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

 $M. A. Мочалов^{1)}, P. И. Илькаев, B. Е. Фортов^{+}, A. Л. Михайлов, B. А. Аринин, A. О. Бликов, B. А. Комраков, A. В. Рыжков, B. А. Огородников, A. А. Юхимчук$

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 двух-каскадной сферической камеры с разделенными полостями и заряда взрывчатого вещества с массой $\approx 55~\rm kr$. 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 $P_1=36.4~\rm M\Pi a$ и $P_2=5.1~\rm M\Pi a$ соответственно измерена плотность сжатой плазмы гелия $\rho=4.6~\rm r/cm^3$, что соответствует степени сжатия $\sigma=575~\rm при$ давлении $P\approx 3000~\rm \Gamma\Pi a$ 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 $P_{01}=36.4\,\mathrm{M}\Pi\mathrm{a}$ и $P_{02} = 5.1 \,\mathrm{MHa}$ 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 ($P_{01} = 36.4 \,\mathrm{MHa}$) 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 $\oslash 200\,\mathrm{mm}$ и толщину стенки $\Delta=8\,\mathrm{mm}$. Внутренняя оболочка Fe2 имеет диаметр $\oslash 150\,\mathrm{mm}$ и толщину стенки $\Delta=6\,\mathrm{mm}$. Для уменьшения возмущений система подачи газов вы-

¹⁾ e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

| Параметры | экспериментального | устройства |
|-----------|--------------------|------------|
| | • | v 1 |

| Оболочки (сталь ЭИ712) | | Давле | ение газа, МПа | Температура, °С | Плотность газа, г/см 3 | | |
|------------------------|---------------|----------|----------------|-------------------|-----------------------------|------------|--|
| Fe1 | Fe2 | P_{01} | P_{02} | $T_{01} = T_{02}$ | $ ho_{01}$ | $ ho_{02}$ | |
| ⊘200 мм, | ⊘150 мм, | 36.4 | 5.1 | 28.5 | 0.05 | 0.008 | |
| $\Delta=8$ mm | $\Delta=6$ mm | | | | | | |

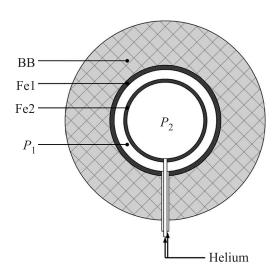


Рис. 1. Экспериментальное двухкаскадное сферическое устройство с разделенными полостями

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 $P_0=60\,\mathrm{MHa}$ (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 $\approx 220\,\mathrm{mm}$ 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-

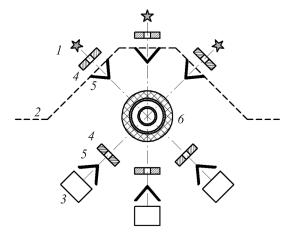


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – рентгеновские источники, 2 – защитное устройство, 3 – регистраторы рентгеновских изображений, 4 – коллиматоры (Pb), 5 – защитные конусы (Al), 6 – экспериментальное устройство

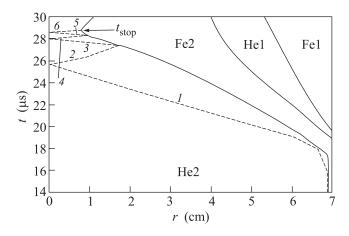


Рис. 3. R(t) — диаграмма движения ударных волн и оболочек в сферическом устройстве из настоящей работы: 1 — первая ударная волна, 2-6 — отраженные ударные волны, Fe1 и Fe2 — оболочки первого и второго каскада соответственно, He1 и He2 — газообразный гелий в полости первого и второго каскадов, $t_{\rm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

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

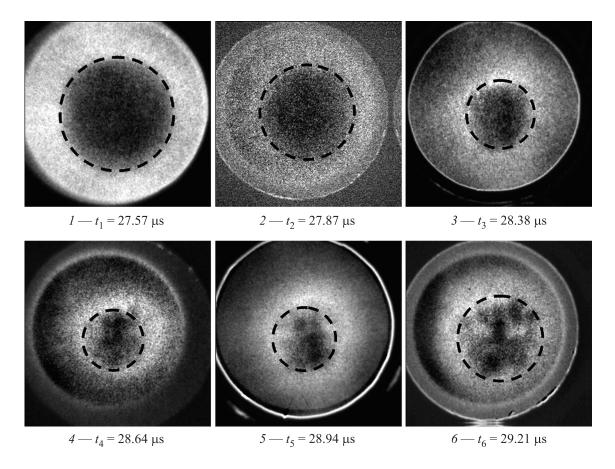


Рис. 4. Рентгеновские изображения внутренней полости с гелием в зависимости от времени сжатия. Штриховыми линиями показаны результаты обработки изображений методом функциональной трассировки [19]

с массой $\approx 55\,\mathrm{kr}$ в тротиловом эквиваленте. Заполнение камер гелием производилось от термокомпрессора, способного заполнять газом чистотой $99.99\,\%$ объемы $\approx 2\,\mathrm{n}$ до давлений $\sim 50\,\mathrm{MHa}$ ($500\,\mathrm{at}$).

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 $P_{01}=36.4\,\mathrm{MHa}$, во внутренней – $P_{02}=5.1\,\mathrm{MHa}$; температура газа $T_0=28.5\,^\circ\mathrm{C}$. При таких начальных условиях плотность гелия в исходном состоянии : во внутренней камере $\rho_{02}=0.008\,\mathrm{r/cm^3}$, а во внешней – $\rho_{02}=0.05\,\mathrm{r/cm^3}$. 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, $t_4=28.64\,\mathrm{mkc}$) определен радиус полости $R_{\min}=0.83\pm0.05\,\mathrm{cm}$ и вычислена средняя плотность сжатого газа $\rho_{ex}=\sigma\cdot\rho_0=4.6\pm0.8\,\mathrm{r/cm}^3$. Здесь $\sigma=(R_0/R_{\min})^3=575,$ где $R_0=6.9\,\mathrm{cm}$ – начальный радиус внутренней границы сферической оболочки, $\rho_0=0.008\,\mathrm{r/cm}^3$ – 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 таблич-

ной 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

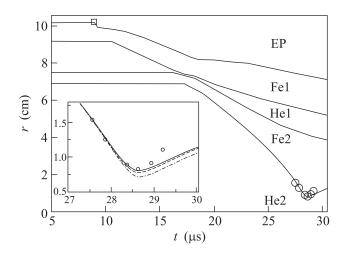


Рис. 5. R(t)-диаграмма работы экспериментального устройства в опыте по сжатию гелия: \square – электроконтактное измерение движения УВ при газодинамическом исследовании устройства; \circ – результаты рентгенографирования; EP – продукты взрыва. На вставке – расчеты: сплошная линия – УРС ВНИИЭФ, пунктирная 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-

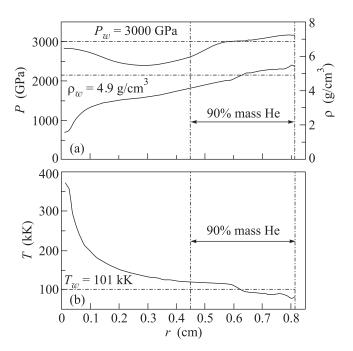


Рис. 6. Распределения плотности, давления (a) и температуры (b) в плазме гелия по радиусу полости в момент "остановки" оболочки

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 $P_w \approx 3000\,\Gamma\Pi a$, а плотность $\rho_w = 4.90\,\Gamma/{\rm cm}^3$. Таким образом, при начальной плотности гелия во внутреннем каскаде $\rho_{02} = 0.008\,\Gamma/{\rm cm}^3$ 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 $T\sim 170\,\mathrm{kK}$. При дальнейшей циркуляции ударных волн пиковое значение температуры в плазме гелия в центре сферы вырастает до $T\sim 475\,\mathrm{kK}$, в то время как на границе оболочка-газ в момент максимального сжатия (см. рис. 6b) температура не превышает $83\,\mathrm{kK}$. Усредненное по массе значение температуры в плазме гелия оценивается величиной $T_w=101\,\mathrm{kK}$ 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} | ρ_{ex} , | $\sigma = \rho_{ex}/\rho_0$ | $P_{\rm calc}$, ГПа | $ ho_{ m calc}, { m r/cm^3}$ | $T_{\rm calc}$, | $S_{\mathrm{calc}},$ |
|---------------------|------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| | | MM | $_{\Gamma/{ m cm}^3}$ | | | | кК | Дж \cdot г $^{-1}\cdot$ K $^{-1}$ |
| [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.

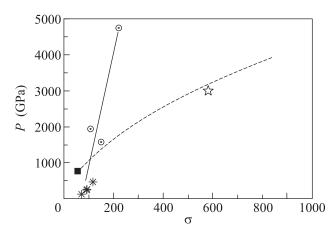


Рис. 7. Зависимость давления от степени сжатия квазиизэнтропически сжатой плазмы гелия. Эксперимент (сферические устройства): звездочка – настоящая работа, $P_{01}=36.4~\mathrm{M\Pi a},\ P_{02}=5.1~\mathrm{M\Pi a};\ \odot$ – при равном давлении в обеих полостях $P_{01}=P_{02}\approx25~\mathrm{M\Pi a}$ [14–16]; * – цилиндрические устройства [24]. Расчет: штриховая линия – с переменным давлением во внутреннем каскаде при постоянном давлении газа во внешней полости $P_{01}=40~\mathrm{M\Pi a};\ \blacksquare$ – $P_{01}=P_{02}=40~\mathrm{M\Pi a},\ \mathrm{сплошная}$ 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 ($\rho_{02}=0.008\,\mathrm{r/cm^3}$) при давлении $P=3000\,\mathrm{г}$ Па 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, $P_{01}=40\,\mathrm{M}$ Па, 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 $5000\,\Gamma\Pi a$, несмотря на разницу в значениях начальной плотности газа в диапазоне $\rho_0=(0.019-0.039)\,\Gamma/{\rm cm}^3$. 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 ($\rho_{02} = 0.008 \, \text{г/см}^3$) 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

$$S(\rho, T) = \frac{E(\rho, T) - E_{\text{col}}(\rho, T)}{T} + \int_{0}^{T} \frac{E(\rho, \tau) - E_{\text{col}}(\rho, \tau)}{\tau^{2}} d\tau, \tag{1}$$

где: E и $E_{\rm col}$ – 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

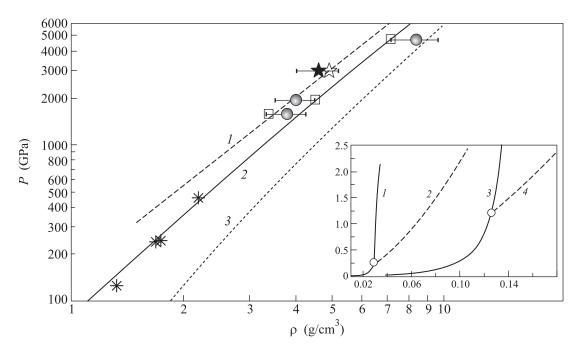


Рис. 8. Квазиизэнтропическое сжатие газообразного гелия: темная звездочка – настоящая работа; темный кружок – [16]; светлая звездочка, светлый квадратик – расчет; * – [23]; 1 – изэнтропа S/R=14.6, $T=101\,\mathrm{kK}$; 2 – изэнтропа S/R=16.0, $T=71\,\mathrm{kK}$ [16]; 3 – "холодная" адиабата по УРС ВНИИЭФ ($T=0\,\mathrm{K}$). 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

| Пополенти | | | | | | | |
|-----------|-------|----|---------|-------|---|----|------------|
| Параметры | гелия | на | ударнои | волне | и | на | изэнтропах |

| Устройство | Начальны | е параметры | гелия на | Конечные параметры сжатия | | | |
|---------------------|-------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|------------------|
| | $P_{\rm H}$, ГПа | $ ho_{ m H}, { m r/cm}^3$ | T_{H} , K | S/R | $P_{\rm Z}$, ГПа | $ ho_{ m Z},~{ m r/cm}^3$ | $T_{\rm Z}$, 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 $\rho \approx 0.1\,\mathrm{r/cm^3}$ можно аппроксимировать прямой линией, а ее экстраполяция до пересечения с ударной адиабатой 1 дает состояние на первой ударной волне H с координатами $\rho_{\rm H}=0.0273\,\mathrm{r/cm^3},$ $P_{\rm H}=0.181\,\Gamma\Pi{\rm a},$ 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 $\rho_{\rm I}=0.118\,{\rm г/cm^3},\ P_{\rm I}=3.06\,{\rm ГПa},$ 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 эксперименталь-

ном устройстве. На диаграмме сжатия отмечен момент, соответствующий точке ($\rho_{\rm I}, P_{\rm I}$). 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 $t_{\rm F}=25.64\,\rm Mkc$. Состоянию I соответствует момент времени $t_{\rm I}=25.85\,\rm Mkc$, радиус фронта BW-2 $R_{\rm BW}=0.376\,\rm cm=0.05\,R_0$. Внутренняя граница оболочки Fe2 расположена на расстоянии $R_{\rm Fe2}=2.87\,\rm cm\approx0.44\,R_0$. На данный момент времени кинематические параметры BW-2 имеют следующие значения: $D_{\rm BW}=13.79\,\rm km/c$ и $U_{\rm BW}=0.351\,\rm km/c$, а скорость внутренней границы оболочки $U_{\rm Fe2}=6.69\,\rm km/c$.

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

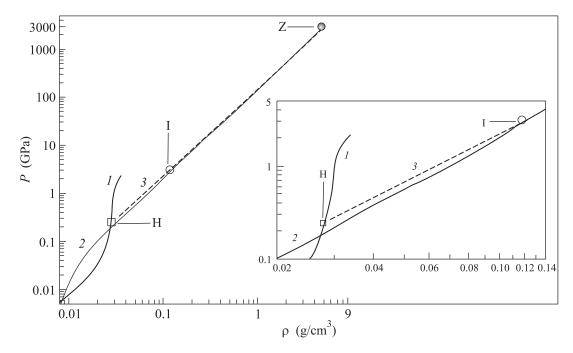


Рис. 9. Ударно-волновое и квазиизэнтропическое сжатие гелия во внутреннем каскаде разработанного устройства: 1 – ударная адиабата, $2 - P(\rho)$ -диаграмма сжатия газа, 3 – изэнтропа S/R = 14.6, Z – состояние сжатого гелия в эксперименте настоящей работы, I – точка начала изэнтропического сжатия газа,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

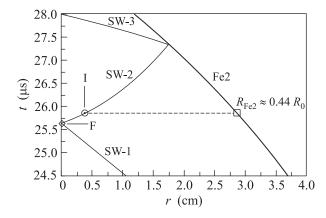


Рис. 10. Фрагмент расчета ударных волн во внутреннем каскаде экспериментального устройства вблизи момента "фокусировки" $F\colon I$ — состояние, с которого начинается изэнтропическое сжатие газа, F — момент прихода первой ударной волны к центру сферического устройства, SW — ударная волна

Термодинамические расчеты параметров сильно неидеальной плазмы гелия были выполнены В.К. Грязновым по программе SAHA-Не, 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 $P=30\,\mathrm{Mfap}$ и плотности $\rho=4.6\,\mathrm{r/cm}^3$ в настоящем эксперименте реализуется плазма с температурой $T=110000\,\mathrm{K}$, высокой электронной концентрацией $n_e\sim4.5\cdot10^{23}\,\mathrm{cm}^{-3}$ и заметной долей нейтральных атомов $n_0\sim3\cdot10^{23}\,\mathrm{cm}^{-3}$. Такая плазма является сильно неидеальной ($\Gamma\sim7$) с заметно вырожденной электронной компонентой $n\lambda^3\sim5$. 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 $P \sim 5000 \, \Gamma \Pi a$.

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).
- 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.
- 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).
- 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).
- 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).
- 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.
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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.
- 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).