

УДК 533.2:546.12.027

# Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия при давлении ~5000 ГПа

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

*Приведены результаты измерения квазиизэнтропической сжимаемости плазмы гелия с использованием экспериментального устройства сферической геометрии и рентгенографического комплекса, состоящего из трех бетатронов и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений. В эксперименте получена плотность сжатого гелия  $\sim 8 \text{ г/см}^3$  при давлении порядка 5000 ГПа. Анализ данных показывает, что при измеренных параметрах гелий находится в однократно ионизованном состоянии.*

## 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 с помощью серии 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]. В работе [9] с использованием устройств цилиндрической геометрии в диапазоне 100–500 ГПа исследована квазиизэнтропическая сжимаемость гелия.

Измерение сжимаемости гелия и дейтерия представляет несомненный научный и практический интерес в плане описания различных высокоэнергетических состояний, широко распростра-

© Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96, № 3. С. 172–177.

\* Объединенный институт высоких температур РАН, Москва.

ненных 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 плотности квазиизэнтропически сжатого гелия в устройстве сферической геометрии при давлении порядка 5000 ГПа.

### 1. Постановка эксперимента

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Теневое изображение границ внутренней оболочки, сжимающей исследуемый газ, получено при одновременном использовании тормозного излучения трех мощных бетатронов 1 с граничной энергией электронов  $\approx 60$  МэВ [6], расположенных под углами  $45^\circ$  друг к другу в защитном сооружении 2. Особенностью рентгенографического комп-

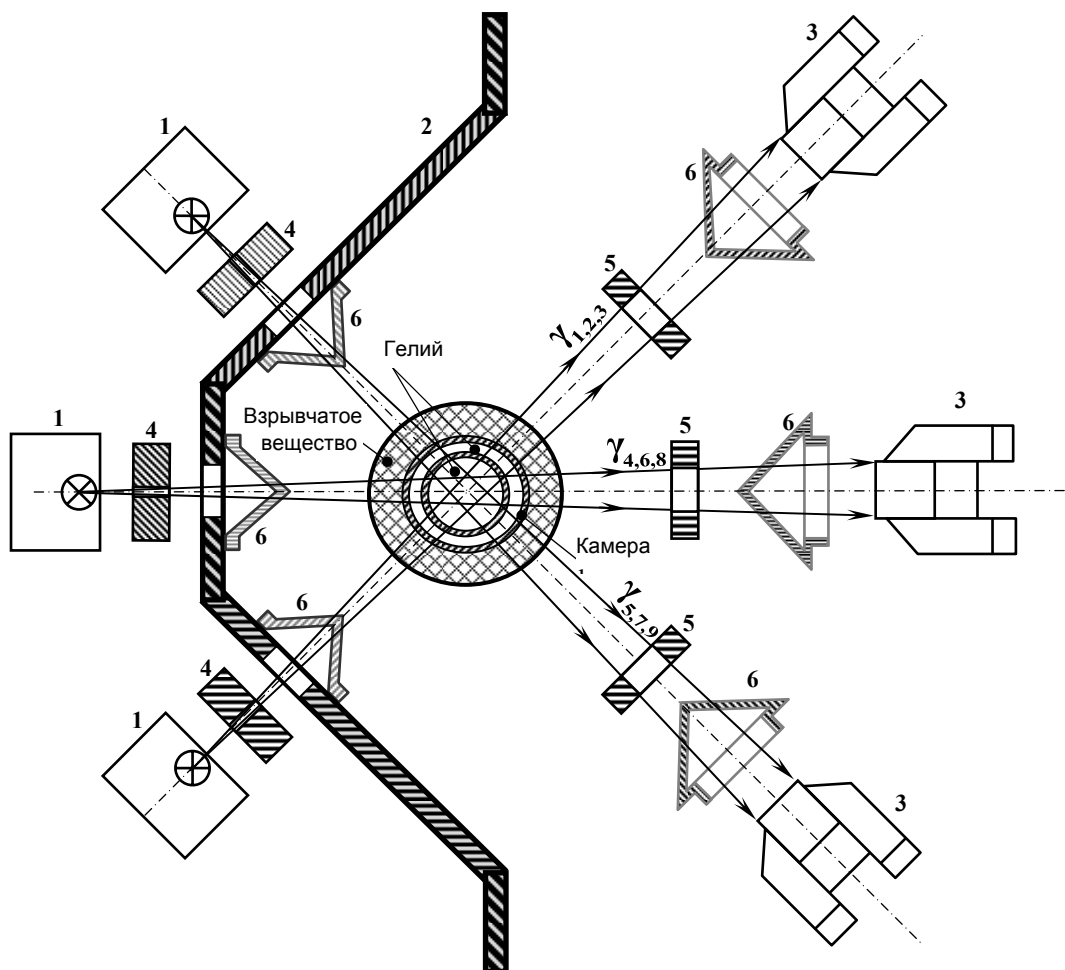


Рис. 1. Схема эксперимента на рентгенографическом комплексе ВНИИЭФ: 1 – бетатрон; 2 – защитное сооружение; 3 – регистратор; 4, 5 – коллиматор; 6 – защитный конус

лекса 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, NaI(Tl)  $\varnothing 150$  мм ( $\lambda_{\max} = 410$  мм, время высвечивания 250 нс) и силикат лютеция, LSO  $\varnothing 80$  мм ( $\lambda_{\max} = 420$  мм, время высвечивания 50 нс) [6]. 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 конусы 6.

Для достижения высокого давления в газе в настоящей работе, как и в [7, 8], использовалось двухкаскадное сферическое экспериментальное устройство. Внешняя прочная оболочка 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 выделяет область исследуемого газа для создания высокого сжатия и защищает ее от попадания металлической пыли с внешней оболочки [10].

Первоначально исследуемый газ в таких устройствах подвергается воздействию проходящей ударной волны (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. Многократная циркуляция УВ и плавное сжатие оболочкой переводят 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.

В данной работе обе оболочки сферического устройства были выполнены из стали 30ХГСА. Внешняя оболочка толщиной 7 мм имела наружный диаметр 203 мм. Внутренняя сфера толщиной 5 мм имела наружный диаметр 90 мм. Начальное давление газа в обеих полостях было одинаковым и составляло 273 атм при температуре 29 °С. При таких начальных условиях плотность газообразного гелия в исходном состоянии составляет  $\rho_0 = 0,038$  г/см<sup>3</sup>. Компоновка сферического устройства позволяет откачать обе полости камеры от примесей воздуха в лабораторных условиях. Для заполнения камеры гелием применен термокомпрессор, позволяющий заполнять газом чистотой 99,99 % объема  $\approx 2$  л до давлений  $\sim 500$  атм. Для разгона оболочек и сжатия газа в эксперименте использован блок ВВ с массой  $\sim 55$  кг в тротиловом эквиваленте.

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 вычислялась из выражения

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

где  $\rho_0$  – 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.

Ввиду трудностей прямого измерения давления в наших опытах давление в гелии определяли из газодинамических расчетов с учетом использования реальных термодинамических и прочностных свойств всех элементов экспериментальных устройств. Расчеты выполнялись по одномерной газодинамической программе [11], предназначенной для численного решения одномерных нестационарных газодинамических задач различной геометрии с учетом теплопроводности и упругопластических свойств среды. В результате были получены  $R-t$ -диаграммы движения границ оболочек сферического устройства и распределения давления и температуры в плазме гелия по радиусу полости на момент максимального сжатия. Продукты взрыва ВВ на основе гексогена описаны уравнением состояния из [12]. Для обеих оболочек из стали использовалось уравнение состояния железа [13]. Это однофазное уравнение состояния хорошо описывает ударную адиабату, но сглаживает  $\alpha$ - $\epsilon$  фазовый переход первого рода при  $P \sim 13$  ГПа. 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  $\sigma_{от} = -4$  ГПа.

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  $\varphi(r) = \epsilon(\sigma/r)^n$  [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.

## 2. Экспериментальные данные

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. Выбор энергетики заряда ВВ на стадии почти свободного полета оболочки, когда наличие газа в центральной полости еще кардинально не влияет на ее скорость, в некоторой степени исключает обратное влияние УРС 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.

Сравнение рассчитанных  $R-t$ -траекторий и экспериментальных данных для этого опыта приведено на рис. 2. 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 ( $m. 2$ ) и измеренный интервал времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ , так и размеры оболочки в остальные моменты сжатия. Это

и позволяет использовать результаты расчета для оценки давления сжатой плазмы гелия. Распределения давления и температуры по радиусу полости, полученные из газодинамического расчета на момент максимального сжатия гелия, приведены на рис. 3. Средневзвешенное давление по всей массе сжатого гелия в данном эксперименте составляет  $P_{\text{ВЗВ}} = 4750$  ГПа. При этом экспериментально измеренная величина  $\rho_{\text{экс}} = (8,4 \pm 1,9)$  г/см<sup>3</sup> согласуется с рассчитанным значением  $\rho_{\text{ср}} = 7,2$  г/см<sup>3</sup> в пределах 15 %.

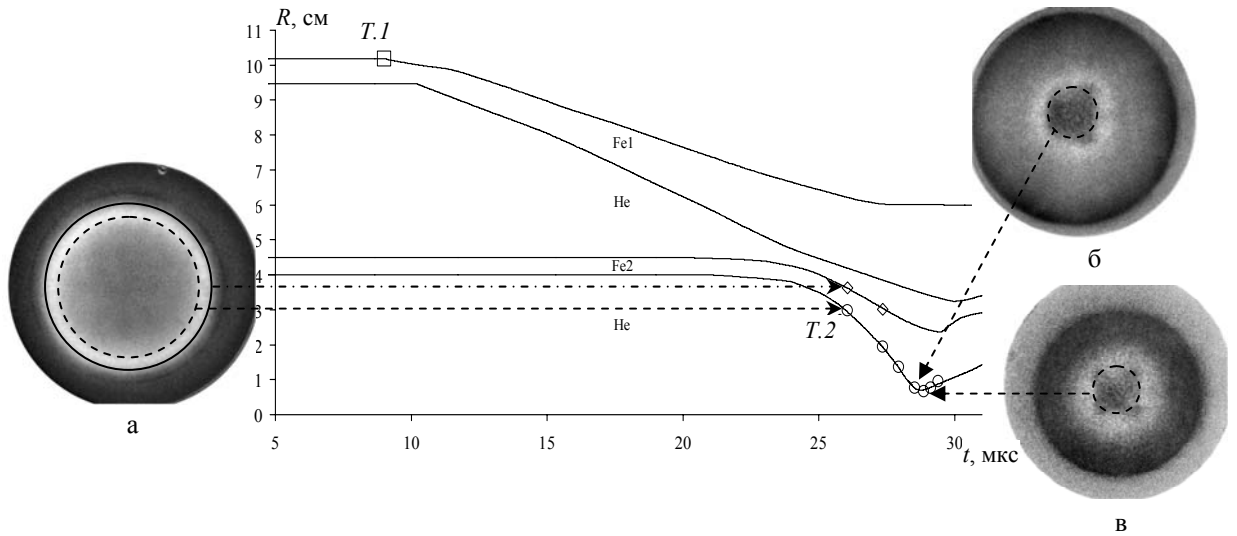


Рис. 2.  $R-t$ -диаграммы движения оболочек экспериментального устройства (времена отсчитываются от начала детонации заряда ВВ).  $\square$  – электроконтактные измерения движения УВ при газодинамическом исследовании устройства; результаты рентгенографирования:  $\diamond$  – внешняя граница второго каскада (Fe2);  $\circ$  – внутренняя граница второго каскада (Fe2). Изображения: а –  $t = 26,06$  мкс; б –  $t = 28,52$  мкс; в –  $t = 28,85$  мкс (момент максимального сжатия). Штриховыми линиями показаны границы оболочек, полученные в результате обработки рентгенограмм

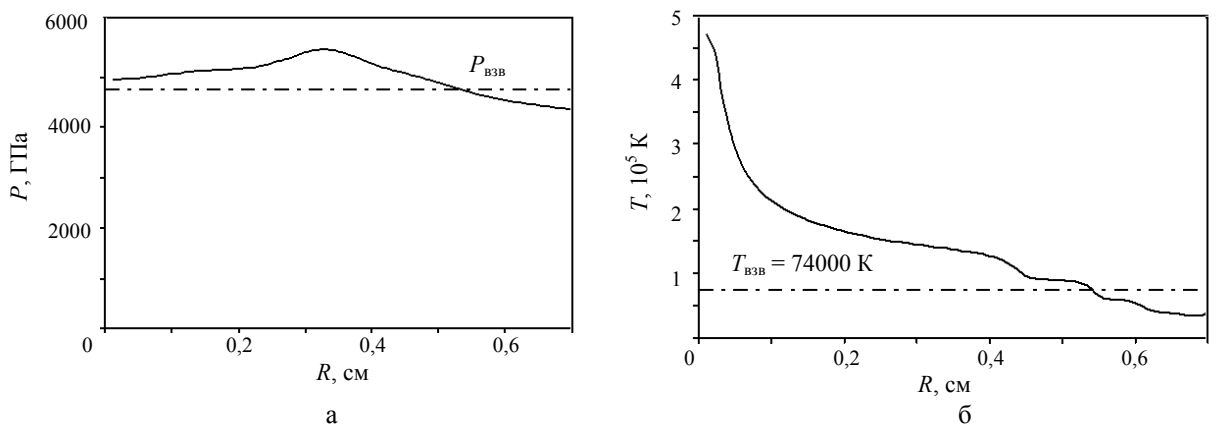


Рис. 3. Квазиэнтропическая сжимаемость газообразного гелия. Распределения давления (а) и температуры (б)

Внутренняя и внешняя границы второго каскада экспериментального устройства в настоящей работе были получены методом функциональной трассировки [18] (см. таблицу). В таблице приведены эквивалентные радиусы сфер ( $R_{min}$ ), объем которых равен объему условно осесимметричного объекта, полученного кубическим сплайнированием в полярных координатах по радиусам, определяемым по частичным срезам. Именно эта величина радиуса наиболее точно определяет объем полости, особенно, если полость отличается от сферической. Асимметричность оболочек (имеющая место в реальных экспериментах), как правило, связана с влиянием систем иницирования ВВ и качеством изготовления стальных полусфер (их разнотолщинностью и отклонением от сферичности). В силу специфики сферических экспериментов приведенные в таблице значения  $\delta R$  соответствуют доверительной вероятности 0,9 и характеризуют, скорее, асимметрию объектов, нежели погрешность измерений. Отметим, что используемая в экспериментах аппаратура позволяет уточнять полученные данные путем рентгенографирования газовой полости в момент «остановки» одновременно всеми бетатронами, составляющими диагностический комплекс.

Результаты трассировки газовой полости в экспериментах с He

$\tau_{рег}, \text{ мкс}$	26,06	27,34	27,94	28,52	28,85	29,12	29,39
$R, \text{ мм}$	29,84	19,38	13,66	7,65	6,61	7,59	9,53
$\sigma, \text{ мм}$	0,12	0,20	0,20	0,38	0,49	0,77	1,22

На рис. 4 представлены все имеющиеся на данный момент результаты исследований квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия. Как видно из рисунка, в настоящей работе получены данные, превосходящие в три раза предыдущее достижение ВНИИЭФ [8] и в десять раз результаты [9]. Полученные из газодинамического расчета данные по давлению и температуре в сжатом гелии в  $P$ - $T$ -координатах приведены на рис. 5, заимствованном из работы [19]. Заштрихованная область соответствует состояниям гелия, реализованным в экспериментах по многократному ударно-волновому сжатию из [20]. На том же рисунке приведены данные [21] и результаты ударно-волновых экспериментов с устройством полусферической геометрии в газообразном гелии с начальной плотностью  $\rho_0 = 0,125 \text{ г/см}^3$ , близкой к плотности жидкости [4], а также данные [8]. Как видно из рис. 5, в настоящей работе достигнуто состояние сжатого гелия в области состояния однократной ионизации.

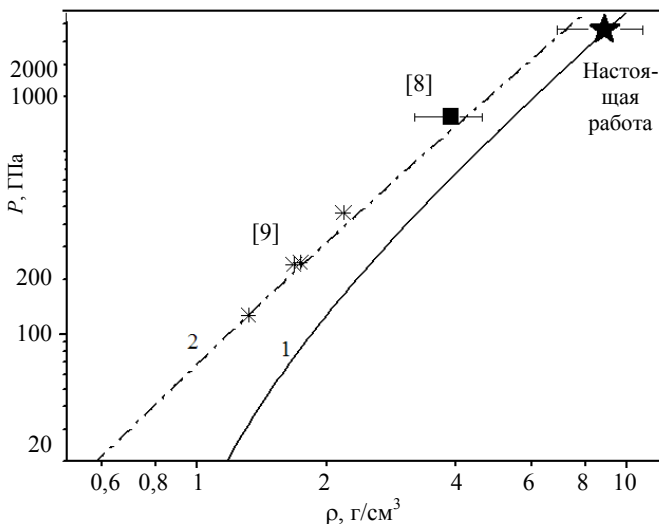


Рис. 4. Квазиизэнтропическая сжимаемость гелия до давлений  $P \sim 5000$  ГПа. Кривые – расчет из [9] ( $\rho_0 = 0,019 \text{ г/см}^3$ ): 1 – «холодная» адиабата ( $T = 0 \text{ К}$ ); 2 – изэнтропа ( $S = \text{const}$ ). Значки – эксперимент

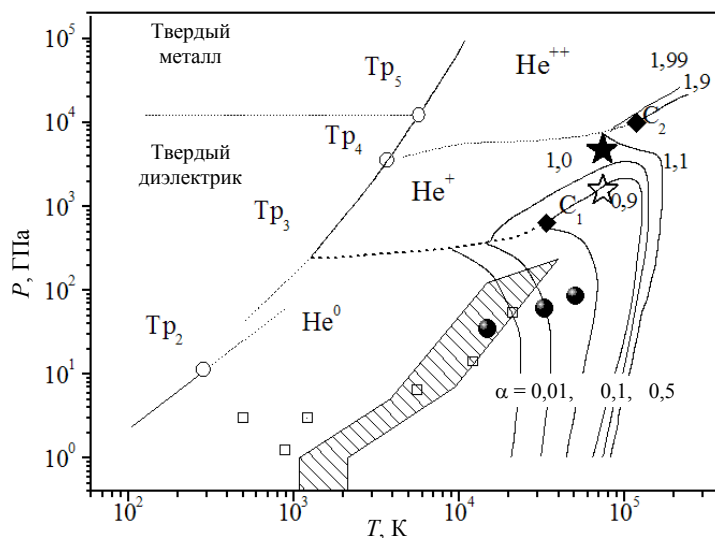


Рис. 5. Фазовая диаграмма гелия. Эксперимент: ★ – настоящая работа, ☆ – [8], ⊙ – ударно-волновое сжатие [22], □ – данные [11]. Расчет [19]: ○ – тройная точка, ◆ – критическая точка, α – степень ионизации

В новой конструкции экспериментального устройства, использованной в настоящей работе, увеличено расстояние между оболочками. Это позволило устранить их соударение в процессе сжатия (см. рис. 2) и реализовать более «мягкое» изэнтропическое сжатие гелия, по сравнению со сжатием в устройстве [8]. Как видно из рис. 5, достигнутая температура сжатого гелия (~75000 К) оказалась практически неизменной при существенно более высоком, чем в [8], давлении сжатого газа.

Проведенный в рамках модели SANA-D [22] расчет параметров плотной плазмы, достигнутых при квазиизэнтропическом сжатии гелия, показывает, что при давлении и плотности, зафиксированных в эксперименте, кулоновский параметр неидеальности  $\Gamma_D$  достигает величины ~20, параметр вырождения электронов  $n\lambda_e^3 \approx 20$ , степень ионизации ~0,5, а плотность электронов составляет  $5 \cdot 10^{23}$  г/см<sup>3</sup>.

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Хрусталеву за предоставленную возможность использования в расчетах разработанного им УРС гелия, за полезные обсуждения и замечания по существу выполненной работы, В. К. Грязнову за расчет параметров плотной плазмы гелия, а также сотрудникам, принимавшим участие в организации, проведении экспериментов и обработке полученных данных: А. В. Белову, Р. В. Борисову, О. А. Есину, Ю. В. Ледневу, В. Д. Орлову, А. В. Романову, С. Ю. Согрину, Б. И. Ткаченко, Д. П. Турутину.

### Список литературы

1. Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Михайлова О. Л. и др. // Экспериментальное определение сжимаемости водорода при плотностях 0,5–2 г/см<sup>3</sup> // Письма в ЖЭТФ. 1972. № 16. С. 286.
2. Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Михайлова О. Л. и др. Уравнение состояния молекулярного водорода. Фазовый переход в металлическое состояние // ЖЭТФ. 1978. № 75. С. 1683.

3. Fortov V. E., Ilkaev R. I., Arinin V. A. et al. Phase Transition in Strongly Non-ideal Deuterium Plasma, Generated by Quasiisentropical Compression at Megabars // *Phys. Rev. Lett.* 2007. N 99. P. 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., Склизков Г. В. и др. Сильноточные безжелезные бетатроны // *ДАН СССР.* 1965. № 160. С. 68.
6. Kuropatkin Yu. P. et al. Characteristics oh the installation for flash radiography based on the uncored betatron ВІМ-М // *Proc. of the 11-th IEEE Pulsed Power Conference.* 1997. P. 1663.
7. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортвов В. Е. и др. Измерение сжимаемости дейтериевой плазмы при давлении 1800 ГПа // *Письма в ЖЭТФ.* 2010. № 92. С. 336.
8. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортвов В. Е. и др. Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия и дейтерия при давлениях 1500–2000 ГПа // *ЖЭТФ.* 2012. № 142. С. 696.
9. Жерноклетов М. В., Аринин В. А., Бузин В. Н. 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии / Под ред. Р. И. Ильяева и др. Саров, 2011. Вып. 2. С. 178.
10. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Бурцев В. В. и др. Регистрация выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов теньвым способом // *ЖЭТФ.* 2009. № 136. С. 9.
11. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // *ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики.* 1982. Вып. 3. С. 11.
12. Евстигнеев А. А., Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н. Изэнтропическое расширение и уравнение состояния продуктов взрыва тротила // *ФГВ.* 1976. № 12. С. 758.
13. Глушак Б. Л., Гударенко Л. Ф., Стяжкин Ю. М. Полуэмпирическое уравнение состояния металлов с переменной теплоемкостью ядер и электронов // *ВАНТ. Сер. Матем. моделирование физических процессов.* 1991. Вып. 2. С. 57.
14. Глушак Б. Л., Игнатова О. Н. Упругопластическая модель динамического деформирования U-238 и его сплава с Мо // *Там же.* 1998. Вып. 2. С. 45.
15. Копышев В. П., Хрусталеv В. В. Уравнение состояния водорода до 10 Мбар // *ПМТФ.* 1980, № 21. С. 122.
16. Копышев В. П. Термодинамическая модель плотной жидкости // *Там же.* 1971. № 12. С. 119.
17. Hoover W. G., Gray S. G., Johnson K. W. Thermodynamic Properties of the Fluid and Solid Phases for Inverse Power Potentials // *J. Chem. Phys.* 1971. N 55. P. 1128.
18. Аринин В. А. Функциональный метод трассировки границ раздела двух сред, имеющих цилиндрическую геометрию // *Цифровая обработка сигналов.* 2006. 8(№ 2). С. 52.



19. Ebeling W., Foster A., Fortov V. et al. Thermophysical Properties of Hot Dense Plasma, Teubner, Stuttgart-Leipzig, 1991.
20. Ternovoi V. Ya., Filimonov A. S., Pyalling A. A. et al. Thermodynamic Properties of Helium Under Multiple Shock Compression // SCCM-2001 / Ed. By M. D. Furnish et al. New York: AIP Press, 2002. P. 107.
21. Nellis W. J., Holmes N. C., Mitchell A. C. et al. Shock Compression of Liquid Helium to 56 GPa (560 kbar) // Phys. Rev. Lett. 1984. N 53. P. 1248.
22. Gryaznov V. K., Iosilevskiy I. L., Fortov V. E. Equation of State of Shock Compressed Gases at Megabar Pressure Range // Shock Compression of Condensed Matter-2011/ Ed. By M. L. Elert et al. Part 1. Melville, New York, 2012.

## Measurement of Quasi-Isentropic Compressibility of Helium at the Pressure ~5000 GPa

M. A. Mochalov, R. I. Il'kaev, V. E. Fortov, A. L. Mikhailov, V. A. Arinin,  
A. O. Blikov, A. Yu. Baurin, V. A. Komrakov, V. A. Ogorodnikov, A. V. Ryzhkov,  
A. A. Yukhimchuk

*Given the results of measuring the quasi-isentropic compressibility of helium plasma by means of experimental device of spherical geometry and X-Ray radiographic complex consisting of three betatrons and multichannel optoelectronic registration system of X-Ray images. The density of compressed helium  $\sim 8 \text{ g/cm}^3$  at the pressure  $\sim 5000 \text{ GPa}$  has been measured in the experiment. The data analysis shows that at the measured parameters helium can be found in a single-ionized state of matter.*