

# Измерение квазизэнтропической сжимаемости гелия при давлении $\sim 5000$ ГПа

*М. А. Мочалов<sup>1)</sup>, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов<sup>+</sup>, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, А. Ю. Баурин,  
В. А. Комраков, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, А. А. Юхимчук*

*Российский федеральный ядерный центр,  
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики,  
607188 Саров, Россия*

*<sup>+</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 21 июня 2012 г.

Приведены результаты измерения квазизэнтропической 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  $\sim 8 \text{ г}/\text{см}^3$  при давлении порядка 5000 ГПа. Анализ данных показывает, что при измеренных параметрах гелий находится в однократно ионизованном состоянии.

**Введение.** Метод измерения квазизэнтропического сжатия с целью изучения параметров уравнений состояния (УРС) веществ с использованием конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) в устройствах сферической и цилиндрической геометрии используется во ВНИИЭФ с 70-х годов 20 века [1–4]. Сжатие в таких устройствах осуществляется с помощью серии ударных волн, циркулирующих в объеме газа, и сходящейся к центру устройства стальной оболочки, 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 квазизэнтропического сжатия газообразных гелия идейтерия до плотности  $\sim 4 \text{ г}/\text{см}^3$  при давлении  $P \approx 2000$  ГПа [7, 8]. В работе [9] с использованием устройств цилиндрической геометрии в диапазоне 100–500 ГПа исследована квазизэнтропическая сжимаемость гелия.

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

роде. 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 квазизэнтропически 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 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 задачу воспроизведимости 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,  $\text{NaI}(\text{Tl}) \varnothing 150 \text{ мм}$  ( $\lambda_{\max} = 410 \text{ нм}$ , время высыпчивания 250 нс), и си-

<sup>1)</sup> e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

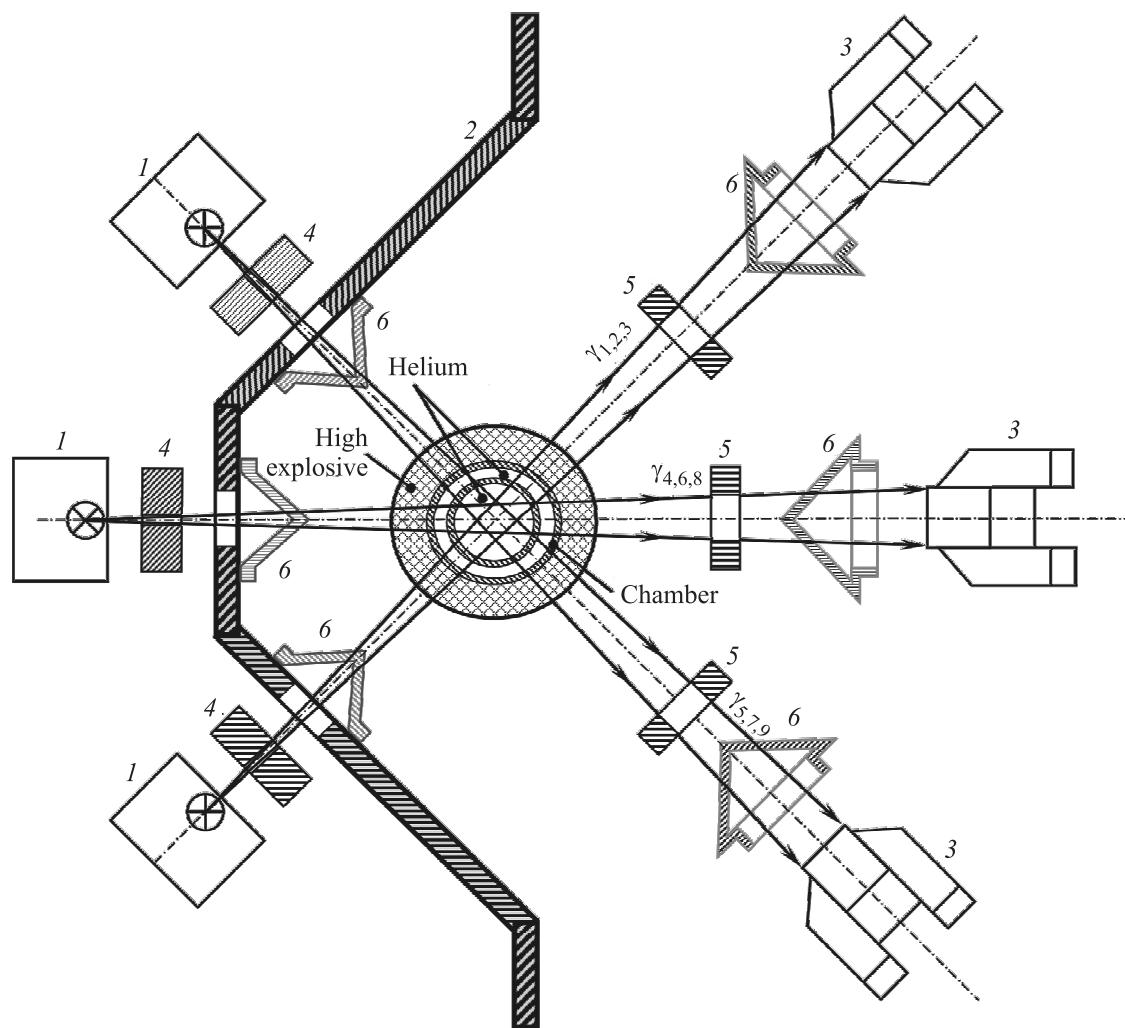


Рис. 1. Схема эксперимента на рентгенографическом комплексе ВНИИЭФ: 1 – бетатрон; 2 – защитное сооружение; 3 – регистратор; 4, 5 – коллиматор; 6 – защитный конус

ликат лютения, 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 соз-

дания высокого сжатия и защищает ее от попадания металлической пыли с внешней оболочки [10].

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 оболочки через смягчающий слой исследуемого газа, находящегося между оболочками. Многократная циркуляция УВ и плавное сжатие оболочкой переводят ударно-волновое сжатие газа в квазизэнтропическое при существенном снижении доли теплового давления и более длительном удержании газа при высоком давлении по сравнению с нагрузением 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  $\rho_0 = 0.038 \text{ г/см}^3$ . Компоновка сферического устройства позволяет откачивать обе полости камеры от примесей воздуха в лабораторных условиях. Для заполнения камеры гелием применен термокомпрессор, позволяющий заполнять газом чистотой 99.99% объемы  $\approx 2 \text{ л}$  до давлений  $\sim 500 \text{ атм}$ . Для разгона оболочек и сжатия газа в эксперименте использован блок ВВ с массой  $\sim 55 \text{ кг}$  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

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

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 реальных термодинамических и прочностных свойств всех элементов экспериментальных устройств. Расчеты выполнялись по одномерной газодинамической программе [11], предназначеннной 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. Продук-

ты 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  $\alpha-\varepsilon$  фазовый переход первого рода при  $P \sim 13 \text{ ГПа}$ . Упругопластические свойства стали для внешнего каскада не учитывались (использовалось гидродинамическое приближение). Для внутренней оболочки влияние упругопластических свойств учитывалось по модели динамического деформирования [14] со специальными подобранными для стали коэффициентами. Разрушение стали для обеих оболочек описывалось моделью “хрупкого” откола с параметром  $\sigma_{\text{от}} = -4 \text{ ГПа}$ .

#### Результаты трассировки газовой полости в экспериментах с Не

$t_{\text{перг}}$ , мкс	26.06	27.34	27.94	28.52	28.85	29.12	29.39
$R$ , мм	29.84	19.38	13.66	7.65	6.61	7.59	9.53
$\sigma$ , мм	0.12	0.20	0.20	0.38	0.49	0.77	1.22

Для гелия уравнение состояния в табличной форме было 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  $\varphi(r) = \varepsilon(\sigma/r)^n$  [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 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.

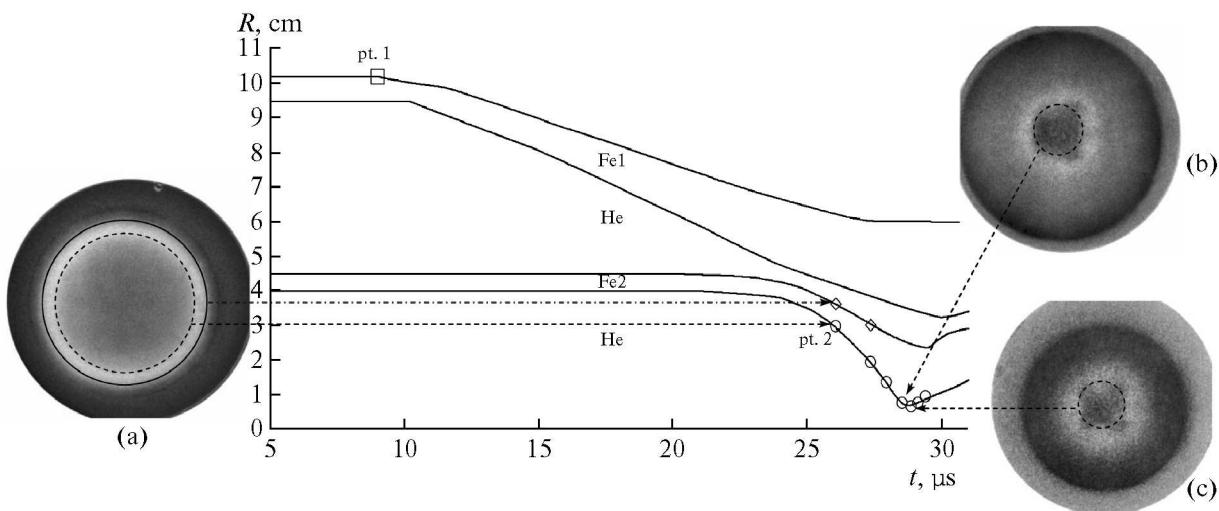


Рис. 2.  $R-t$ -диаграммы движения оболочек экспериментального устройства (времена отсчитываются от начала детонации заряда ВВ).  $\square$  – электроконтактные измерения движения УВ при газодинамическом исследовании устройства. Результаты рентгенографирования:  $\diamond$  – внешняя граница второго каскада (Fe2);  $\circ$  – внутренняя граница второго каскада (Fe2). Изображения: (a) –  $t = 26.06$  мкс; (b) –  $t = 28.52$  мкс; (c) –  $t = 28.85$  мкс (момент максимального сжатия). Штриховыми линиями показаны границы оболочек, полученные в результате обработки рентгенограмм

Большую часть времени 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 ( $t_{11}$ ), время  $t_2$  первого рентгенографирования ( $t_{12}$ ) и измеренный интервал времени  $\Delta t = t_{12} - t_{11}$ , 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 скатого гелия в данном эксперименте составляет  $P_{\text{взвеш}} = 4750$  ГПа. При этом экспериментально измеренная величина  $\rho_{\text{эк}} = (8.4 \pm 1.9)$  г/см<sup>3</sup> согласуется с рассчитанным значением  $\rho_{\text{сред}} = 7.2$  г/см<sup>3</sup> в пределах 15%.

Внутренняя и внешняя границы второго каскада экспериментального устройства в настоящей работе были получены методом функциональной трассировки [18] (таблица). В таблице приведены эквивалент-

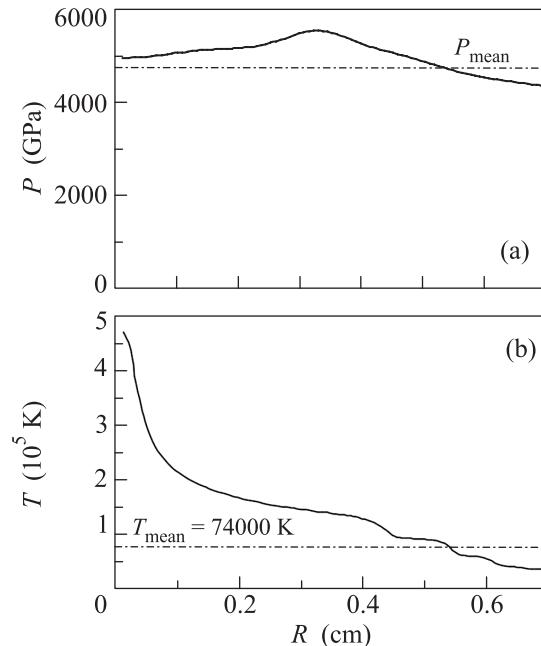


Рис. 3. Квазизэнтропическая сжимаемость газообразного гелия. Распределения давления (а) и температуры (б)

ные радиусы  $R_{\min}$  сфер, 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 инициирования 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.

На рис. 4 представлены все имеющиеся на данный момент результаты исследований квазизэнтропической сжимаемости газообраз-

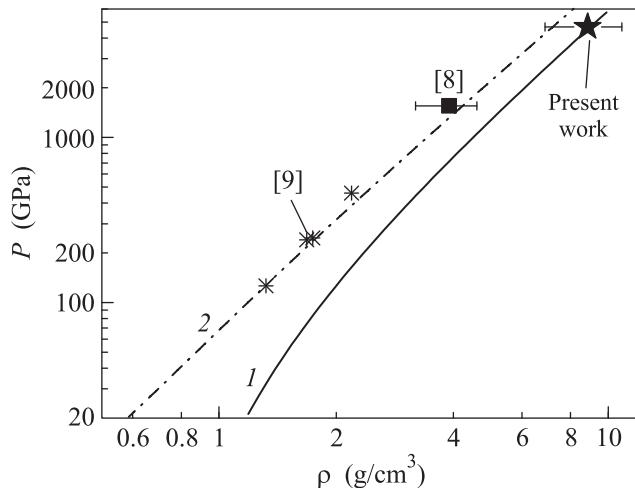


Рис. 4. Квазизэнтропическая сжимаемость гелия до давлений  $P \sim 5000$  ГПа. Кривые – расчет из [9] ( $\rho_0 = 0.019$  г/см<sup>3</sup>): 1 – "холодная" адиабата ( $T = 0$  К); 2 – изэнтропа ( $S = \text{const}$ ). Значки – эксперимент

ного гелия. Как видно из рисунка, в настоящей работе получены результаты, 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

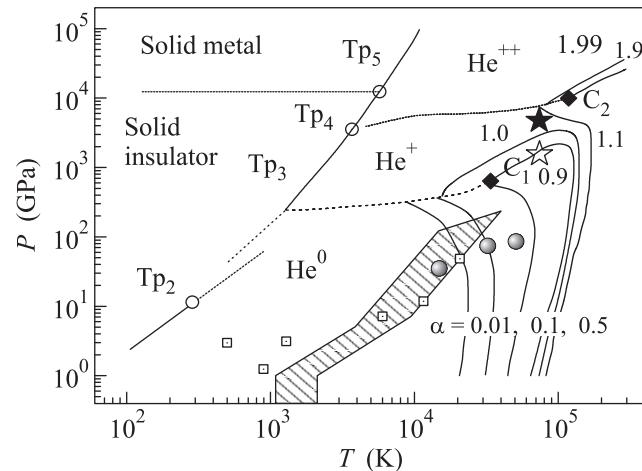


Рис. 5. Фазовая диаграмма гелия. Эксперимент: ★ – настоящая работа, \* – [8], ⊙ – ударно-волновое сжатие [22], □ – [11]. Расчет [19]: ○ – тройная точка, ◆ – критическая точка,  $\alpha$  – степень ионизации

с начальной плотностью  $\rho_0 = 0.125$  г/см<sup>3</sup>, 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.

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 SAHA-D [22] расчет параметров плотной плазмы, достигнутых при квазизэнтропическом 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.

1. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова и др., Письма в ЖЭТФ **16**, 286 (1972).
2. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова и др., ЖЭТФ **75**, 1683 (1978).
3. V. E. Fortov, R. I. Ilkaev, V. A. Arinin et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 185001 (2007).
4. М. А. Мочалов, *Свойства инертных газов и дейтерия при ударном и квазизэнтропическом сжатии до давлений  $\sim 1500$  ГПа*, диссертация на соискание научной степени д-ра физ.-мат. наук, Саров, 2008, с. 222.
5. А. И. Павловский, Г. Д. Кулешов, Г. В. Склизков и др., ДАН СССР **160**, 68 (1965).
6. Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov et al., in *11th IEEE Pulsed Power Conference/ Digest of technical papers* (eds. by G. Cooperstein and I. Vikovitsky), 1997, p. 1663.
7. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Письма в ЖЭТФ **92**, 336 (2010).
8. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., ЖЭТФ (2012) (в печати).
9. М. В. Жерноклетов, В. А. Аринин, В. Н. Бузин, *65 лет ВНИИЭФ, Физика и техника высоких плотностей энергии*, вып. 2 (под ред. Р. И. Илькаева и др.), Саров, 2011, с. 178.
10. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. В. Бурцев и др., ЖЭТФ **136**, 615 (2009).
11. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин и др., ВАНТ, сер.: Методики и программы численного решения задач математической физики **3**, 11 (1982).
12. А. А. Евстигнеев, М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев, ФГВ **12**, 758 (1976).
13. Б. Л. Глушак, Л. Ф. Гударенко, Ю. М. Стяжкин, ВАНТ, сер.: Матем. моделирование физических процессов **2**, 57 (1991).
14. Б. Л. Глушак, О. Н. Игнатова, ВАНТ, сер.: Матем. моделирование физических процессов **2**, 45 (1998).
15. В. П. Копышев, В. В. Хрусталев, ПМТФ **1**, 122 (1980).
16. В. П. Копышев, ПМТФ **10**, 1304 (1971).
17. W. G. Hoover, S. G. Gray, and K. W. Johnson, J. Chem. Phys. **55**, 1128 (1971).
18. В. А. Аринин, Цифровая обработка сигналов **2**, 52 (2006); V. A. Arinin and B. I. Tkachenko, Pattern Recognition and Image Analysis **19**, 63 (2009).
19. W. Ebeling, A. Foster, V. Fortov et al., *Thermophysical Properties of Hot Dense Plasma*, Teubner, Stuttgart-Leipzig, 1991.
20. V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, A. A. Pyalling et al., SCCM-2001 (eds. by M. D. Furnish et al.), AIP Press, N.Y., 2002, p. 107.
21. W. J. Nellis, N. C. Holmes, A. C. Mitchell et al., Phys. Rev. Lett. **53**, 1248 (1984).
22. V. K. Gryaznov, I. L. Iosilevskiy, and V. E. Fortov, *Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter*, in SCCM-2011 (in press).