

Экспериментальное исследование сжимаемости плазмы гелия при давлении до 20 ТПа

М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, С. В. Ерунов, А. О. Бликов¹⁾, В. А. Огородников, С. Е. Елфимов, В. А. Аринин, В. А. Комраков, М. И. Лихутов, И. П. Максимкин

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

Поступила в редакцию 19 сентября 2023 г.

После переработки 19 сентября 2023 г.

Принята к публикации 21 сентября 2023 г.

В лабораторном эксперименте с использованием сферического двухкаскадного экспериментального устройства неидеальная плазма гелия сжата до плотности $\rho \approx 14 \text{ г/см}^3$ давлением $P \approx 20 \text{ ТПа}$ (200 Мбар). Приведена конструкция сферического экспериментального устройства, выполнены оценки термодинамических параметров плазмы гелия, достигаемые в разработанном устройстве. Данные о динамике движения наружных и внутренних каскадов экспериментального устройства, использованные при выборе методики расчетов, получены в предварительном эксперименте с полусферическим макетом. Эксперимент выполнен на рентгенографическом комплексе ВНИИЭФ, состоящем из бетатронов БИМ 234.3000 с граничной энергией 60 МэВ, используемых в мультиимпульсном режиме генерации тормозного излучения с многоканальной оптико-электронной системой регистрации рентгеновских изображений. Дополнительно с бетатронами для регистрации сжатой полости оболочки использован линейный высокоточный ускоритель ЛИУ-Р-Т и пакетный регистратор изображения, состоящий из фотохромных АДС-экранов.

DOI: 10.31857/S1234567823200053, EDN: opjfb a

1. Введение. В последние годы в экспериментальных исследованиях свойств сильно неидеальной плазмы гелия во ВНИИЭФ удалось продвинуться в диапазон мегабарных давлений, используя метод квазиизэнтропического сжатия газов в двухкаскадных устройствах цилиндрической и сферической геометрии с использованием мощных химических взрывчатых веществ (ВВ) [1–10]. Высокая концентрация энергии в таких объектах вызывает процессы термической ионизации и/или ионизацию давлением, так, что возникает плазма, теоретическое описание которой чрезвычайно затруднено в силу сложности происходящих при этом физических процессов. Данные о поведении гелия в области таких рекордных сжатий необходимы для верификации его уравнения состояния (УРС) в широкой области фазовой диаграммы. Изучение свойств гелия имеет и большое фундаментальное значение, так как мегабарный диапазон давлений плазмы гелия соответствует состояниям большинства внутренних частей планет-гигантов Солнечной системы и экзопланетам. Еще более высокие значения термодинамических па-

раметров плазмы реализуются в устройствах инерционного управляемого синтеза. Интерес к исследованию свойств неидеальной плазмы гелия также во многом связан и с предсказаниями существования в плотном и горячем флюиде гелия аномалий типа необычных “плазменных” (*ionization-driven*) фазовых переходов (ПФП).

В экспериментах ВНИИЭФ с гелием при равном начальном давлении газа в обоих каскадах 25 МПа свойства плазмы гелия, сжатой до плотности 8 г/см^3 в области давлений до 5000 ГПа, исследовали в [1–3]. В экспериментах [4, 5] с использованием двухкаскадной сферической камеры с разделенными полостями исследованы свойства квазиизэнтропически сжатой плазмы гелия при степенях сжатия в 600 [4] и 900 [5] раз. В работе [5] исследована также ударно-волновая сжимаемость гелия до $P \approx 83 \text{ ГПа}$. В эксперименте [6], используя для нагружения блок ВВ с массой $M \approx 85 \text{ кг}$ ТНТ, неидеальная плазма гелия сжата до плотности $\rho \approx 9 \text{ г/см}^3$ давлением $P \approx 10000 \text{ ГПа}$, а в работе [7] – до плотности $\rho \approx 13 \text{ г/см}^3$ давлением $P \approx 16700 \text{ ГПа}$. Квазиизэнтропическое сжатие плотного газообразного гелия исследовалось также в [8] в области давлений до 500 ГПа и до 2000 ГПа в [9].

¹⁾e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

В недавно выполненной работе [10] экспериментально исследована сжимаемость гелия в диапазоне давлений 200–600 ГПа при постоянной конечной температуре $T \approx 21000$ К.

В настоящей работе предложена новая конструкция сферического двухкаскадного экспериментального устройства с оболочкой внутреннего каскада из сплава ВНЖ-95 и проведен эксперимент по исследованию сжимаемости гелия давлением $P \approx 20$ ТПа. Выполнен одномерный газодинамический расчет предложенного устройства; проведена оценка термодинамических параметров гелия, достигнутых с предложенным устройством.

Для регистрации сжатия гелия использован рентгенографический комплекс ВНИИЭФ, состоящий из бетатронов БИМ234.3000 [11], работающих в мультиимпульсном режиме генерации тормозного излучения и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений, одновременно с высокопоточным ускорителем ЛИУ-Р-Т [12].

2. Экспериментальное устройство. Техника эксперимента. Основу устройства составляет заполненная гелием сферическая камера (см. рис. 1), изготовленная из высокопрочной стали методом пай-

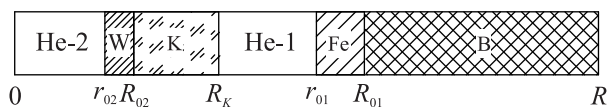


Рис. 1. Геометрия экспериментального устройства для исследования сжимаемости неидеальной плазмы гелия давлением 20 ТПа. Область: He-1, 2 – гелий; W – оболочка из сплава ВНЖ-95; K – капролоновая (полиамид-6) оболочка; B – взрывчатое вещество

ки. Для сжатия гелия использовано мощное конденсированное взрывчатое вещество (ВВ) (1) массой $m = 55$ кг ТНТ, внутри которого находится внешняя стальная оболочка (Fe), рассчитанная на давление газа $P = 200$ МПа. Основным элементом всей конструкции является комбинированный внутренний каскад, состоящий из сферической оболочки из капролона (полиамид-6) (K) и размещенной внутри тонкостенной оболочки (W) из сплава ВНЖ-95 (вольфрам-никель-железо в соотношении: W – 95 %, Ni – 3.5 %, Fe – 1.5 %).

Целью эксперимента является регистрация $R(t)$ траектории движения оболочки экспериментального устройства и определение ее размера в момент “остановки”, когда достигается максимальное сжатие исследуемого вещества, т.е. – измеряемой в эксперименте величиной является средняя плотность сжатой

плазмы гелия. При сохранении массы сжатого вещества его плотность вычисляли из выражения:

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

где ρ_0 – начальная плотность газа, R_0 и $R_{\min}$ – внутренний радиус оболочки в исходном состоянии и в момент ее “остановки” соответственно, $n = 3$ для сферической геометрии.

Для выбора режима рентгенографирования процесса сжатия гелия в эксперименте предварительно проведено тестирование нового устройства в начальной фазе его работы, когда влиянием газа можно пренебречь. Данные о динамике движения наружных и внутренних каскадов, использованные при выборе уравнений состояния элементов конструкции, получены в эксперименте с полусферическим макетом, моделирующим экспериментальное устройство. Макет (см. рис. 2) состоит из нагружающего устрой-

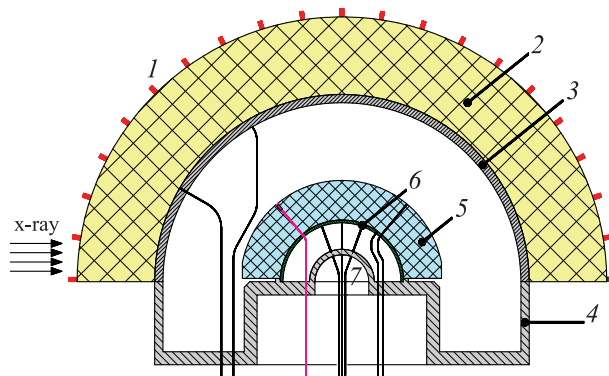


Рис. 2. (Цветной онлайн) Общий вид полусферического устройства: 1 – точки инициирования электродетонатора; 2 – ВВ; 3 – стальная оболочка (Fe); 4 – корпус; 5 – капролоновая оболочка (K); 6 – оболочка из ВНЖ-95 (W); 7 – измерительный приемник, черные линии – ЭКД, красная линия – PDV-датчик

ства (2) и полусферической камеры (3) из стали, вклеенной в стальной корпус (4), на котором размещены полусферическая оболочка из капролона (5) с оболочкой из ВНЖ 95 (6) и измерительный приемник с электроконтактными датчиками (7).

В эксперименте регистрировали: 1) времена выхода ударной волны (УВ) на внешнюю (t_1) и внутреннюю (t_2) границу оболочки (3) с использованием электроконтактных датчиков (ЭКД) (12 датчиков на наружной поверхности оболочки и 12 на внутренней); 2) времена выхода УВ на границы капролоновой оболочки (5) (8 ЭКД на наружной поверхности оболочки (t_3) и 12 ЭКД на внутренней (t_4)); 3) времена выхода УВ на внутреннюю границу ВНЖ-оболочки (ВГО) (t_5) (12 ЭКД); 4) скорость движения

оболочки (3) с использованием PDV-датчиков (4 датчика); 5) методом импульсной рентгенографии движение оболочек (3) и (6) на три момента времени.

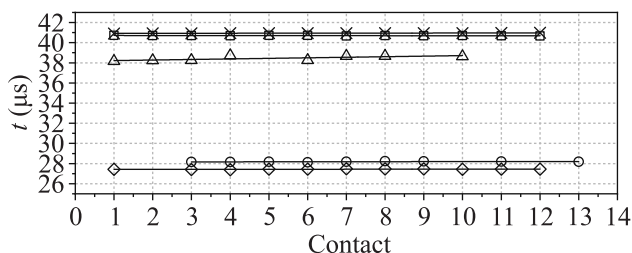


Рис. 3. Время движения ударной волны по оболочкам: $\diamond$ – $t_1 = (27.44 \pm 0.05)$ мкс, $\circ$ – $t_2 = (28.19 \pm 0.05)$ мкс, $\triangle$ – $t_3 = (38.45 \pm 0.29)$ мкс, $\square$ – $t_4 = (40.69 \pm 0.03)$ мкс, $\times$ – $t_5 = (40.95 \pm 0.03)$ мкс

Данные с электроконтактных датчиков, регистрирующих приход УВ на границы оболочек 3, 5 и 6, указывающие на хорошую симметрию движения ударной волны, показаны на рис. 3, там же сплошными линиями обозначены усредненные значения. Времена отсчитывали от прихода инициирующего импульса на электродетонатор (ЭД) (1).

Регистрацию скорости движения стальной оболочки (3) осуществляли с помощью аппаратного комплекса [13] на основе методики лазерно-оптического интерферометра [14]. Диаграммы скорости движения оболочки (3) по данным с четырех PDV-датчиков приведены на рис. 4. Все диаграммы практически совпали. Макси-

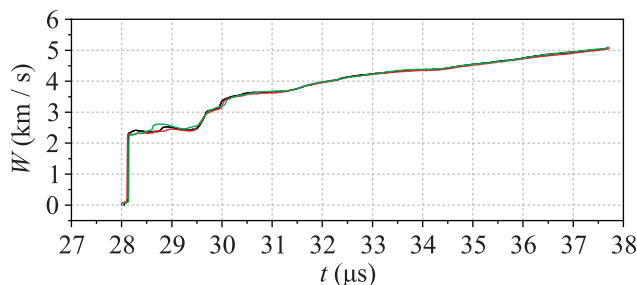


Рис. 4. (Цветной онлайн) Диаграммы (4 трека) скорости ВГО стальной оболочки экспериментального устройства (PDV-датчики)

мальная скорость стальной оболочки составила $V = (5.0 \pm 0.02)$ км/с. В результате усреднения сигналов с PDV-датчиков вычислено время начала движения стальной оболочки ($r_{01} = 97.1$ мм) – $t_0 = 28.041$ мкс и рассчитана $R(t)$ -траектория ее движения (см. ниже). Амплитудная и временная погрешности регистрации аппаратным комплексом [13] составляют 20 м/с и 10 нс соответственно.

Как и в работе [7], методом импульсной рентгенографии зарегистрировано положение стальной и вольфрамовой оболочек на три момента времени. Типичная рентгенограмма положения стальной и вольфрамовой оболочек на один из моментов времени движения $t_\gamma = 41.61$ мкс показана на рис. 5. Для регистрации изображения оболочек использова-

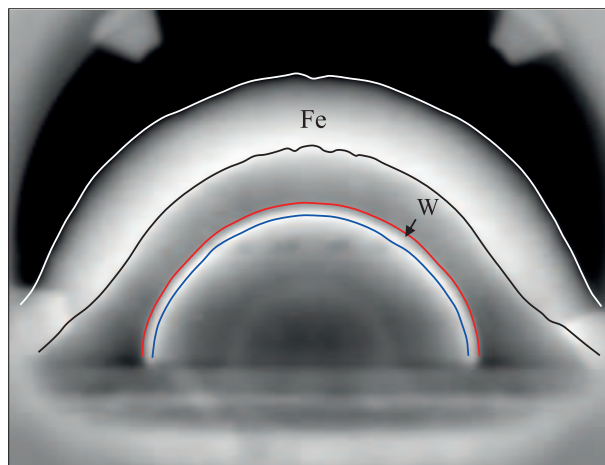


Рис. 5. (Цветной онлайн) Рентгенограмма оболочек (W) и (Fe) (см. рис. 1) в эксперименте и результаты трассировки их границ. Результаты функциональной трассировки: наружная граница стальной оболочки (НГО) – белая линия, ВГО из стали – черная, НГО из ВНЖ-95 – красная, ВГО из ВНЖ-95 – синяя

ли пакеты из 10 фотохромных ADC-экранов на основе галогенида бария, активированного европием. Для увеличения квантовой эффективности регистрации экраны были проложены свинцовыми пластинами толщиной ≈ 1 мм. На том же рисунке применен функциональный метод трассировки контуров оболочек, описанный в работе [15]. Суть данного метода заключается в экс-траполяции приграничных функций, лежащих слева и справа от границы, с целью нахождения точки их пересечения, которая и принимается за координату границы. Сводные данные по радиусам границ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты трассировки границ оболочек (W) и (Fe) (см. рис. 1)

t , мкс	r_{02} , мм	R_{02} , мм	r_{01} , мм	R_{01} , мм
41.62	29.47	31.91	42.56	56.91
42.81	20.20	24.86	39.05	54.62
43.60	11.38	19.00	36.67	53.65

3. Квазиизэнтропическая сжимаемость гелия. Данные, полученные на этапе предварительного эксперимента с полусферическим макетом, были

использованы при выборе времен регистрации полостей в опыте по измерению сжимаемости плазмы гелия. Схема эксперимента приведена на рис. 6. Экс-

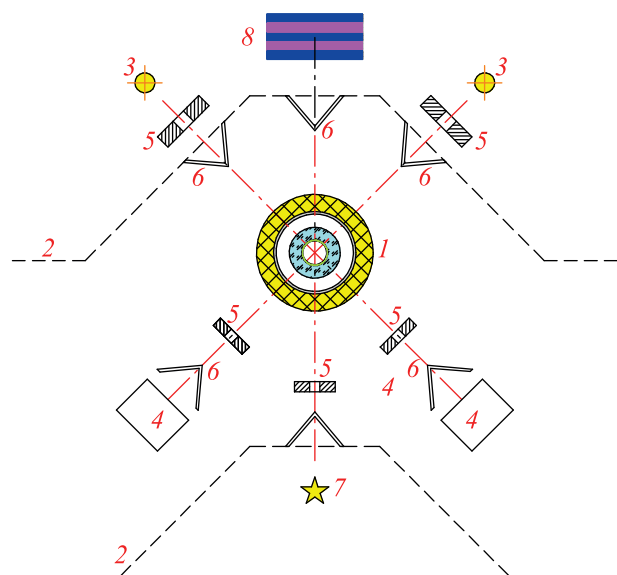


Рис. 6. (Цветной онлайн) Схема эксперимента: 1 – экспериментальное устройство; 2 – защитные сооружения; 3 – источники излучения (бетатроны); 4 – детекторы; 5 – коллиматоры (свинец); 6 – конусы (алюминий); 7 – линейный сильноточный ускоритель ЛИУ-Р-Т; 8 – набор фотохромных экранов

периментальное устройство (1) размещается между двумя бетонными сооружениями (2), в которых находятся источники рентгеновского излучения. В эксперименте использованы два импульсных бетатрона (3) БИМ234.3000 [11], работающие в режиме последовательной генерации трех импульсов рентгеновского излучения, и линейный индукционный ускоритель ЛИУ-Р-Т (7) (см. рис. 6). Использование ЛИУ-Р-Т, который по своим техническим характеристикам в оптимальном режиме позволяет просвечивать объекты с массовой толщиной до 300 г/см^2 , связано с ожидаемо высокой плотностью сжатой плазмы гелия в эксперименте $\rho \approx 15 \text{ г/см}^3$. В качестве регистратора рентгеновского излучения ЛИУ-Р-Т использован пакет из 10 фотохромных экранов (8).

Для заполнения камеры гелием использовали термокомпрессор. Величина давления газов в процессе заполнения измерялась датчиком с классом точности 0.25. Начальная температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, расположенной внутри трубопровода, использованного для напуска газа. Для определения начальной плотности гелия использовали табличные данные

[16]. Семь экспериментальных рентгенограмм, зарегистрированных в опыте, приведены на рис. 7 и демонстрируют высокую симметрию сжатых полостей с плазмой гелия.

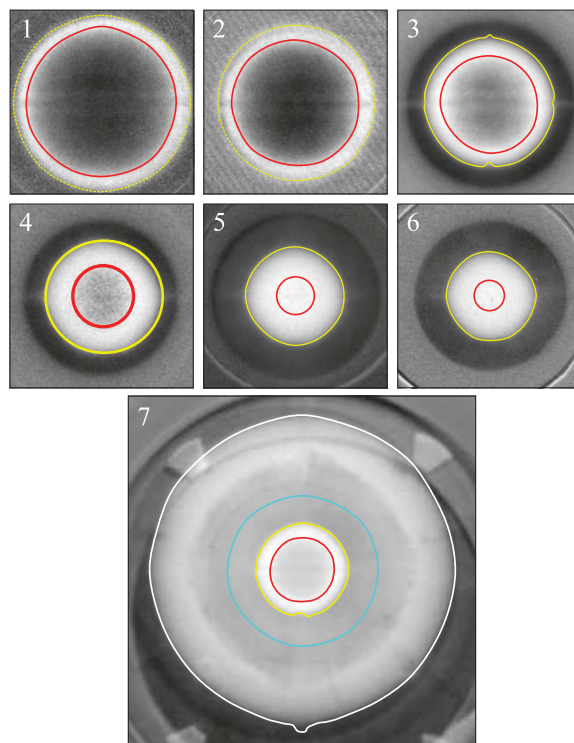


Рис. 7. (Цветной онлайн) Экспериментальные рентгенограммы: 1 – $t = 43.00 \text{ мкс}$; 2 – $t = 43.38 \text{ мкс}$; 3 – $t = 43.78 \text{ мкс}$; 4 – $t = 44.12 \text{ мкс}$; 5 – $t = 44.44 \text{ мкс}$; 6 – $t = 44.80 \text{ мкс}$; 7 – $t = 44.88 \text{ мкс}$

Для трассировки контуров сферических оболочек применен функциональный метод. Результаты трассировки границ оболочек приведены на рис. 7. Характеристика устройства, условия проведения опыта и полученные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристика устройства (см. рис. 1) и результаты опыта. Параметры гелия в исходном состоянии: ρ_0 , P_0 , T_0 – начальные плотность, давление, температура газа. Начальное давление гелия в обеих полостях одинаково. Параметры гелия при максимальном сжатии: $R_{\min}$ – радиус остановки устройства; ρ_{exp} , P_{calc} , T_{calc} – средневзвешенные расчетные плотность, давление и температура

r_{02} , см	P_0 , ГПа	ρ_0 , г/см ³	T_0 , К
3.2	0.0197	0.0292	296.5
$R_{\min}$, см	ρ_{exp} , г/см ³	P_{calc} , ГПа	T_{calc} , кК
0.410	13.9	19700	146

Экспериментальные $R(t)$ данные по сжимаемости плазмы гелия приведены на рис. 8 вместе с результа-

тами, полученными из эксперимента при газодинамическом моделировании. На том же графике приведены и результаты газодинамического расчета.

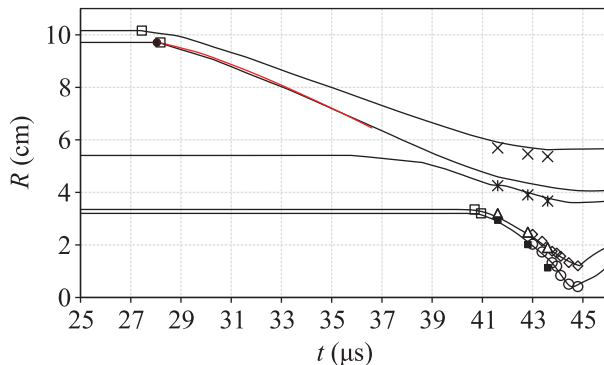


Рис. 8. (Цветной онлайн) Сравнение экспериментальных и рассчитанных $R(t)$ -данных движения границ элементов экспериментального устройства. Модельный эксперимент: $\square$ – данные ЭКД, $\bullet$ – данные с PDV-датчиков; данные рентгенографирования: $\times$ – НГО (Fe), $*$ – НГО (капролон), $\triangle$ – НГО (ВНЖ-95), $\blacksquare$ – ВГО (ВНЖ-95). Из основного эксперимента для ВНЖ-оболочки: $\circ$ – ВГО, $\diamond$ – НГО; красная сплошная линия – траектория движения ВГО для Fe-оболочки (PDV-датчики). Сплошные черные линии – газодинамический расчет

Из графика на рис. 8 видно, что газодинамические расчеты с использованием выбранной тактики счета хорошо описывают все контрольные точки (p_1, p_2, p_3) движения УВ по стальной оболочке первого каскада (Fe1), приход УВ на ВНЖ-оболочку, а также измеренные рентгенографическим методом значения границ оболочек экспериментального устройства. Данные расчета воспроизводят также динамику движения внутренней границы Fe-оболочки, зарегистрированную методом гетеродин-интерферометра из эксперимента настоящей работы с полусферическим макетом и положения границ ВНЖ-оболочки.

Расчеты траекторий движения оболочек, распределений плотности, давления и температуры по радиусу сжатой полости гелия выполнены по одномерной газодинамической программе [17], с учетом реальных термодинамических и прочностных свойств всех элементов экспериментального устройства и их уравнений состояния, введенных в расчетный комплекс ВНИИЭФ, и неоднократно представленных в работах [1–10]. Полученный в данной работе результат в координатах P – ρ приведен на рис. 9 вместе с другими данными ВНИИЭФ.

В результате проведенного эксперимента зарегистрирован минимальный радиус сжатой полости с

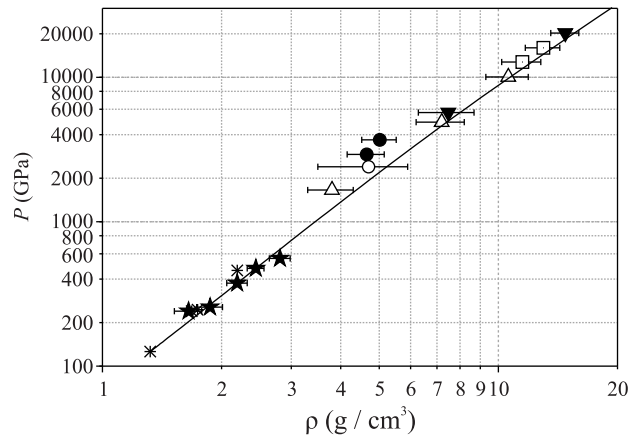


Рис. 9. Квазиизэнтропическая сжимаемость плазмы гелия в области давлений до 20 ТПа. Эксперимент: $\blacktriangledown$ – настоящая работа; $\triangle$ – [1, 3, 6]; $\bullet$ – [4]; $\circ$ – [9]; $\square$ – [7]; $*$ – [8]; $\star$ – [10]. Сплошная черная линия – изэнтропа $S/R = 16$

плазмой гелия $R_{\min} = 0.410$ см в момент времени $t_{\text{stop}} = 44.8$ мкс. Измеренный радиус отличается от рассчитанного $R_{\text{calc}} = 0.407$ см на момент “остановки” на 1.22 %. Экспериментальному радиусу сжатой полости с плазмой гелия $R_{\min} = 0.410$ см соответствует плотность гелия $\rho_{\text{exp}} = 13.9$ г/см³, которая на 7 % отличается от рассчитанного значения $\rho_{\text{calc}} = 14.34$ г/см³. Рассчитанное на момент максимального сжатия давление в плазме сжатого гелия имеет значение $P_{\text{calc}} = 19700$ ГПа при температуре $T = 146$ кК. Основным критерием истинности получаемого в расчетах давления можно считать удовлетворительное описание всех $R(t)$ траекторий движения оболочек экспериментальных устройств, что имеет место в настоящей работе.

Закключение. В данной работе представлен результат исследования сжимаемости гелия, полученный с использованием комбинированной сферической оболочки с контрастирующим слоем из сплава ВНЖ-95. Проведено газодинамическое исследование предложенной конструкции на макете с целью получения данных о динамике движения наружных и внутренних границ каскадов устройства для подбора моделей расчета конструкции и дальнейшего использования подобных оболочек в экспериментах с другими газами в мегабарной области давлений.

В результате исследований, проведенных в данной работе, плазма гелия была сжата до плотности $\rho_{\text{exp}} = 13.9$ г/см³ давлением $P \approx 20$ ТПа при температуре $T = 146000$ К, что, на данный момент времени, является рекордным достижением.

Авторы выражают благодарность сотрудникам, принявшим участие в организации, проведении

экспериментов и обработке полученных результатов: Е. В. Кулакову, А. С. Пупкову, А. В. Романову, Д. П. Турутину, А. И. Гуркину, М. В. Логинову, Д. А. Линяеву, Г. С. Яндубаеву, В. В. Ерастову, В. В. Ковалдову, С. А. Финюшину, Е. А. Чудакову.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации “Росатом” по программе РТТН (проект “Исследование теплофизических свойств веществ при сжатии до рекордно высоких давлений и магнитных полей”) и в рамках научной программы Национального центра физики и математики по Государственному контракту # Н.4ц.241.4Д.23.1085.

1. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, 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).
2. 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, Письма в ЖЭТФ **96**, 172 (2012).
3. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др. (Collaboration), ЖЭТФ **146**, 169 (2014).
4. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, В. А. Комраков, А. В. Рыжков, В. А. Огородников, А. А. Юхимчук, Письма в ЖЭТФ **101**, 575 (2015).
5. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, С. Е. Елфимов, В. А. Комраков, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, ЖЭТФ **152**, 1113 (2017).
6. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, А. В. Рыжков, В. А. Огородников, В. А. Комраков, И. П. Максимкин, Письма в ЖЭТФ **108**, 692 (2018).
7. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др. (Collaboration), ЖЭТФ **160**, 735 (2021).
8. М. В. Жерноклетов, В. К. Грязнов, В. А. Аринин, В. Н. Бузин, Н. Б. Давыдов, Р. И. Ильяев, И. Л. Иосилевский, А. Л. Михайлов, М. Г. Новиков, В. В. Хрусталева, В. Е. Фортов, Письма в ЖЭТФ **96**, 479 (2012).
9. М. В. Жерноклетов, В. А. Раевский, С. Ф. Маначкин, Н. Б. Давыдов, К. Н. Панов, А. В. Рыжков, В. А. Аринин, Б. И. Ткаченко, А. И. Логвинов, В. А. Комраков, А. И. Давыдов, Н. Н. Анашкин, ФГВ **5**, 13 (2018).
10. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др. (Collaboration), ЖЭТФ **163**, 439 (2023).
11. Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov et al. (Collaboration), in *11th IEEE Pulsed Power Conf., Digest of Technical Papers*, ed. by G. Cooperstein and I. Vitkovitsky, Baltimor, Maryland, USA (1997), p. 1669.
12. В. Ф. Басманов, В. С. Гордеев, А. В. Гришин, Н. В. Завьялов, Г. А. Мысков, С. Т. Назаренко, Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ **20**, 172 (2015).
13. Е. А. Чудаков, А. В. Федоров, С. А. Финюшин, Д. А. Калашников, И. С. Гнутов, И. В. Шмелев, Л. К. Антонюк, Патент # 2657135 РФ МПК G01P 3/36. Заявлено 27.07.2017. Опубликовано 08.06.2018. Бюлл. # 16.
14. O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez, T. L. Whitworth, and W. W. Kuhlow, Rev. Sci. Instrum. **77**, 083108 (2006).
15. V. A. Arinin and B. I. Tkachenko, Pattern Recognition and Image Analysis **19**, 63 (2009).
16. В. В. Сычев, А. А. Вассерман, А. Д. Козлов, Г. А. Спиридонов, В. А. Цымарный, *Термодинамические свойства гелия*, ГСССД, Изд-во стандартов, М. (1984).
17. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин, В. Н. Софронов, ВАНТ, Сер.: Методики и программы, численные решения задач математической физики **3**, 11 (1982).