в котором достигнуто давление ~ 4750 ГПа.

Сравнение рассчитанных $R(t)$ траекторий и экспериментальных данных для этого опыта приведено на рис. 4. Там же показан ряд экспериментальных рентгенограмм, на которых эквивалентный радиус газовой полости нанесен пунктиром. Как видно из рисунка, при выбранной методике тестирования результаты расчета хорошо описывают как время (t_1) прихода УВ на внешнюю границу первого каскада устройства ($m.1$), время (t_2) первого рентгенографирования ($m.2$), измеренный интервал времени $\Delta t = t_2 - t_1$, так и размеры оболочки в остальные моменты сжатия, что и позволяет использовать результаты расчета для оценки давления сжатой газовой плазмы.

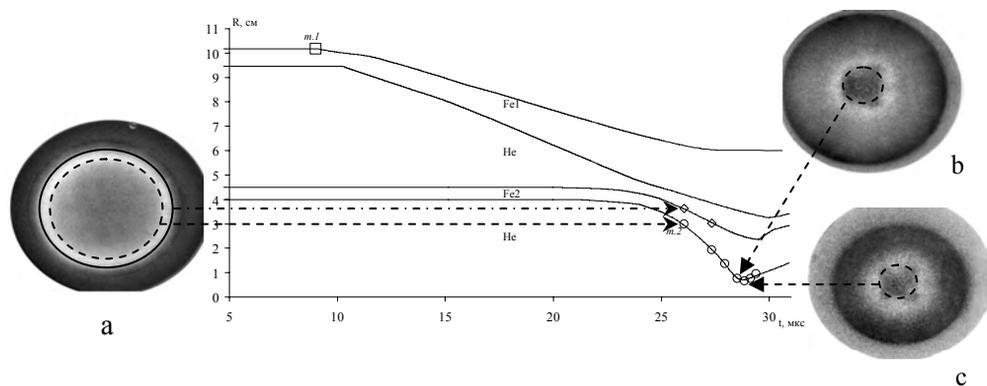


Рис. 4. $R(t)$ диаграммы движения оболочек экспериментального устройства, времена отсчитываются от начала детонации заряда ВВ # – электроконтактные измерения движения УВ при газодинамическом исследовании устройства; результаты рентгенографирования: М – внешняя граница второго каскада (Fe2); . – внутренняя граница второго каскада (Fe2) Изображения: а) $t = 26,06$ мкс; б) $t = 28,52$ мкс; в) $t = 28,85$ мкс (момент максимального сжатия) Пунктиром показаны границы оболочек, полученные в результате обработки рентгенограмм

Распределения давления и температуры по радиусу полости, полученные из газодинамического расчета на момент максимального сжатия гелия, приведены на рис. 5. Средневзвешенное давление по всей массе сжатого гелия в этом эксперименте составляет величину $P_{ВЗВ} = 4750$ ГПа. При этом экспериментально измеренная величина $\rho_{ЭКС} = (8,4 \pm 1,9)$ г/см³ согласуется с рассчитанным значением $\rho_{ср} = 7,2$ г/см³ в пределах 15 %.

Внутренняя и внешняя границы второго каскада экспериментального устройства в настоящей работе получены методом функциональной трассировки [18]. Отметим, что используемая в экспериментах аппаратура позволяет уточнять полученные данные путем рентгенографирования газовой полости в момент «остановки» одновременно всеми бетатронами, составляющими диагностический комплекс.

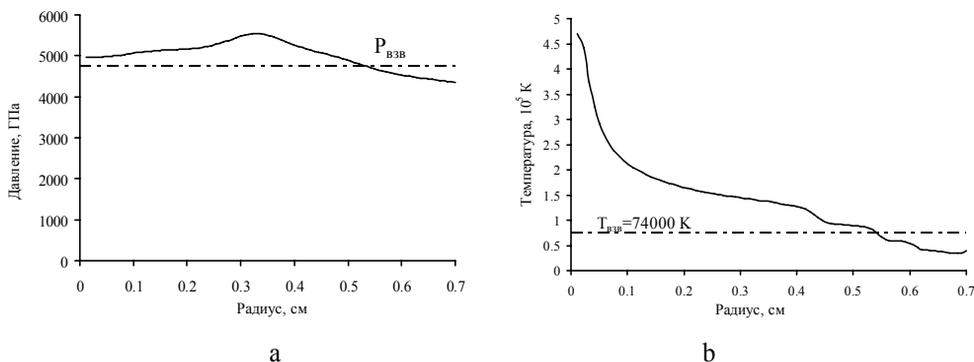


Рис. 5. Квазиэнтальпическая сжимаемость газообразного гелия. Распределения: давления – (а), температуры – (б)

На рис. 6 и 7 представлены все имеющиеся на данный момент результаты исследований квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия.

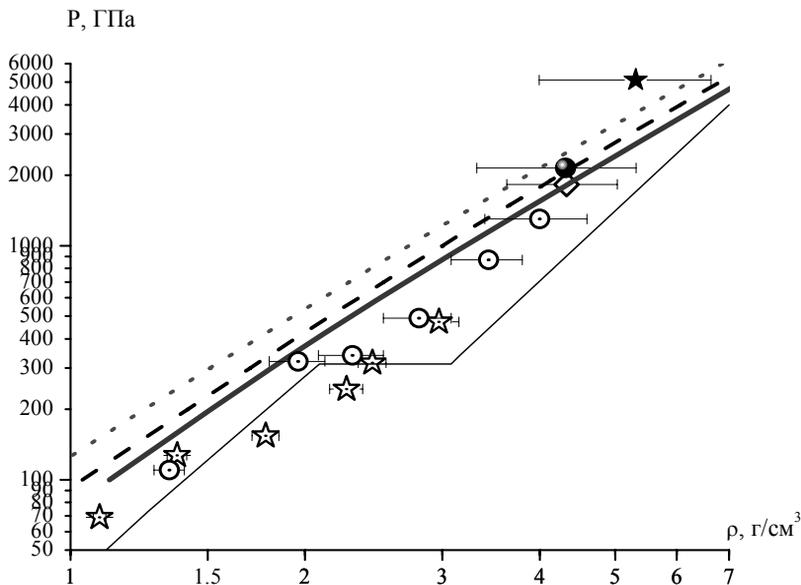


Рис. 6. Квазиизэнтропическая сжимаемость газообразного дейтерия. Расчеты: — — — — — изотерма $T_0 = 0$ [15], — — — — — изэнтропа $S/R = 16$ [22], - - - - - изэнтропа $S/R = 18$ [22], ······ — изэнтропа $S/R = 20$ [22]. Эксперименты: ○ — [1, 2], ☆ — [3], ◇ — [25], ● — [8], ★ — данная работа

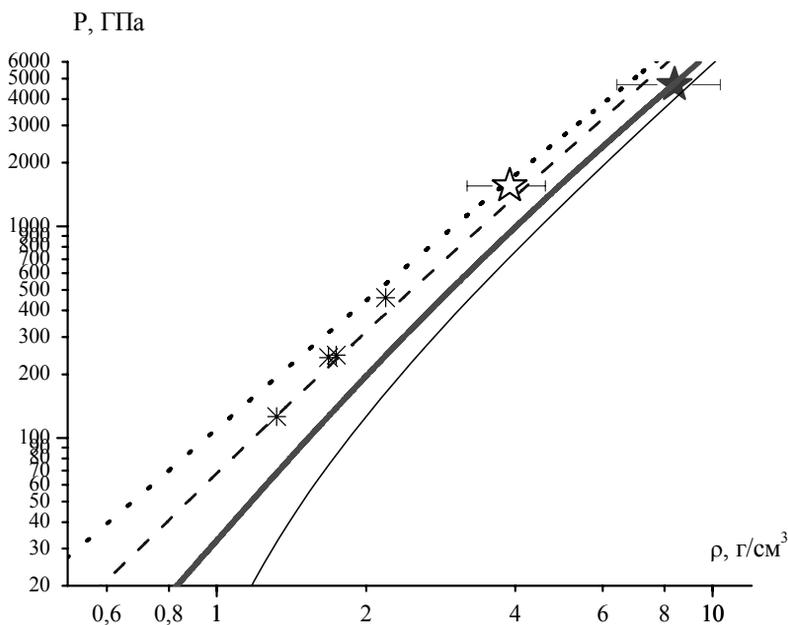


Рис. 7. Квазиизэнтропическая сжимаемость газообразного гелия. Расчеты: — — — — — изотерма, $T_0 = 0$; - - - - - изэнтропа, $r_0 = 0,02 \text{ г/см}^3$; ······ — изэнтропа, $r_0 = 0,025 \text{ г/см}^3$; — — — — — изэнтропа, $r_0 = 0,038 \text{ г/см}^3$. Эксперименты: ☆ — [8], ★ — [23], * — [9]

В табл. 2 представлены результаты, полученные авторами во ВНИИЭФ с использованием двухкаскадных экспериментальных устройств.

Таблица 2

Результаты экспериментов

№ опыта	№ устр.	газ	R_{\min} , мм	σ , мм	ρ_{exp} , г/см ³	P , ГПа	ρ_{calc} , г/см ³	T_{calc} , К
1	I	D ₂	9,1	0,89	$4,2 \pm 0,9$	2210	4,6	22000
2		He	10,0	0,65	$3,8 \pm 0,7$	1580	3,4	74000
3	II	He	6,6	0,49	$8,4 \pm 1,9$	4750	7,2	72000
4		D ₂	7,6	0,63	$5,3 \pm 1,3$	5450	7,6	24500

Из рис. 6 и 7 и табл. 2 видно, что авторами в области давлений 1500...5000 ГПа впервые исследована квазиизэнтропическая сжимаемость дейтерия и гелия. Результаты экспериментов с учетом погрешности согласуются с проведенными расчетами. Для уточнения результатов в области давлений ~5000 ГПа авторами предполагается провести дополнительные эксперименты.

Список литературы

1. Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Михайлова О. Л. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1972. 16. 286.
2. Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Михайлова О. Л. и др. // ЖЭТФ. 1978. 75. 1683.
3. Fortov V. E., Ipkav R. I., Arinin V. A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. 99. 185001.
4. Мочалов М. А. Свойства инертных газов и дейтерия при ударном и квазиизэнтропическом сжатиях до давлений ~1500 ГПа: Дис. на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук. Саров, 2008. С. 222.
5. Павловский А. И., Кулешов Г. Д., Склизов Г. В. и др. // ДАН СССР. 1965. 160. 68.
6. Kuropatkin Yu. P. et al. In: 11th IEEE Pulsed Power Conference / Digest of technical papers, Ed. by G. Cooperstein, I. Vikovitsky. 1997. P. 1663.
7. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. 92. 336.
8. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. // ЖЭТФ. 2012.
9. Жерноклетов М. В., Аринин В. А., Бузин В. Н. 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. Вып. 2 / Под ред. Р. И. Ильяева и др. Саров, 2011. С. 178.
10. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Бурцев В. В. и др. // ЖЭТФ. 2009. 136. 615.
11. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И. и др. // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. Вып. 3. 11.
12. Евстигнеев А. А., Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н. // ФГВ. 1976. 12. 758.

13. Глушак Б. Л., Гударенко Л. Ф., Стяжкин Ю. М. // ВАНТ. Сер. Матем. моделирование физических процессов. 1991. Вып. 2. 57.
14. Глушак Б. Л., Игнатова О. Н. // Там же. 1998. Вып. 2. 45.
15. Копышев В. П., Хрусталеv В. В. // ПМТФ. 1980. № 1. 122.
16. Копышев В. П. // Там же. 1971. № 10. 1304.
17. Hoover W. G., Gray S. G., Johnson K. W. // J. Chem. Phys. 1971. 55. 1128.
18. Аринин В. А. Цифровая обработка сигналов, 2006, № 2; V. A. Arinin, V. I. Tkachenko, Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. 19. 63.
19. Golubkov A. N., Yukhimchuk A. A. High-Pressure Hydrogen Isotope Sources Based on Vanadium Hydride // Hyperfine Interactions. 2001. Vol. 138. P. 403.
20. Ternovoi V. Ya., Filimonov A. S., Pyalling A. A. et al. SCCM-2001 / Ed. by M. D. Furnish et al. AIP Press, New York. 2002. P. 107.
21. Nellis W. J., Holmes N. C., Mitchell A. C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1984. 53. 1248.
22. Урлин В. Д. Уравнения состояния и фазовые диаграммы изотопов водорода: Препринт. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
23. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Фортвов В. Е. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2012. 96. 172.