Письма в ЖЭТФ, том 101, вып. 8, с. 575 – 582 © 2015 г. 25 апреля

Термодинамические свойства неидеальной плазмы гелия при квазиизэнтропическом сжатии в 575 раз давлением 3000 ГПа

М. А. Мочалов[1)], *Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов*[+], *А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, В. А. Комраков, А. В. Рыжков, В. А. Огородников, А. А. Юхимчук*

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

[+]*Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 26 февраля 2015 г.

Измерена квазиизэнтропическая сжимаемость неидеальной плазмы гелия с использованием двухкаскадной сферической камеры с разделенными полостями и заряда взрывчатого вещества с массой ≈ 55 кг. Эксперимент выполнен на рентгенографическом комплексе, состоящем из трех бетатронов и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений. При начальных давлениях газа во внешней и внутренней полостях $P_1 = 36.4$ МПа и $P_2 = 5.1$ МПа соответственно измерена плотность сжатой плазмы гелия $\rho = 4.6$ г/см^3, что соответствует степени сжатия $\sigma = 575$ при давлении $P \approx 3000$ ГПа в условиях сильной неидеальности ($\Gamma \sim 7$) и заметного вырождения электронов ($n\lambda^3 \sim 5$). Давление сжатого гелия определено по результатам газодинамического расчета.

DOI: 10.7868/S0370274X15080032

Введение. Являясь самым распространенным после водорода химическим элементом во Вселенной, гелий привлекает повышенное внимание исследователей самых разных специальностей. Особый интерес представляют физические свойства плазмы гелия в мегабарном и ультрамегабарном диапазоне давлений, соответствующем внутренним частям планет-гигантов Солнечной системы, а также активно изучаемым экзопланетам [1–3]. Речь идет о термодинамических, транспортных и оптических свойствах сильносжатой плазмы гелия, в которой реализуется широкий спектр межчастичных взаимодействий с эффектами вырождения, что крайне затрудняет теоретический анализ такой сильнонеидеальной среды.

Для экспериментального изучения сильнонеидеальной плазмы мегабарного диапазона давлений в последнее время значительное распространение получила техника мощных ударных волн, для генерации которых применяются лазеры и химические взрывчатые вещества (ВВ) (см. [1–3] и содержащиеся там ссылки). В последнем случае, используя эффекты геометрической кумуляции в устройствах цилиндрической и сферической геометрии, в лабораторных условиях удалось исследовать сжимаемость плазмы водорода, дейтерия, гелия и благородных газов при давлениях в десятки миллионов атмосфер [4–17].

В настоящей работе приведены экспериментальные результаты по изучению сжимаемости сильнонеидеальной плазмы гелия, полученной в двухкаскадной сферической камере с разделенными полостями, что позволило создавать различное начальное давление газа в обеих полостях. В итоге при давлении 3000 ГПа была достигнута рекордно высокая степень сжатия плазмы гелия, $\sigma = 575$, при начальных давлениях газа во внешней и внутренней полостях двухкаскадной сферической конструкции $P_{01} = 36.4$ МПа и $P_{02} = 5.1$ МПа соответственно. Выбранные соотношения начальных давлений гелия позволили обеспечить размер сжатой полости, доступный для его регистрации на имеющемся рентгенографическом оборудовании, и реализовать высокую степень сжатия плазмы. Кроме того, высокое начальное давление гелия во внешнем каскаде устройства ($P_{01} = 36.4$ МПа) способствует снижению возмущений от системы инициирования ВВ, что повышает качество рентгенограмм.

Схема опыта. Результаты экспериментов и расчетов. Схематическая конструкция экспериментальной двухкаскадной камеры с разделенными полостями приведена на рис. 1. Обе оболочки изготовлены из конструкционной стали ЭИ712. Внешняя оболочка Fe1 имеет диаметр ⊘ 200 мм и толщину стенки $\Delta = 8$ мм. Внутренняя оболочка Fe2 имеет диаметр ⊘ 150 мм и толщину стенки $\Delta = 6$ мм. Для уменьшения возмущений система подачи газов вы-

[1)]e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Таблица 1

Параметры экспериментального устройства

Оболочки (сталь ЭИ712)		Давление газа, МПа		Температура, °C	Плотность газа, г/см^3	
Fe1	Fe2	P_{01}	P_{02}	$T_{01} = T_{02}$	ρ_{01}	ρ_{02}
⌀200 мм, $\Delta = 8$ мм	⌀150 мм, $\Delta = 6$ мм	36.4	5.1	28.5	0.05	0.008

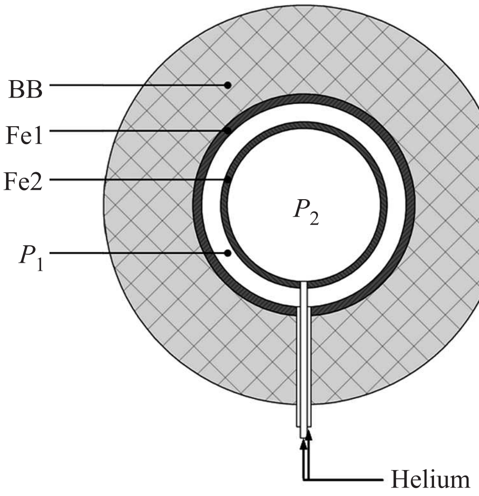

Рис. 1. Экспериментальное двухкаскадное сферическое устройство с разделенными полостями

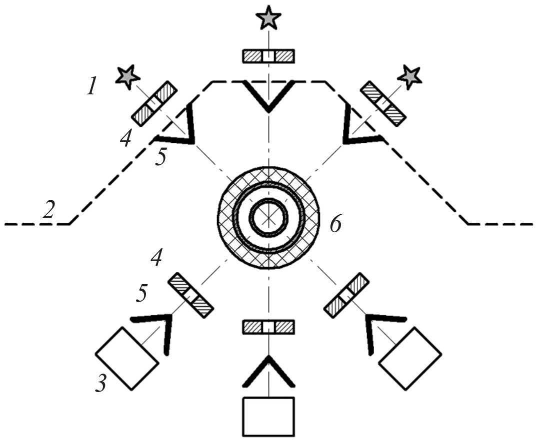

Рис. 2. Схема эксперимента: *1* – рентгеновские источники, *2* – защитное устройство, *3* – регистраторы рентгеновских изображений, *4* – коллиматоры (Pb), *5* – защитные конусы (Al), *6* – экспериментальное устройство

полнена коаксиальным способом. Диаметр внутренней трубки составляет 1 мм, внешней – 4 мм. Соединение внутренней камеры с трубкой подачи газа выполнено лазерной сваркой. При изготовлении сферических оболочек использовалась электронно-лучевая сварка. При испытании на прочность внешняя сфера выдержала давление газа $P_0 = 60$ МПа (600 ат). Деформация оболочки происходила в упругой области. Параметры экспериментального устройства приведены в табл. 1.

Схема эксперимента приведена на рис. 2. Для регистрации фаз движения оболочки, сжимающей исходно газообразный гелий, одновременно использовались 3 мощных бетатрона *1*, способные просвечивать свинец толщиной ≈ 220 мм на расстоянии 1 м от мишени [17]. Рентгеновские установки располагались под углом 45° друг к другу в защитном сооружении *2*. Для устранения паразитного рассеянного излучения применялись свинцовые коллиматоры *3*. При регистрации фаз движения оболочек для каждого бетатрона использовалась индивидуальная оптико-электронная система регистрации *4* с динамическим диапазоном $\sim 10^3$, защищенная от воздушной ударной волны, продуктов детонации и высоко-

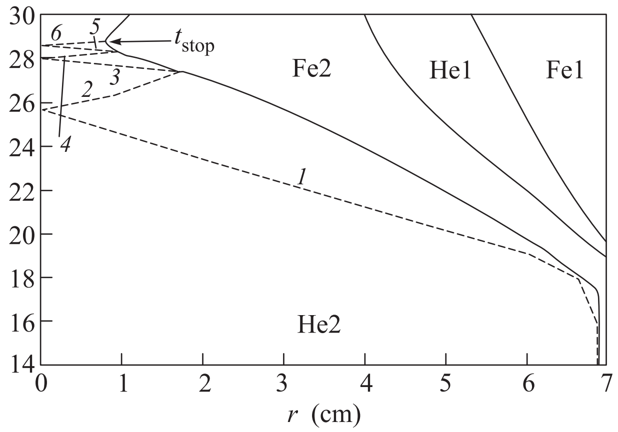

Рис. 3. $R(t)$ – диаграмма движения ударных волн и оболочек в сферическом устройстве из настоящей работы: *1* – первая ударная волна, *2-6* – отраженные ударные волны, Fe1 и Fe2 – оболочки первого и второго каскада соответственно, He1 и He2 – газообразный гелий в полости первого и второго каскадов, $t_{\rm stop}$ – время “остановки” внутренней границы оболочки Fe2. Здесь и далее времена отсчитываются от момента подрыва ВВ

скоростных осколков алюминиевым конусом *5*. Для сжатия газа служил заряд ВВ *6* на основе гексогена

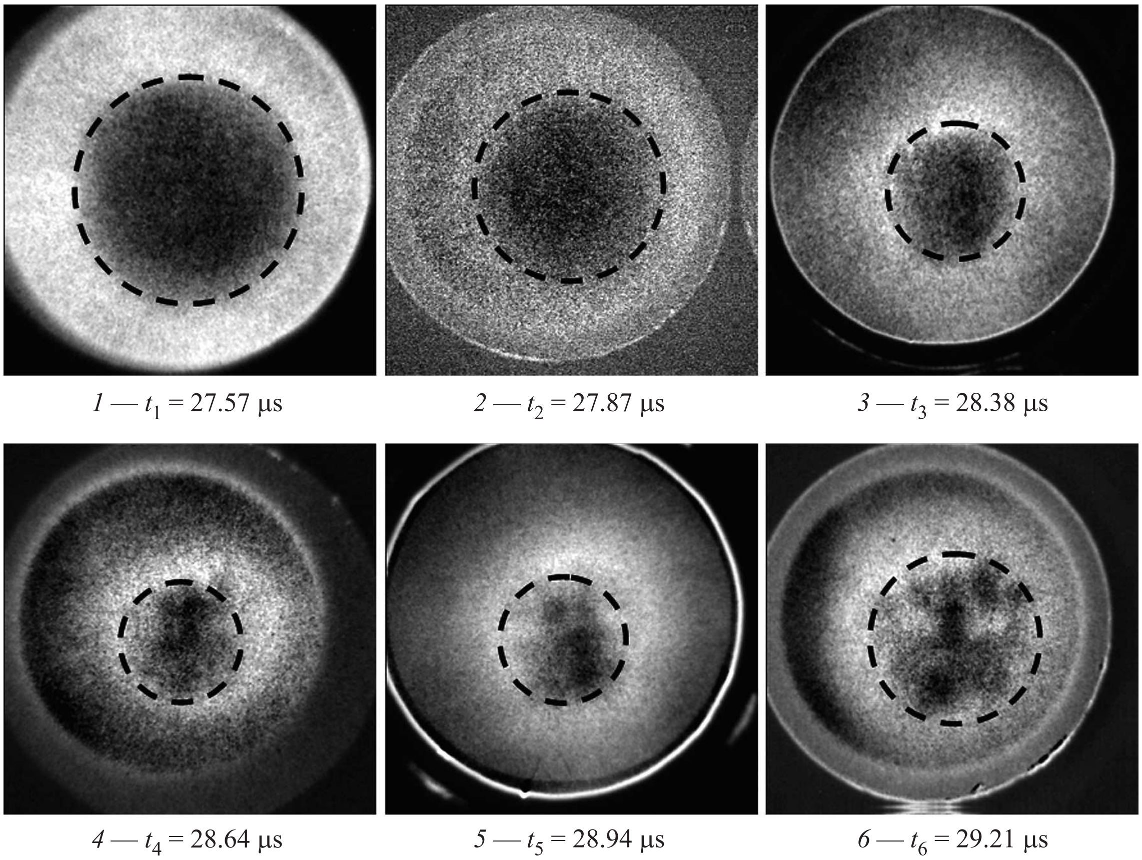

Рис. 4. Рентгеновские изображения внутренней полости с гелием в зависимости от времени сжатия. Штриховыми линиями показаны результаты обработки изображений методом функциональной трассировки [19]

с массой ≈ 55 кг в тротиловом эквиваленте. Заполнение камер гелием производилось от термокомпрессора, способного заполнять газом чистотой 99.99 % объемы ≈ 2 л до давлений ~ 50 МПа (500 ат).

Процесс заполнения газом полостей сферического устройства контролировался в реальном времени. Температура газа регистрировалась термопарой, расположенной на корпусе внешней оболочки. В момент подрыва экспериментального устройства начальные параметры гелия составляли: давление во внешней камере $P_{01} = 36.4$ МПа, во внутренней – $P_{02} = 5.1$ МПа; температура газа $T_0 = 28.5\,^\circ$C. При таких начальных условиях плотность гелия в исходном состоянии : во внутренней камере $\rho_{02} = 0.008$ г/см^3, а во внешней – $\rho_{02} = 0.05$ г/см^3. Для определения начальной плотности гелия использовались табличные данные [18].

Из результатов газодинамического расчета, приведенных на рис. 3, следует, что сжатие гелия He2 во внутренней полости в использованной конструкции происходит серией из шести ударных волн и сходящейся к оси стальной оболочкой Fe2, ускоряемой под действием продуктов взрыва заряда ВВ через оболочку Fe1 и внешний слой гелия He1. Этот процесс получил название квазиизэнтропического, т.к. после прохождения первой ударной волны дальнейшее сжатие газа происходит практически без его существенного нагрева.

Рентгеновские изображения внутренней сферической камеры, зарегистрированные в эксперименте, показаны на рис. 4. В результате функциональной обработки методом [19] этих изображений, в момент "остановки" внутренней границы оболочки второго каскада (кадр # 4, $t_4 = 28.64$ мкс) определен радиус полости $R_{\min} = 0.83 \pm 0.05$ см и вычислена средняя плотность сжатого газа $\rho_{ex} = \sigma \cdot \rho_0 = 4.6 \pm 0.8$ г/см^3. Здесь $\sigma = (R_0/R_{\min})^3 = 575$, где $R_0 = 6.9$ см – начальный радиус внутренней границы сферической оболочки, $\rho_0 = 0.008$ г/см^3 – начальная плотность гелия во внутреннем каскаде устройства.

Давление плазмы гелия определялось из газодинамического расчета с учетом всех элементов экспериментального устройства. В расчетах использовалось уравнение состояния (УРС) гелия в табличной форме, разработанное В.В. Хрусталевым на основе модифицированной модели сжимаемого коволюма [7, 20], в которой учитывались результаты расчетов термодинамических свойств жидкости, выполненных методом Монте-Карло, с обратным степенным потенциалом взаимодействия между частицами $\varphi(r) = \varepsilon(\sigma/r)^n$ [21]. Расчет экспериментального устройства проведился по одномерной газодинамической программе [22]. Из него были получены $R(t)$-диаграммы движения границ оболочек, а также распределения давления, плотности и температуры по радиусу полости на момент максимального сжатия газа. Сравнение рассчитанной $R(t)$-траектории и экспериментальных данных приведено на рис. 5. Как видно из рисунка, они хорошо согласуются, что

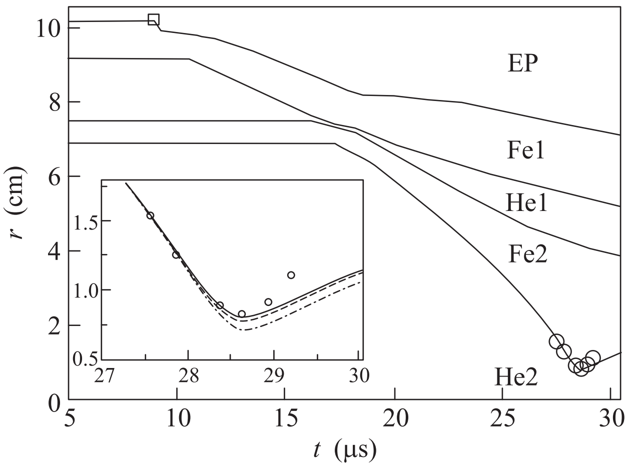

Рис. 5. $R(t)$-диаграмма работы экспериментального устройства в опыте по сжатию гелия: □ – электроконтактное измерение движения УВ при газодинамическом исследовании устройства; ○ – результаты рентгенографирования; ЕР – продукты взрыва. На вставке – расчеты: сплошная линия – УРС ВНИИЭФ, пунктирная линия – SESAME 5760, штрих-пунктирная линия – SESAME 5761

и позволяет использовать результаты расчета для определения давления в плазме сжатого гелия. На вставке к рис. 5 приведены расчеты, выполненные по УРС гелия SESAME [23]. Видно, что расчеты $R(t)$-диаграмм по УРС [23] предполагают более высокие степени сжатия гелия для нашего экспериментального устройства.

Для получения распределений давления, плотности и температуры в плазме гелия, приведенных на рис. 6, также использовались газодинамические расчеты. Характер рассчитанных распределений связан с кумулятивностью процесса сжатия газа в сферической оболочке. Поэтому для оценки основных па-

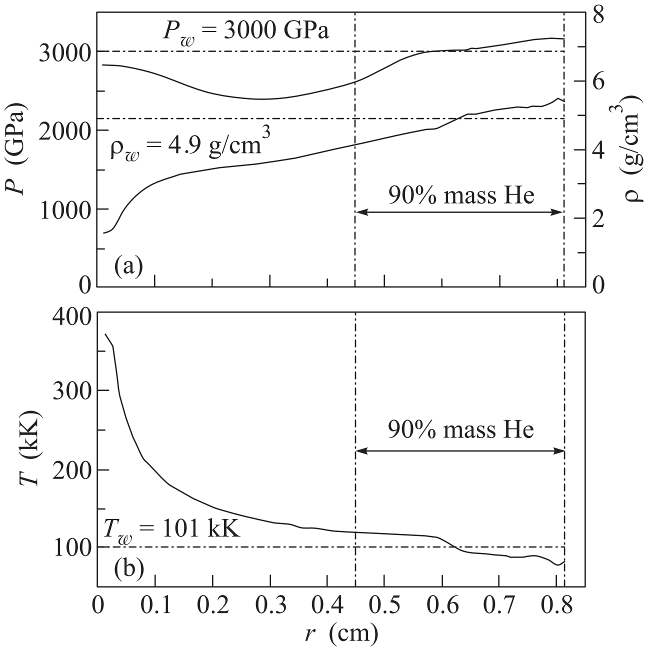

Рис. 6. Распределения плотности, давления (a) и температуры (b) в плазме гелия по радиусу полости в момент “остановки” оболочки

раметров плазмы гелия на момент ее максимального сжатия использовались средневзвешенные значения давления, плотности и температуры, полученные усреднением расчетных значений $P(R)$, $\rho(R)$ и $T(R)$ по массе.

Как следует из расчета, средневзвешенное по массе давление в сжатом газообразном гелии $P_w \approx$ ≈ 3000 ГПа, а плотность $\rho_w = 4.90$ г/см^3. Таким образом, при начальной плотности гелия во внутреннем каскаде $\rho_{02} = 0.008$ г/см^3 расчетное сжатие составляет величину $\sigma = 611.4$, что согласуется с экспериментальным значением в пределах 6.3 %.

Газодинамические расчеты показывают, что при фокусировке первой ударной волны в центре сферической камеры температура гелия достигает величины $T \sim 170$ кК. При дальнейшей циркуляции ударных волн пиковое значение температуры в плазме гелия в центре сферы вырастает до $T \sim 475$ кК, в то время как на границе оболочка–газ в момент максимального сжатия (см. рис. 6b) температура не превышает 83 кК. Усредненное по массе значение температуры в плазме гелия оценивается величиной $T_w = 101$ кК и соответствует среднему значению температуры для 90 % массы гелия.

Результат настоящей работы приведен в табл. 2 и на рис. 7 (в координатах давление–сжатие) вместе с данными по сжимаемости гелия в устройствах сферической [14–16] и цилиндрической геометрии [24].

Таблица 2

Данные по сжимаемости газообразного гелия из настоящей работы и [14–16]. Расчеты выполнены в одномерном приближении

Эксперимент	ρ_0, г/см^3	$R_{\min}$, мм	ρ_{ex}, г/см^3	$\sigma = \rho_{ex}/\rho_0$	P_{calc}, ГПа	ρ_{calc}, г/см^3	T_{calc}, кК	S_{calc}, Дж$\cdot$г$^{-1}\cdot$К$^{-1}$
[14]	0.025	10.0	3.8 ± 0.9	152	1580	3.4	74	18.1
[15]	0.038	6.6	8.4 ± 1.9	221	4750	7.2	72	23.3
[16]	0.039	10.3	4.0 ± 0.4	102.5	1950	4.5	59	18.4
Настоящая работа	0.008*)	8.3	4.6 ± 0.8	575	3000	4.9	101	19.4

*) Указана начальная плотность гелия во внутренней полости сферического устройства.

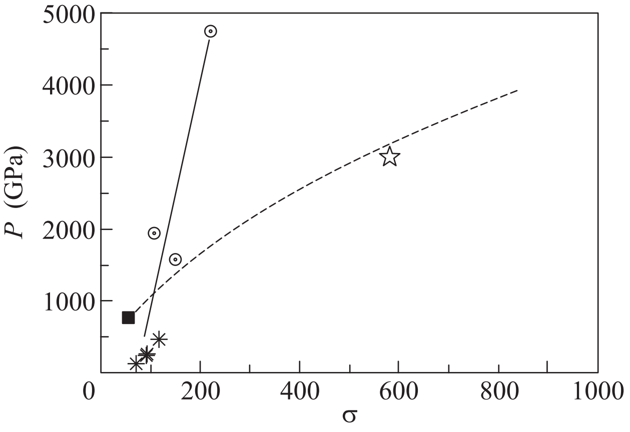

Рис. 7. Зависимость давления от степени сжатия квазиизэнтропически сжатой плазмы гелия. Эксперимент (сферические устройства): звездочка – настоящая работа, $P_{01} = 36.4$ МПа, $P_{02} = 5.1$ МПа; $\odot$ – при равном давлении в обеих полостях $P_{01} = P_{02} \approx 25$ МПа [14–16]; $*$ – цилиндрические устройства [24]. Расчет: штриховая линия – с переменным давлением во внутреннем каскаде при постоянном давлении газа во внешней полости $P_{01} = 40$ МПа; ■ – $P_{01} = P_{02} = 40$ МПа, сплошная линия – аппроксимация данных [16]

Анализ полученных данных показывает, что в наших двухкаскадных сферических устройствах при одинаковом начальном давлении газа в обеих полостях до давлений $P \approx 5000$ ГПа степень сжатия гелия не превышает величину $\sigma \approx 220$ [15–16]. Как видно из рис. 7, в новой сферической камере с разделенными полостями за счет низкой начальной плотности газа ($\rho_{02} = 0.008$ г/см^3) при давлении $P = 3000$ ГПа достигнута уникально высокая степень сжатия гелия, $\sigma = 575$, что в 2.5 раза превышает прежние результаты [15, 16]. Полученный результат хорошо согласуется с кривой, рассчитанной в предположении, что давление во внешнем каскаде устройства сохраняется постоянным, $P_{01} = 40$ МПа, а давление P_{02} во внутренней оболочке меняется от 4 до 40 МПа.

Результат настоящей работы в координатах давление–плотность вместе с данными [16, 24] приведен на рис. 8. На том же рисунке нанесены изэнтропы *1* и *2*, описывающие результат настоящей работы и опыт [16] соответственно. Видно, что изэнтропа *2* удовлетворительно описывает все имеющиеся данные по сжимаемости гелия в области давлений до 5000 ГПа, несмотря на разницу в значениях начальной плотности газа в диапазоне $\rho_0 = (0.019{-}0.039)$ г/см^3. Однако результат, полученный в настоящей работе, изэнтропа *2* не описывает.

Анализ данных показал, что различное положение изэнтроп связано с начальными параметрами сжатия гелия в ударной волне. Так, на вставке к рис. 8 приведены взаимное положение рассчитанных ударных адиабат гелия и начальные участки изэнтроп в условиях настоящей работы и [16]. Видно, что при низкой начальной плотности гелия ($\rho_{02} = 0.008$ г/см^3) изэнтропа *2* с исходным значением энтропии $S/R = 14.6$ стартует по давлению P раньше и лежит выше изэнтропы *4*, описывающей результат [14] при значении $S/R = 16$. Расчет энтропии на первой ударной волне в настоящей работе выполнен по формуле

$$S(\rho, T) = \frac{E(\rho, T) - E_{\text{col}}(\rho, T)}{T} + \int_0^T \frac{E(\rho, \tau) - E_{\text{col}}(\rho, \tau)}{\tau^2} d\tau, \quad (1)$$

где: E и E_{col} – полная и "холодная" внутренняя энергия газа, T – температура.

При построении изэнтропы использовался следующий подход. Первоначально рассчитывали ударную адиабату гелия *1* и $P{-}\rho$-диаграмму сжатия газа *2*, получаемую усреднением по массе профилей давления и плотности, построенных на разные моменты

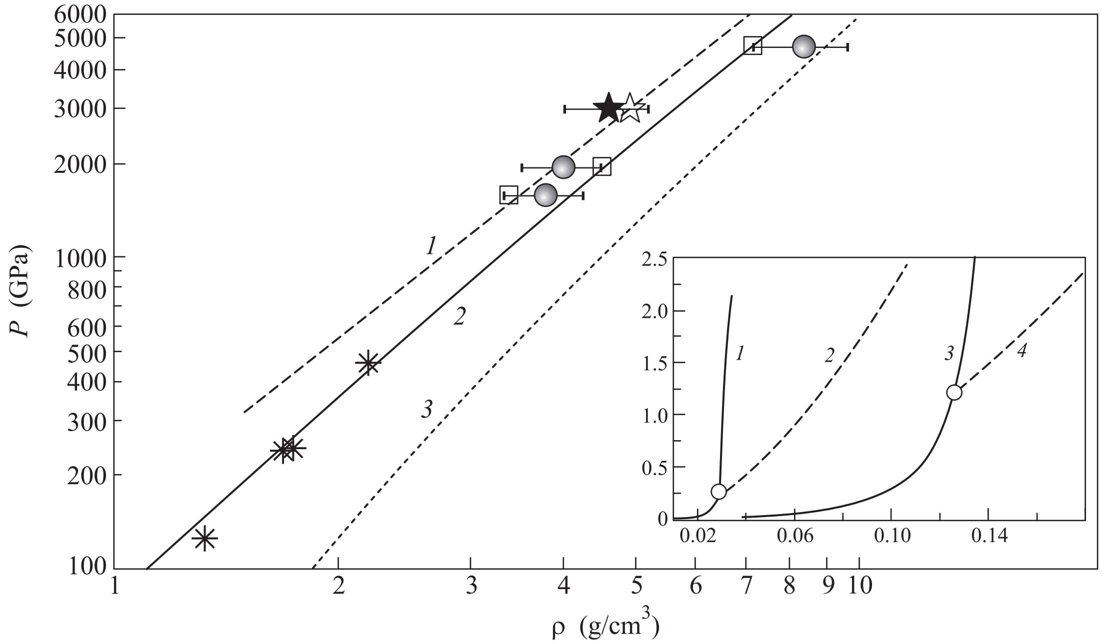

Рис. 8. Квазиизэнтропическое сжатие газообразного гелия: темная звездочка – настоящая работа; темный кружок – [16]; светлая звездочка, светлый квадратик – расчет; $*$ – [23]; *1* – изэнтропа $S/R = 14.6$, $T = 101$ кК; *2* – изэнтропа $S/R = 16.0$, $T = 71$ кК [16]; *3* – "холодная" адиабата по УРС ВНИИЭФ ($T = 0$ K). На вставке ударная адиабата: *1* – настоящая работа, *3* – [16]; начальный участок изэнтропы: *2* – настоящая работа, *4* – [16]; светлый кружок – исходные состояния для расчета изэнтроп

Таблица 3

Параметры гелия на ударной волне и на изэнтропах

Устройство	Начальные параметры гелия на ударной волне				Конечные параметры сжатия		
	P_H, ГПа	ρ_H, г/см^3	T_H, K	S/R	P_Z, ГПа	ρ_Z, г/см^3	T_Z, кК
[16]	1.220	0.125	3750	16.0	4750	7.2	71
Настоящая работа	0.246	0.028	3970	14.6	3000	4.9	101

времени. Рассчитанные кривые показаны на рис. 9. Анализ показывает, что диаграмму *2* в области плотностей выше $\rho \approx 0.1$ г/см^3 можно аппроксимировать прямой линией, а ее экстраполяция до пересечения с ударной адиабатой *1* дает состояние на первой ударной волне H с координатами $\rho_\text{н} = 0.0273$ г/см^3, $P_\text{н} = 0.181$ ГПа, которое и принималось за исходное для последующего расчета изэнтропы *3*.

Как видно из рис. 9, рассчитанная изэнтропа *3* сливается с диаграммой сжатия *2* в точке I с координатами $\rho_\mathrm{I} = 0.118$ г/см^3, $P_\mathrm{I} = 3.06$ ГПа, что послужило основанием считать дальнейшее сжатие гелия "мягким" – изэнтропическим. Оценим, на каком этапе циркуляции ударных волн в экспериментальном устройстве реализуется состояние I. На рис. 10 приведен фрагмент рассчитанных траекторий ударных волн, реализуемых в нашем экспериментальном устройстве. На диаграмме сжатия отмечен момент, соответствующий точке $(\rho_\mathrm{I}, P_\mathrm{I})$. Видно, что изэнтропическое сжатие газа (I) реализуется на ударной волне BW-2, образованной отражением первой ударной волны BW-1 от центра симметрии устройства в момент времени $t_\mathrm{F} = 25.64$ мкс. Состоянию I соответствует момент времени $t_\mathrm{I} = 25.85$ мкс, радиус фронта BW-2 $R_\mathrm{BW} = 0.376$ см $= 0.05R_0$. Внутренняя граница оболочки Fe_2 расположена на расстоянии $R_\mathrm{Fe2} = 2.87$ см $\approx 0.44R_0$. На данный момент времени кинематические параметры BW-2 имеют следующие значения: $D_\mathrm{BW} = 13.79$ км/с и $U_\mathrm{BW} = 0.351$ км/с, а скорость внутренней границы оболочки $U_\mathrm{Fe2} = 6.69$ км/с.

Исходные параметры для расчета изэнтроп и конечные параметры сжатия гелия приведены в табл. 3.

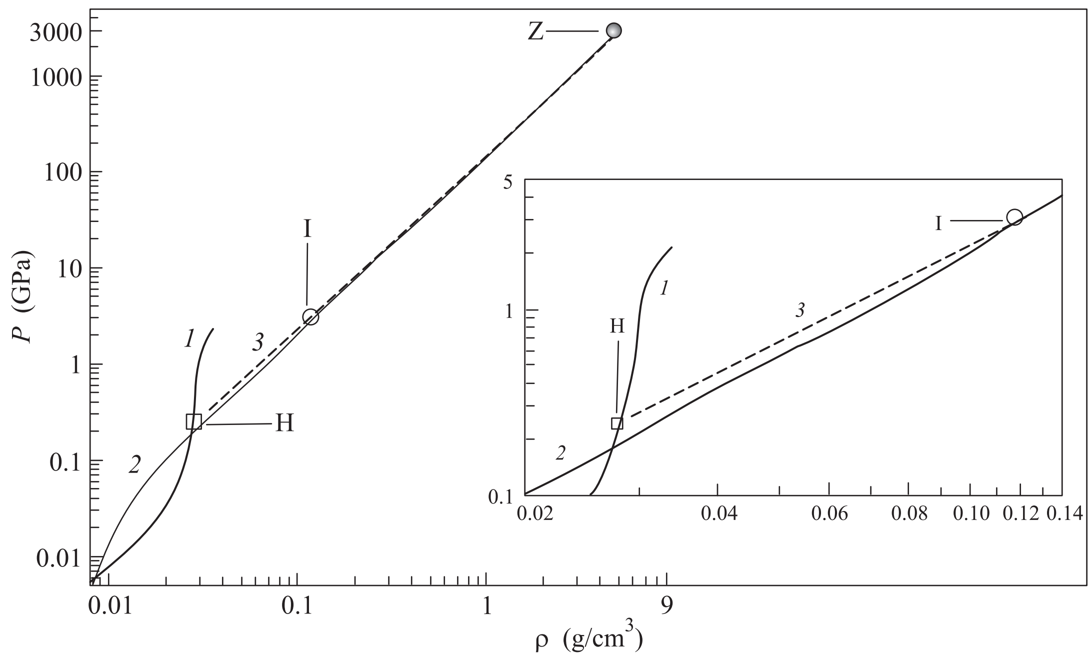

Рис. 9. Ударно-волновое и квазиизэнтропическое сжатие гелия во внутреннем каскаде разработанного устройства: *1* – ударная адиабата, *2* – $P(\rho)$-диаграмма сжатия газа, *3* – изэнтропа $S/R = 14.6$, Z – состояние сжатого гелия в эксперименте настоящей работы, I – точка начала изэнтропического сжатия газа, H – точка пересечения изэнтропы и ударной адиабаты

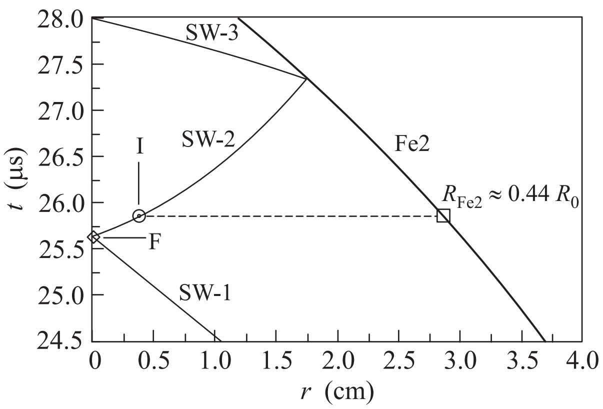

Рис. 10. Фрагмент расчета ударных волн во внутреннем каскаде экспериментального устройства вблизи момента “фокусировки” F: I – состояние, с которого начинается изэнтропическое сжатие газа, F – момент прихода первой ударной волны к центру сферического устройства, SW – ударная волна

Термодинамические расчеты параметров сильно неидеальной плазмы гелия были выполнены В.К. Грязновым по программе SAHA-He, учитывающей эффекты кулоновской неидеальности, вырождения электронов, вклад связанных состояний и эффекты исключенного объема [23]. Было установлено, что в рамках этой модели при давлении плазмы гелия $P = 30$ Мбар и плотности $\rho = 4.6$ г/см^3 в настоящем эксперименте реализуется плазма с температурой $T = 110000$ K, высокой электронной концентрацией $n_e \sim 4.5 \cdot 10^{23}$ см$^{-3}$ и заметной долей нейтральных атомов $n_0 \sim 3 \cdot 10^{23}$ см$^{-3}$. Такая плазма является сильно неидеальной ($\Gamma \sim 7$) с заметно вырожденной электронной компонентой $n\lambda^3 \sim 5$. Это делает ее весьма интересной с точки зрения изучения эффектов неидеальности и вырождения, определяющих поведение вещества в состояниях с высокой плотностью энергии в энергетических устройствах будущего и различных звездных объектах нашей Вселенной.

Анализ проведенных исследований показывает, что разработанные авторами технология изготовления сферических устройств и методика эксперимента позволяют надеяться на успешное проведение новых опытов, в которых мы планируем сжать гелий в $\sigma \approx 1000$ раз. Окончательные выводы о корректности существующих УРС гелия в рассматриваемой области давлений и плотностей можно сделать после проведения дополнительного теоретического анализа полученных данных. Возможно, потребуется уточнение сжимаемости гелия при давлении $P \sim 5000$ ГПа.

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 расчеты параметров неидеальной плазмы по программе SAHA-He, а также сотрудникам, принимавшим участие в организации, проведении расчетов, экспериментов и обработке полученных данных: А.Ю. Баурину, А.М. Демину, Е.П. Волкову, С.Е. Елфимову, Р.В. Борисову, О.А. Есину, А.В. Романову, Д.П. Турутину, И.Б. Шадиеву, А.С. Пупкову, С.В. Ерунову, А.В. Дергунову, А.В. Блинову, Е.А. Пронину, А.И. Ломайкину. Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН “Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физики сильно-сжатого вещества” и РФФИ (грант # 13-02-00396).

1. В. Е. Фортов, *Физика высоких плотностей энергии*, Физматлит, М. (2012).
2. N. W. Ashkroft, in *High Pressure Phenomena*, IOS Press, Amsterdam (2002), p. 151.
3. V. E. Fortov, *Extreme states of Matter*, Springer (2010).
4. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова, А. П. Толочко, В. Д. Урлин, Письма в ЖЭТФ **16**, 286 (1972) [F. V. Grigor'ev, S. B. Kormer, O. L. Mikhailova, A. P. Tolochko, and V. D. Urlin, JETP Lett. **16**, 201 (1972)ъ.
5. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова, А. П. Толочко, В. Д. Урлин, ЖЭТФ **75**, 1683 (1978) [F. V. Grigor'ev, S. B. Kormer, O. L. Mikhailova, A. P. Tolochko, and V. D. Urlin, JETP **48**, 847 (1978)ъ.
6. В. П. Копышев, В. Д. Урлин, *Ударные волны и экстремальные состояния вещества*, под ред. В. Е. Фортова, Л. В. Альтшулера, Р. Ф. Трунина, А. И. Фунтикова, Наука, М. (2000), с. 297.
7. В. П. Копышев, В. В. Хрусталев, ПМТФ **21**, 122 (1980).
8. V. E. Fortov, R. I. Ilkaev, V. A. Arinin, V. V. Burtzev, V. A. Golubev, I. L. Iosilevskiy, V. V. Khrustalev, A. L. Mikhailov, M. A. Mochalov, V. Ya. Ternovoi, and M. V. Zhernokletov, Phys. Rev. Lett. **99**, 185001 (2007).
9. G. V. Boriskov, A. I. Bykov, R. I. Il'kaev, V. D. Selemir, G. V. Simakov, R. F. Trunin, V. D. Urlin, A. N. Shuikin, and W. J. Nellis, Phys. Rev. B **71**, 092104 (2005).
10. Г. В. Борисков, А. И. Быков, Н. И. Егоров, М. И. Долотенко, В. Н. Павлов, В. И. Тимарева, В сб. *XI Харитоновские научные чтения*, под ред. А. Л. Михайлова, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2009), с. 771.
11. В. Д. Урлин, М. А. Мочалов, О. Л. Михайлова, ЖЭТФ **111**, 2099 (1997).
12. В. Д. Урлин, М. А. Мочалов, О. Л.Михайлова, ТВТ **38**, 227 (2000).
13. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, 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).
14. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, 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).
15. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, 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).
16. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Раевский, В. А. Огородников, А. А. Юхимчук, А. И. Давыдов, Н. Н. Анашкин, В. А. Аринин, А. О. Бликов, А. Ю. Баурин, Н. Б. Давыдов, В. А. Комраков, А. И. Логвинов, С. Ф. Маначкин, А. В. Рыжков, Б. И. Ткаченко, А. В. Федоров, С. А. Финюшин, Д. А. Калашников, Е. А. Чудаков, Е. А. Пронин, Е. А. Бакулина, ЖЭТФ **146**, 169 (2014).
17. Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov, D. I. Zenkov, and B. F. Tkachenko, in: *11th IEEE Pulsed Power Conference/ Digest of technical papers*, ed. by G. Cooperstein and I. Vikovitsky (1997), p. 1669.
18. В. В. Сычев, А. А. Вассерман, А. Д. Козлов, Г. А. Спиридонов, В. А. Цымарный, *Термодинамические свойства гелия*, ГСССД, Изд-во стандартов, М. (1984).
19. V. A. Arinin, B. I. Tkachenko, Pattern Recognition and Image Analysis **19**(1), 63 (2010).
20. В. П. Копышев, ПМТФ **12**, 103 (1971).
21. W. G. Hoover, S. G. Gray, and K. W. Johnson, J. Chem. Phys. **55**, 1128 (1971).
22. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин, В. Н. Софронов, ВАНТ, Сер.: Методики и программы численного решения задач математической физики **3**, 11 (1982).
23. *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.
24. М. В. Жерноклетов, В. К. Грязнов, В. А. Аринин, В. Н. Бузин, Н. Б. Давыдов, Р. И. Илькаев, И. Л. Иосилевский, А. Л. Михайлов, М. Г. Новиков, В. В. Хрусталев, В. Е. Фортов, Письма в ЖЭТФ **96**, 479 (2012).