

КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ГЕЛИЯ ПРИ ПОСТОЯННОЙ КОНЕЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ 21000 К ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 600 ГПа

М. А. Мочалов^{a,b}, Р. И. Илькаев^a, **В. Е. Фортков**^c, С. В. Ерунов^{a,b}, В. А. Аринин^a,
А. О. Бликов^{a,b*}, В. А. Огородников^{a,b}, А. В. Рыжков^a, В. А. Комраков^a, А. Е. Ковалев^a,
М. Г. Новиков^{a,b}, И. П. Максимкин^a, С. А. Финюшин^a, Е. А. Чудаков^{a,b}, М. И. Лихутов^a,
В. К. Грязнов^d, И. Л. Иосилевский^c, П. Р. Левашов^c, Д. В. Минаков^c, М. А. Парамонов^c

^a Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия

^b Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603950, Нижний Новгород, Россия

^c Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
125412, Москва, Россия

^d Институт проблем химической физики Российской академии наук
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 15 августа 2022 г.,
после переработки 26 сентября 2022 г.
Принята к публикации 26 сентября 2022 г.

Представлены данные по квазиизэнтропической сжимаемости сильно неидеальной плазмы гелия в области давлений 250–600 ГПа в устройствах цилиндрической геометрии. Измерена температура на фронте цилиндрической ударной волны в гелии $T \approx 10000$ К и скорость полета внутреннего каскада $W \approx 3.5$ км/с, в полости которого и достигается максимальная плотность сжатой плазмы. Получены данные о сжатии неидеальной плазмы гелия до плотности $\rho \approx 3$ г/см³ при приблизительно постоянной конечной температуре 21000 К. Траектории движения металлических оболочек, сжимающих плазму, регистрировались с помощью мощных импульсных источников рентгеновского излучения с граничной энергией электронов до 60 МэВ. Плотность плазмы гелия определялась по измеренному значению радиуса оболочек в момент их «остановки». Давление сжатой плазмы получено на основе газодинамических расчетов. Проведены сравнительные теоретические расчеты параметров квазиизэнтропического сжатия по двум теоретическим моделям: традиционной химической модели плазмы (код SANA) и в рамках подхода *ab initio* — квантовой молекулярной динамики (QMD). Аномалия экспериментальных данных в области давлений теоретически предполагаемого плазменного фазового перехода в гелии не зарегистрирована.

DOI: 10.31857/S004445102303015X
EDN: QFMCVVP

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию свойств неидеальной плазмы гелия во многом связан с многочисленными предсказаниями существования в плотном и горячем флюиде гелия аномалий типа необычных «плазменных» (ionization-driven) фазовых перехо-

дов (ПФП). Следует подчеркнуть, что проблема существования ПФП в неидеальной плазме гелия интересна не только сама по себе, но и в важном для астрофизики аспекте свойств плотных и горячих смесей гелия с водородом, где к собственно проблеме ПФП добавляется проблема специфических особенностей таких переходов, т. е. возможности расслоений на фазы с различающимся химическим составом [1]. Более простая задача расчета параметров ПФП в плотной горячей смеси гелия с водородом во

* E-mail: mcleodjr@mail.ru

всем диапазоне пропорций He/H_2 , но без учета этих особенностей решалась еще в работе [2].

Теоретические предсказания свойств плазменных фазовых переходов в гелии достаточно многочисленны. До недавнего времени эти предсказания в основном использовали химическую модель плазмы, называемую также иногда методом минимизации свободной энергии [3]. При этом предсказания ПФП в плазме гелия делались как в варианте единого ПФП с одномоментной двукратной ионизацией ($\text{He} \leftrightarrow \text{He}^{++} + 2e^-$) [4], так и в варианте двух последовательных ПФП раздельно на первой и второй стадиях ионизации гелия [2, 5–8]. В работах [5, 8] показана возможность ионизационного фазового перехода первого рода в гелиевой плазме при средней плотности ядер 10^{22} – 10^{23} см^{-3} и температуре $T \leq 50000$ К. Несколько меньшая температура фазового перехода с однократной ионизацией гелия была предсказана при $T \approx 28500$ К в модели [6]. В работе [9] металлизация гелия предсказана при плотности $\rho \approx 5.3$ $\text{г}/\text{см}^3$. Различными авторами на основе расчетов зонной структуры были получены значения давления металлизации гелия от 300 до 20000 ГПа [10–13]. Современные расчеты, реализованные в рамках строгого подхода *ab initio* (DFT/MD) [14], предсказывают металлизацию в плотном жидком гелии в диапазоне давлений $P = 10000$ – 20000 ГПа.

Возвращаясь к обзору предсказаний ПФП в рамках химической модели плазмы, отметим прежде всего работы [5, 7, 8], где с использованием в расчетах метода суммарного химического потенциала предсказан двухстадийный сценарий ПФП, состоящий из двух фазовых переходов, начинающихся соответственно из двух тройных точек с параметрами $T_1 \approx 1000$ К и $P_1 \approx 200$ ГПа (ПФП-1) и $T_2 \approx 4000$ К и $P_2 \approx 3000$ ГПа (ПФП-2). Оба перехода заканчиваются критическими точками C_1 и C_2 с параметрами $T_{C_1} \approx 35000$ К, $P_{C_1} \approx 660$ ГПа и $\rho_{C_1} \approx 2.13$ $\text{г}/\text{см}^3$ (ПФП-1) и $T_{C_2} \approx 120000$ К, $P_{C_2} \approx 10000$ ГПа и $\rho_{C_2} \approx 10$ $\text{г}/\text{см}^3$ (ПФП-2). Авторы работы [2] рассчитали в гелии параметры ПФП с однократной ионизацией гелия и относительно высокими параметрами участка $P(T)$ -границы ПФП примерно между начальной точкой ($T \approx 4000$ К, $P \approx 550$ ГПа) и критической точкой ($T_C \approx 20000$ К, $P_C \approx 800$ ГПа). Так же далеко находится гипотетическая граница единого ПФП с двукратной ионизацией, предсказанная в теоретической модели работы [4]. Согласно [4], эта граница приближенно соответствует участку изохоры $\rho \approx 10$ $\text{г}/\text{см}^3$ с температурой от $T \approx 20000$ К до $T \approx 100000$ К.

В последние годы во ВНИИЭФ удалось продвинуться в диапазон мегабарных давлений, используя метод квазиизэнтропического сжатия газов в двухкаскадных устройствах цилиндрической и сферической геометрий. В экспериментах с гелием при равном начальном давлении газа в обоих каскадах около 25 МПа свойства плазмы гелия, сжатой до плотности примерно 8 $\text{г}/\text{см}^3$ в области давлений до 4800 ГПа, исследовались в работах [15–18]. Согласно расчетам, проведенным в рамках химической модели плазмы [3, 19], полученные состояния сильно неидеальной плазмы гелия при давлении $P \approx 4800$ ГПа характеризуются высокими значениями параметра кулоновской неидеальности $\Gamma_D \approx 20$ и параметра вырождения электронов $n_e \lambda_e^3 \approx 20$ (λ_e — тепловая длина волны де Бройля для электрона).

В экспериментах [18, 20] с использованием двухкаскадной сферической камеры с разделенными полостями при соотношении начального давления газа во внешней и внутренней полостях двухкаскадной сферической конструкции 9 : 1 исследованы свойства квазиизэнтропически сжатой плазмы гелия при высоких степенях сжатия до 900 раз. Выбранные значения начальных давлений гелия позволили обеспечить размер сжатой полости, доступный для его регистрации на рентгенографическом оборудовании ВНИИЭФ, и реализовать высокую степень сжатия плазмы. В эксперименте [21] с использованием сферической двухкаскадной камеры и заряда ВВ с массой $M \approx 85$ кг в тротиловом эквиваленте неидеальная плазма гелия сжата до плотности $\rho \approx 9$ $\text{г}/\text{см}^3$ давлением $P \approx 10000$ ГПа, а в эксперименте [22] — до плотности $\rho \approx 13$ $\text{г}/\text{см}^3$ давлением $P \approx 16700$ ГПа.

Анализ опубликованных данных показывает, что все результаты со сферическими устройствами из работ [15–18, 20–22] расположены на P – T -диаграмме гелия в области однократно ионизованной плазмы выше критической точки ПФП-1 [7], а результаты опытов с цилиндрическими конструкциями с гелием из [23] расположены ниже $P(T)$ -границы ПФП-1. Таким образом, до настоящего времени области состояний гелия, где предсказываются плазменные фазовые переходы ПФП-1 и ПФП-2 [7], оставались недоступными для исследователей.

В настоящей работе представлены конструкции новых двухкаскадных цилиндрических устройств, которые позволили при постоянной конечной температуре $T \approx 21000$ К исследовать свойства квазиизэнтропически сжатого гелия в диапазоне давлений 200–600 ГПа, который включает в себя и область теоретически предполагаемого [7] ПФП-1

($P \approx 400$ ГПа при $T \approx 20500$ К). Полученные данные позволили проверить гипотезу о возможных изменениях в сжимаемости плазмы гелия в области гипотетического плазменного перехода ППП-1.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования сжимаемости гелия в экспериментах настоящей работы использованы конструкции цилиндрической геометрии [24, 25], в том числе со стержнем из стали в центре, позволяющие реализовать равномерный профиль давления по радиусу в плазме сжатого вещества. Сжатие образующейся плазмы в таких устройствах осуществляется системой ударных волн (УВ), циркулирующих в ее объеме, и стальных оболочек, сходящихся к центру под действием продуктов взрыва (ПВ) мощного конденсированного взрывчатого вещества (ВВ). Этот процесс получил название квазиизэнтропического, так как после прохождения первой УВ дальнейшее сжатие плазмы происходит при существенно меньшем нагреве, чем в случае однократного сжатия, и при более длительном удержании вещества в сжатом состоянии. Целью такого эксперимента является регистрация $R(t)$ -траектории движения оболочек нагружающего устройства и определение размера внутреннего каскада в момент его «остановки», когда достигается максимальное сжатие исследуемого вещества. Особенность конструкций [24, 25] состоит в возможности локализации металлогазовой смеси, возникающей при выбросе частиц металлической пыли [26, 27], что не позволяет ей проникать во внутреннюю полость, где измеряется сжимаемость исследуемой плазмы. Для снижения возмущений от системы инициирования в таких устройствах между ВВ и цилиндрическим устройством использовали прокладку из оргстекла с электроконтактными датчиками на ее границах для контроля за движением УВ.

Схема экспериментов неоднократно приводилась в наших работах, см, например, [24, 25]. Для регистрации положения оболочек, сжимающих исследуемое вещество, использовано жесткое рентгеновское излучение трех бетатронов БИМ234.3000 [28] с граничной энергией электронов 60 МэВ, позволяющих просвечивать объекты с массовой толщиной до 230 г/см^2 , что примерно эквивалентно толщине 20 см свинца. Экспериментальное устройство с гелием размещалось перед бетонным сооружением, в котором смонтированы бетатроны. Особенностью бетатронов ВНИИЭФ является их возможность работать в режиме последовательной генера-

ции трех импульсов рентгеновского излучения длительностью 150–180 нс. Это позволяет в эксперименте зарегистрировать одновременно до девяти фаз сжатия плазмы. В опытах использована оптико-электронная система детектирования, которая активируется синхронно с импульсами бетатрона. В качестве преобразователей рентгеновского излучения в видимое использованы монокристаллы йодистого натрия и силикат лютеция. Для устранения влияния рассеянного излучения на высокочувствительные детекторы размер поля регистрации в каждой из проекций ограничен свинцовыми коллиматорами. Для защиты бетатронов и оптико-электронных регистраторов рентгеновского излучения применены алюминиевые конусы.

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} — внутренние радиусы оболочки в исходном состоянии и в момент ее «остановки» соответственно, $n = 2$ для цилиндрической геометрии. Давление сжатой плазмы гелия получено на основе газодинамических расчетов, учитывающих реальные характеристики экспериментальных устройств.

Характеристики устройств и условия проведения опытов приведены в табл. 1. Геометрия экспериментальных устройств показана на рис. 1.

Заполнение камеры гелием производилось от термокомпрессора. Величина давления в процессе заполнения измерялась датчиком с классом точности 0.25. Температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, расположенной внутри трубопровода, использованного для напуска газов. Давление газа He1 и He2 в полостях оболочек 1 и 2 было одинаковым. Окончательно плотность гелия вычислялась с учетом его сжимаемости на основании известных табличных данных [29].

В данной работе геометрия экспериментальных устройств выбиралась таким образом, чтобы получить равномерный профиль давления по радиусу, $P(R)$, при максимальном сжатии плазмы гелия. Для снижения кумуляции энергии в эксперименте №1 в конструкции работы [25] вдоль оси установлен металлический цилиндрический стержень. При наличии стержня отраженная УВ формируется на границе R^* , где R^* — радиус стержня. Тем самым уменьшается амплитуда отраженной УВ, снижается геометрическая кумуляция энергии и выравнивается распределение давления по радиусу полости со сжатой плазмой. Металлический стержень с начальным

Таблица 1. Характеристики устройств и условия проведения опытов. Здесь M_{expl} — масса ВВ, T_0 — температура газа, P_0 — давление, ρ_0 — плотность

№ опыта	$R_{орг}$, мм	M_{expl} , кг	R^* , см	r_{02} , см	R_{02} , см	T_0 , °C	P_0 , атм	ρ_0 , г/см ³
1	100	24	0.45	4.1	4.5	25.6	255.7	0.0363
2	122.5	18	—	3.0	3.4	19.6	245.5	0.0361
3	100	24	—	3.0	3.4	6.3	236.6	0.0359
4	100	24	—	3.4	3.78	22.25	243.6	0.0356
5	93.5	22	—	5.0	5.4	10.3	255	0.0378

Примечание. Здесь прочерк означает отсутствие стального стержня в конструкциях. Масса ВВ указана в тротиловом эквиваленте. В опыте №4 внутренняя оболочка изготовлена из сплава ВНЖ-95 (95% вольфрама, 3.5% никеля и 1.5% железа).

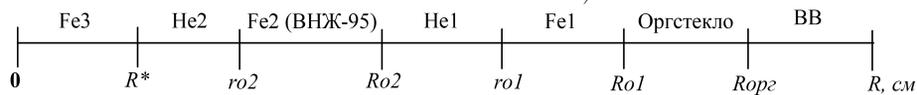


Рис. 1. Геометрия цилиндрического экспериментального устройства в экспериментах с гелием. Здесь R^* — радиус стального стержня, $r_{01} = 7.1$ см и $R_{01} = 7.5$ см — внутренний и наружный радиусы оболочки первого каскада (Fe1) соответственно, r_{02} и R_{02} — радиусы оболочки второго каскада (Fe2), $R_{орг}$ — внешний радиус оболочки из оргстекла, 1 и 2 — состояния гелия в наружной и внутренней полостях устройства соответственно

радиусом $R^* = 0.45$ см изготовлен из стали. В последующих экспериментах №2, №3, №4 и №5 стержень отсутствовал, а задача создания равномерного профиля давлений в сжатой плазме гелия решалась путем тщательного расчетного выбора геометрии экспериментальных устройств.

Впервые в практике подобных исследований в эксперименте №5 использована конструкция из работы [25], внутри которой (рис. 2) разместили оптоволоконно диаметром 400 мкм (1) для регистрации излучения с фронта цилиндрической УВ, PDV-датчик (2) для измерения скорости движения границы внутренней оболочки цилиндрического устройства и минизеркала (3) диаметром 5 мм для передачи информации в каждом канале регистрации.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Опыт №1. В опыте зарегистрированы 9 фаз сжатия гелия. Типичные изображения сжатых полостей в четыре момента времени приведены на рис. 3. Там же показаны результаты трассировки сжатой полости с гелием. Обработка экспериментальных рентгенограмм выполнена функциональным методом из работы [30]. Здесь и далее времена отсчитываются от подрыва детонаторов нагружающего устройства.

Расчет характеристик экспериментальных устройств выполнен по одномерной газодинамической программе [31], предназначенной для численного моделирования неустановившихся

движений сплошной среды, тестированной по экспериментальным данным, полученным в России и за рубежом. В расчетах устройств гелий описывали табличным уравнением состояния (УРС) Хрусталева из библиотеки обменного фонда ВНИИЭФ.

Для всех областей железа использовали

- УРС ОСА [32] с откольной прочностью $\sigma_x = -4$ ГПа (хрупкий откол);
- дислокационную модель [33] с параметрами $C_t = 2.235$, $t_0 = 0.4$, $\tau_0 = 1.9$, $a = 30000$, $H = 0$.

Однофазное УРС железа [32] хорошо описывает ударную адиабату, но сглаживает фазовый $\alpha - \varepsilon$ -переход первого рода при $P \approx 13$ ГПа. Расчеты с учетом фазового перехода в железе по УРС из работы [34] не привели к существенному изменению результатов. Область ВВ–ПВ описывали упрощенным уравнением состояния в форме Зубарева [35].

Сравнение экспериментальных данных, полученных в опыте №1, и $R(t)$ -траекторий, рассчитанных с использованием для гелия УРС ВНИИЭФ, показано на рис. 4а. Фрагмент $R(t)$ -диаграмм вблизи момента максимального сжатия приведен на рис. 4б, на котором, как и ранее [36], показана также структура двадцати УВ, циркулирующих в плазме гелия и стальном стержне.

Подбор параметров расчетной схемы экспериментальной конструкции для этого и последующих экспериментов проводился по результатам тестирования движения УВ с помощью электроконтакт-

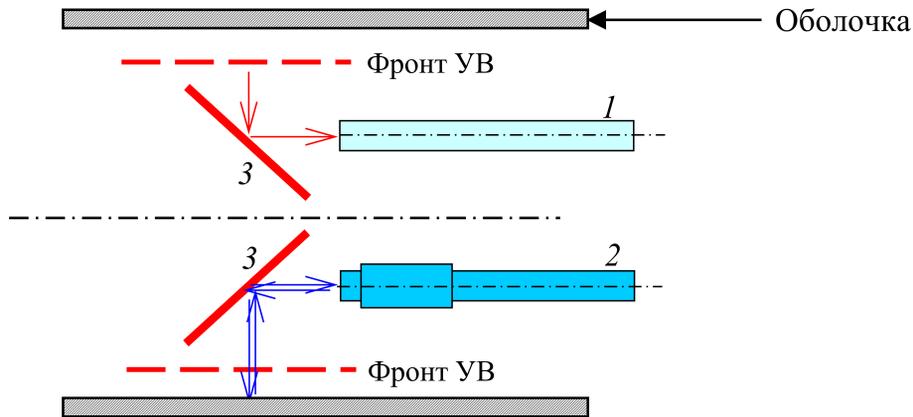


Рис. 2. Схема регистрации свечения фронта УВ и скорости движения границы оболочки:

1 — оптоволокно; 2 — PDV-датчик; 3 — зеркала

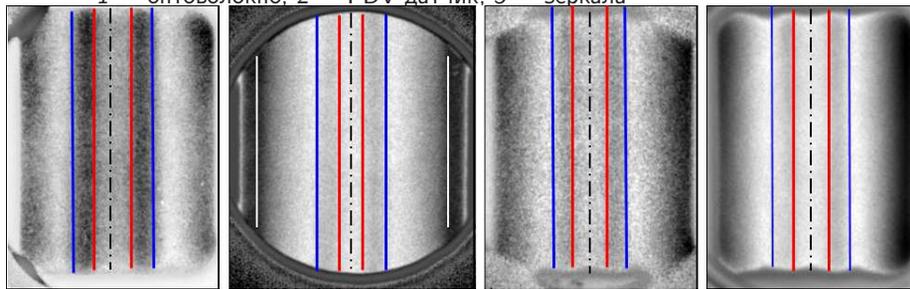


Рис. 3. (В цвете онлайн) Типичные рентгенограммы и результаты трассировки оболочек с плазмой гелия в эксперименте №1: красные линии — границы стержня (сталь); синие — внутренняя граница оболочки второго каскада (ВГО-2); белые — наружная граница оболочки второго каскада (НГО-2)

ных датчиков, расположенных на границах оболочки из оргстекла (точки в виде светлых квадратиков). На рис. 4а видно, что расчет с использованием выбранной тактики счета хорошо описывает контрольные точки (р. 1 и р. 2) движения УВ по оболочке из оргстекла и стальной оболочке первого каскада Fe1, а также измеренные рентгенографическим методом значения радиусов границ внешней и внутренней оболочек второго каскада Fe2 экспериментального устройства. Данные расчета воспроизводят также динамику границы оболочки стального стержня Fe3. На рис. 4б видно, что первая УВ в момент времени F достигает центра устройства и отражается, а в момент K контакта отраженной УВ с внутренней границей оболочки Fe2 плазма оказывается уже дважды (квазиизэнтропически) сжатой. С учетом дополнительного сжатия плазмы оболочкой, кумуляции термодинамических параметров за фронтом сходящейся УВ и ее поглощения последующими волнами на этапе движения к центру устройства, в некоторый момент времени между F и K начинается квазиизэнтропическое сжатие плазмы. Поэтому, начиная с состояния K и во все последующие моменты времени, получаемые эксперименталь-

ные данные можно отнести к результатам измерения квазиизэнтропической сжимаемости.

Для всех девяти фаз сжатия, зарегистрированных в опыте, были выполнены расчеты термодинамических параметров $P(R)$, $\rho(R)$ и $T(R)$ в плазме гелия, которые приведены в табл. 2.

Из анализа полученных данных следует, что примерно с четвертой фазы сжатия распределение давления в плазме гелия по радиусу становится практически равномерным вплоть до последней (9) фазы рентгенографирования. Рассчитанные профили давления $P(R)$ для фаз рентгенографирования 4–9 приведены на рис. 5.

Опыт №2. В данном эксперименте использовано двухкаскадное цилиндрическое устройство без центрального стержня. Сравнение экспериментальных и рассчитанных $R(t)$ -данных для этого эксперимента показано на рис. 6, а профиль давления при максимальном сжатии плазмы гелия — на рис. 7. В эксперименте №2 плазма гелия была сжата до плотности $\rho = 2.30 \text{ г/см}^3$ давлением $P = 376 \text{ ГПа}$ при температуре $T = 19700 \text{ К}$.

Таблица 2. Параметры плазмы гелия в различных фазах сжатия в эксперименте №1

№ фазы	t , мкс	R_{env} , см	R_{bar} , см	P , ГПа	ρ_{exp} , г/см ³	ρ_{calc} , г/см ³	T , К
1	47.34	1.077	0.437	23.08	0.62	0.66	7864
2	48.00	0.866	0.419	49.61	1.05	0.877	8078
3	48.43	0.743	0.379	127	1.48	1.390	15207
4	48.81	0.696	0.376	218	1.76	1.744	19220
5	49.20	0.673	0.361	256	1.87	1.880	20039
6	49.58	0.718	0.371	245	1.59	1.868	18746
7	49.94	0.729	0.375	216.5	1.54	1.778	17620
8	50.29	0.731	0.360	167	1.49	1.586	16102
9	50.59	0.81	0.388	138	1.19	1.466	14839

Примечание. R_{env} и R_{bar} — внутренний радиус оболочки второго каскада и радиус стержня соответственно

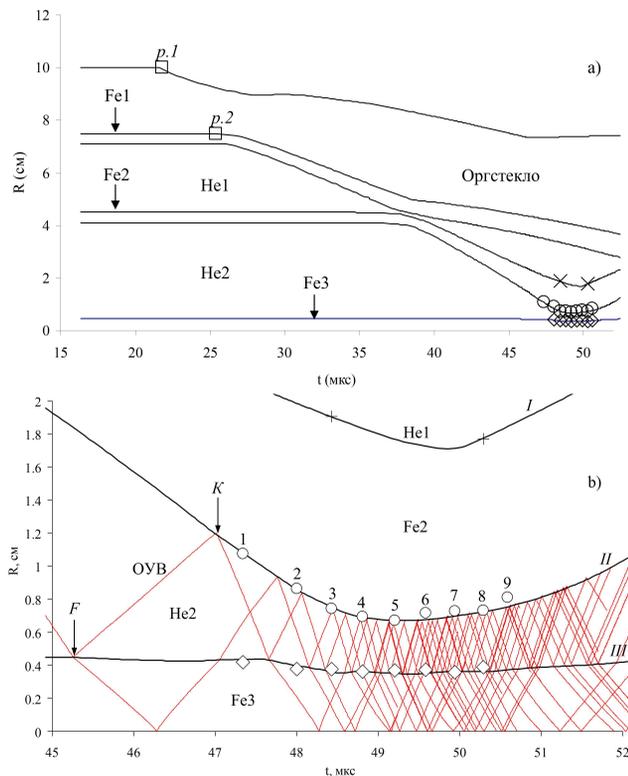


Рис. 4. а) Экспериментальные данные и рассчитанные $R(t)$ -диаграммы: □ — электроконтактная методика; ◇, ○, +, × — данные рентгенографического эксперимента; б) фрагмент $R(t)$ -диаграмм вблизи момента максимального сжатия: цифры 1–9 — фазы сжатия, расчеты НГО-2 (I), ВГО-2 (II) и наружной границы стального стержня Fe3 (III); F — фокусировка УВ; K — момент прихода отраженной УВ (ОУВ) на ВГО-2

Опыт №3. В данном эксперименте использовано то же двухкаскадное цилиндрическое устройство, как и в опыте №2, но с большей массой ВВ (см. табл. 1). Сравнение экспериментальных и рассчитанных $R(t)$ -данных для этого эксперимента показана

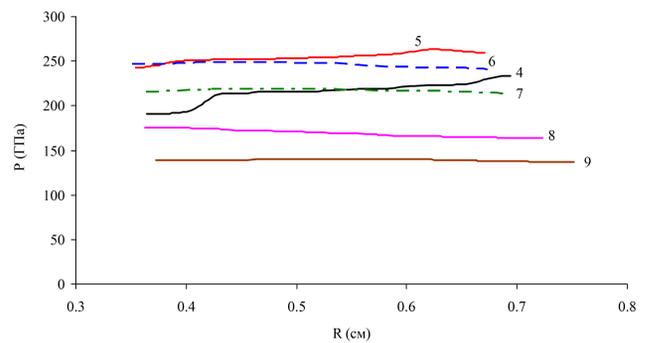


Рис. 5. Профили давления (расчет) в плазме гелия для шести фаз 4–9 рентгенографирования в опыте №1

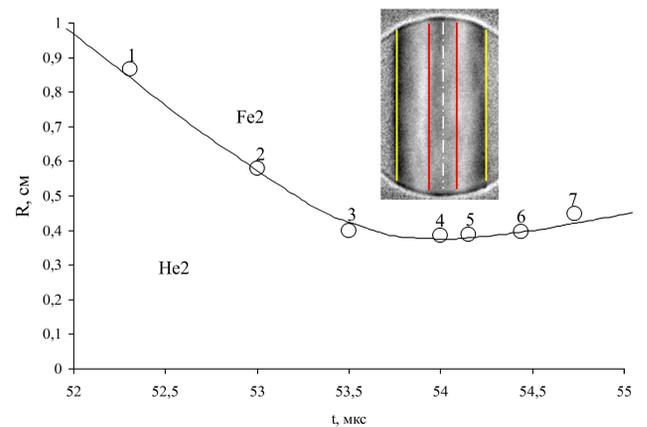


Рис. 6. (В цвете онлайн) Сравнение экспериментальных и рассчитанных $R(t)$ -данных в опыте №2. Эксперимент: ○ — движение ВГО-2. Сплошная линия — расчет. Показаны фрагмент рентгенограммы на момент времени $t = 54$ мкс и результаты функциональной обработки: желтые линии — НГО-2; красные — ВГО-2

на рис. 8а, а вблизи максимального сжатия — на рис. 8б. В эксперименте №3 плазма гелия была сжата до плотности $\rho = 2.44$ г/см³ давлением $P = 476$ ГПа при температуре $T = 22300$ К.

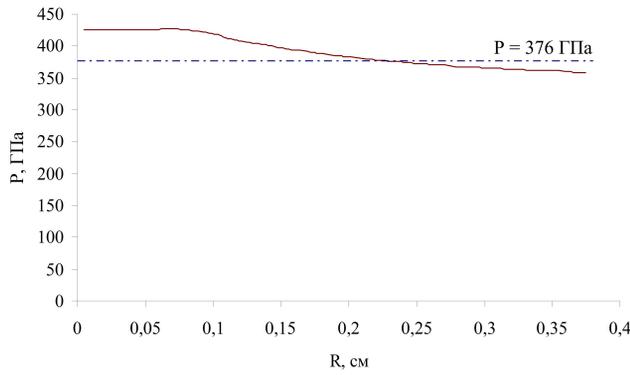


Рис. 7. Профиль давления в плазме гелия при максимальном сжатии в опыте №2: сплошная линия — расчет; штрихпунктирная линия — усредненное по массе значение давления при максимальном сжатии

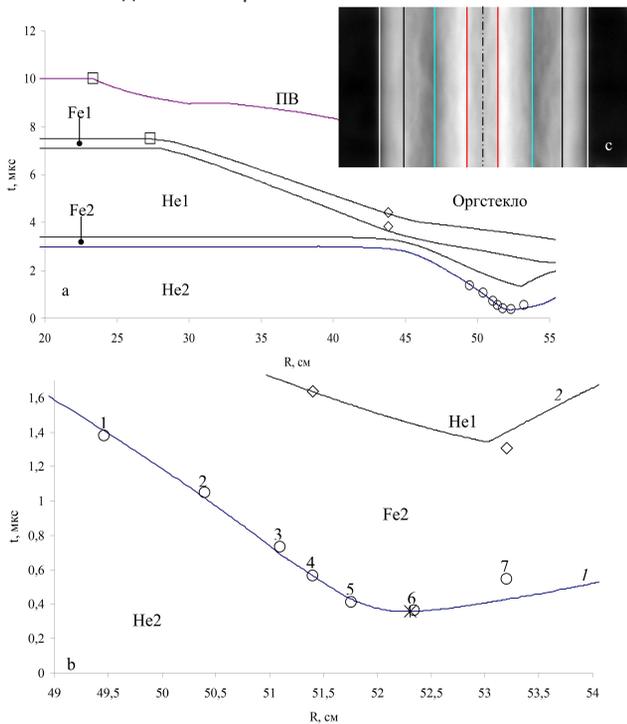


Рис. 8. а) Экспериментальные данные в опыте №3 и рассчитанные $R(t)$ -диаграммы: \square — электроконтактная методика; \diamond , \circ — рентгенографическая методика; б) фрагмент $R(t)$ -диаграмм вблизи момента максимального сжатия; в) фрагмент рентгенограммы на момент времени $t = 51.4$ мкс. Сплошные линии — расчет: 1 — НГО-2; 2 — ВГО-2; * — момент максимального сжатия

Опыт №4. Сравнение экспериментальных $R(t)$ -данных с результатами расчета показано на рис. 9. В расчете для ВНЖ-95 использовали УРС в форме Ми–Грюнаизена, построенное по данным работы [37]. Распределение давления по радиусу в сжатой плазме гелия показано на рис. 10. Видно, что тщательный выбор параметров экспериментального

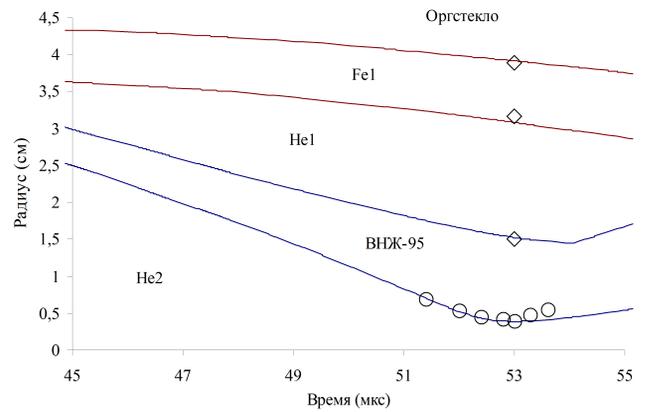


Рис. 9. Сравнение $R(t)$ -данных, полученных в эксперименте №4, с результатами расчета. Эксперимент: \circ — движение ВГО-2 (ВНЖ-95); \diamond — результаты для НГО-2 (ВНЖ-95), а также для НГО-1 и ВГО-1 (Fe1). Сплошные линии — расчет

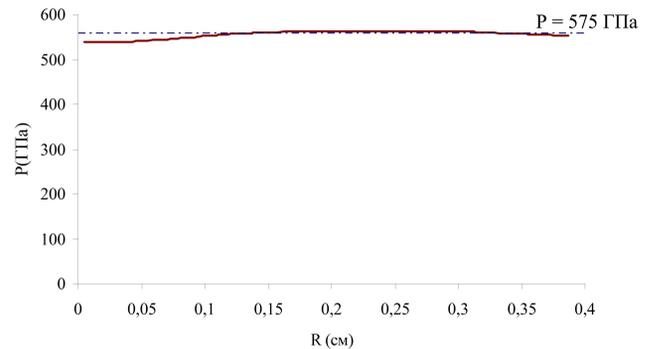


Рис. 10. Профиль давления при максимальном сжатии в сжатой плазме гелия в эксперименте №4: сплошная линия — расчет; штрихпунктирная линия — усредненное по массе значение давления при максимальном сжатии

устройства позволил получить практически равномерный профиль давления в сжатой плазме гелия.

В эксперименте №4 плазма гелия была сжата до плотности $\rho = 2.87 \text{ г/см}^3$ давлением $P = 577 \text{ ГПа}$ при температуре $T = 20842 \text{ К}$. На рис. 11 приведены фрагменты рентгенограмм опыта №4 в моменты времени $t_1 = 52.82$ мкс и $t_2 = 53.01$ мкс с результатами трассировки по методике из работы [30]. Отметим, что на момент времени t_2 приведен фрагмент панорамной рентгенограммы, полученной с применением пакета из десяти сложенных вместе фотографий экранов, что позволило зарегистрировать положение всех границ экспериментального устройства.

Опыт №5. В данном экспериментальном устройстве кроме сжимаемости регистрировали скорость движения границы оболочки второго

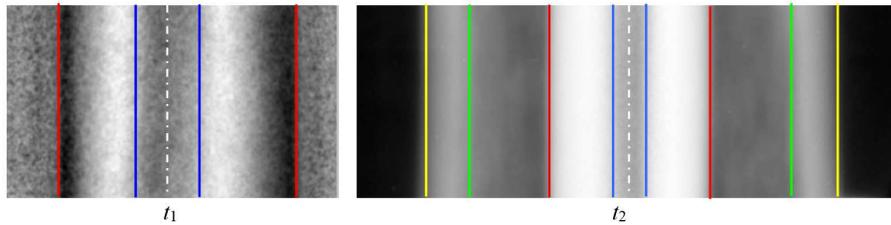


Рис. 11. (В цвете онлайн) Фрагменты рентгенограмм в эксперименте №4 в моменты времени t_1 и t_2 . Оболочка из сплава ВНЖ-95: синие линии — ВГО-2; красные — НГО-2. Оболочка Fe1: зеленые — ВГО-1; желтые — НГО-1

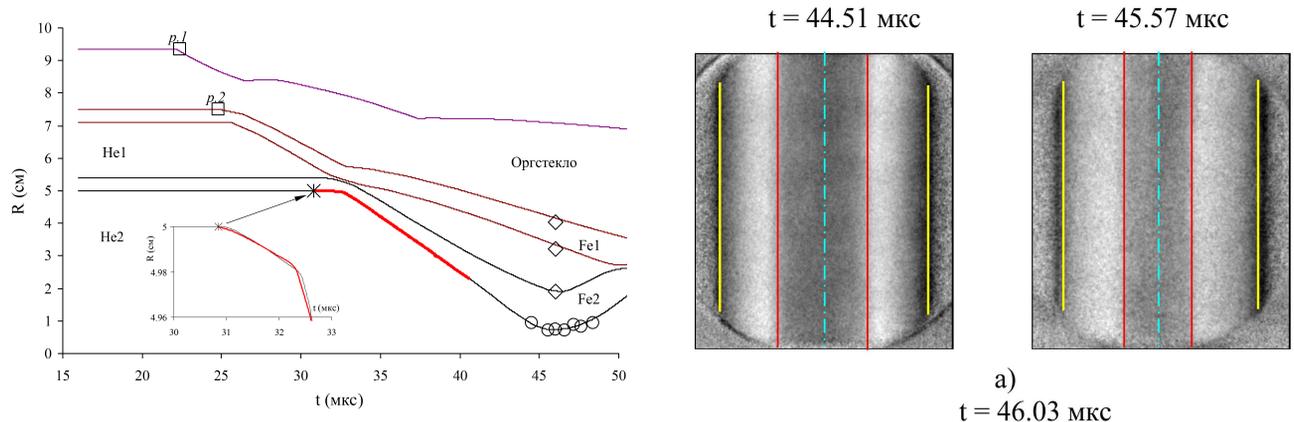


Рис. 12. (В цвете онлайн) Сравнение $R(t)$ -данных, полученных в эксперименте №5, с результатами расчета. Эксперимент: \square — данные с электроконтактных датчиков; результаты рентгенографирования: \circ — ВГО-2; \diamond — НГО-2, НГО-1 и ВГО-1; данные PDV-датчика: красная линия — экспериментальная $R(t)$ -траектория, * — время выхода УВ на границу $R = 5$ см. Сплошные черные линии — расчет

каскада PDV-датчиком, а также яркостную температуру гелиевой плазмы на фронте первой УВ.

Сравнение экспериментальных $R(t)$ -данных с результатами расчета для этого устройства приведено на рис. 12.

На рис. 12 видно, что расчет с использованием выбранной тактики счета хорошо описывает контрольные точки ($p.1$ и $p.2$) движения УВ по оргстеклу и стальной оболочке первого каскада Fe1, а также измеренные рентгенографическим методом траектории НГО-2 и ВГО-2 экспериментального устройства. Анализ данных показывает, что в эксперименте №5 плазма гелия была сжата до плотности $\rho_{exp} = 1.65 \text{ г/см}^3$ давлением $P = 240 \text{ ГПа}$ при температуре $T = 22388 \text{ К}$. Отличие экспериментальной плотности от рассчитанного значения ($\rho_{calc} = 1.75 \text{ г/см}^3$) составляет 6.7%. Ряд экспериментальных рентгенограмм, полученных в данном опыте, показан на рис. 13.

Экспериментальная диаграмма скорости $W(t)$ вместе с рассчитанной приведены на рис. 14, они хорошо согласуются друг с другом. Средняя

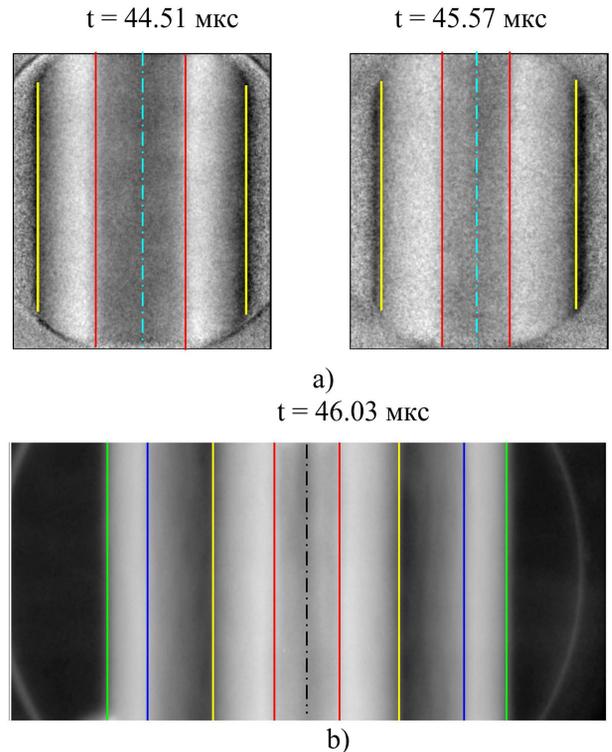


Рис. 13. (В цвете онлайн) Экспериментальные рентгенограммы: а) начальная фаза движения; б) панорамное изображение полостей устройства при максимальном сжатии. Цветными линиями обозначены границы полостей: красные линии — ВГО-2; желтые — НГО-2; синие — ВГО-1; зеленые — НГО-1

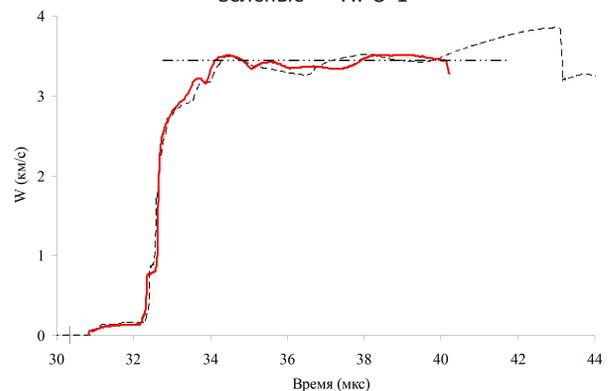


Рис. 14. Скорость движения внутренней границы оболочки экспериментального устройства: сплошная линия — экспериментальная зависимость; штриховая — расчет; штрих-пунктирная — среднее значение $W(t) = 3.45 \text{ км/с}$

скорость движения оболочки Fe2 в интервале времен $dt = 34\text{--}40$ мкс оценивается значением $W = 3.45$ км/с.

В эксперименте №5 в качестве регистратора излучения с фронта цилиндрической УВ использован фотодиод ФД254 в комплексе с высокоскоростным осциллографом. Излучение регистрировалось в полосе пропускания фотодиода $\Delta\lambda = 334\text{--}1140$ нм при средней длине волны $\lambda = 775$ нм. Предварительно измерительная линия была откалибрована с использованием источника абсолютно черного тела с температурой $T = 1770$ К. Типичная осциллограмма излучения фронта УВ, зарегистрированная в эксперименте, приведена на рис. 15а, по которой, с учетом калибровочных данных, рассчитана зависимость яркостной температуры на фронте УВ от времени в плазме гелия (рис. 15б). Значения текущих температур на фронте УВ в плазме гелия в наиболее характерных точках, указанных стрелками, приведены в подписях к рисунку.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Как следует из рис. 15б, при чувствительности нашей методики $T_{min} = 2500$ К регистрация температуры фронта УВ начинается в момент времени $t_0 \approx 40.2$ мкс (точка 1). За время $dt \approx 0.6$ мкс температура возрастает до $T \approx 6000$ К (т. 4), после чего в течение короткого времени $dt \approx 0.2$ мкс происходит рост температуры до $T \approx 11000$ К (т. 6) и последующий спад. Проведенный анализ полученных данных показал, что этот спад температуры связан со спецификой конструкции канала регистрации излучения с фронта УВ.

Рассмотрим процесс формирования мощной первой УВ и ее циркуляции в области исследуемого вещества, показанные на рис. 16. Как видно на рис. 16а, после ряда отражений первой УВ SW1 в слое гелия He1 в полости He2 формируется суммарная УВ SW⁺, которая в момент начала свечения фронта $t_1 \approx 40.2$ мкс (т. 1) находится на радиусе $R \approx 8$ мм (рис. 16б). При дальнейшем движении УВ SW⁺ к оси устройства амплитуда свечения фронта УВ нарастает и к моменту времени $t_2 \approx 41$ мкс (т. 2) достигает своего максимального значения. К этому же времени УВ SW⁺ физически достигает отражающей грани минизеркала диаметром 2.5 мм, а затем зоны расположения оптоволокна (т. 3). Снижение амплитуды излучения с этого момента может быть связано с повреждением поверхности зеркала и (или) световода ударной волной.

Экспериментальные значения текущих температур на фронте УВ в зависимости от времени движения УВ SW⁺ показаны на рис. 17 в сравнении с результатами расчета (кривая 1). Также на рис. 17 приведена рассчитанная зависимость усредненных по массе температур (кривая 2), на которую нанесены значения температур в плазме гелия в моменты рентгенографирования.

Пиковые значения температур на фронте УВ в моменты F1–F5 связаны с фокусировкой УВ на оси экспериментального устройства, рассчитанная циркуляция которых показана на рис. 16б. Как видно на этом рисунке, в момент времени F1 суммарная УВ SW⁺ достигает центра устройства. В результате последующих отражений УВ SW⁺ от границы сходящейся к центру оболочки Fe2 в состояниях K1–K4 происходит кумуляция энергии в этом и последующих состояниях F2–F5, сопровождающаяся резким изменением температуры плазмы гелия на оси устройства $T \approx 44000, 78000, 73000, 63000, 58000$ К. После достижения максимального значения в состоянии F2 рост пиковых значений температур замедляется. В той фазе движения, пока УВ не достигнет центра устройства, реализуется процесс УВ-сжатия и, как видно на рис. 17, температуры на фронте УВ и усредненные по массе практически совпадают до $t \approx 40$ мкс.

Как было показано выше на рис. 14, осциллограмма с PDV-датчика демонстрирует практически постоянную скорость движения внутренней границы оболочки второго каскада (ВГО-2) до $t \approx 40$ мкс. Это позволяет сделать вывод, что до $T \approx 4000$ К не происходит образования плотного слоя плазмы, способного экранировать зондирующее лазерное излучение, используемое в гетеродин-интерферометре [38].

Результаты по сжимаемости плазмы гелия, полученные в пяти экспериментах настоящей работы, приведены в $P(\rho)$ -координатах на рис. 18 и демонстрируют хорошее согласие в исследованной области давлений с данными работы [23]. Там же приведены расчеты «холодной» ($T = 0$ К) адиабаты и изэнтропы, описывающей экспериментальные данные.

На плоскости $P(T)$ данные настоящей работы показаны на рис. 19 вместе с результатами работы [23] и расчетами из работы [7].

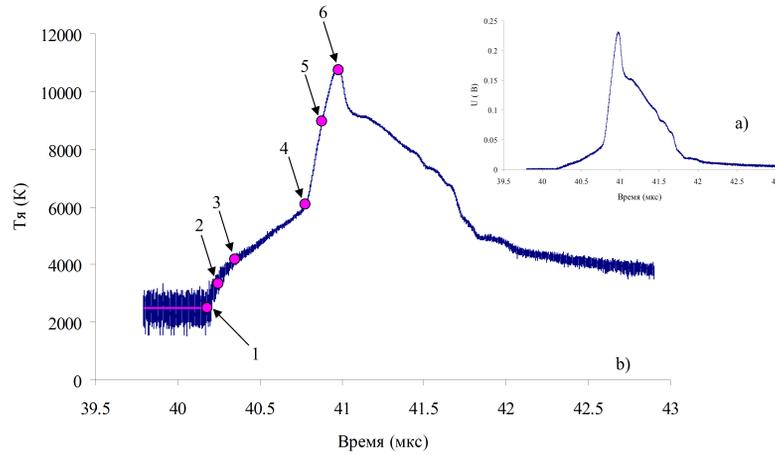


Рис. 15. Зарегистрированная осциллограмма (а) и яркостная температура на фронте УВ в плазме гелия (b) в зависимости от времени при $T = 2500$ (1), 3342 (2), 4190 (3), 6083 (4), 8954 (5), 10743 (6) К

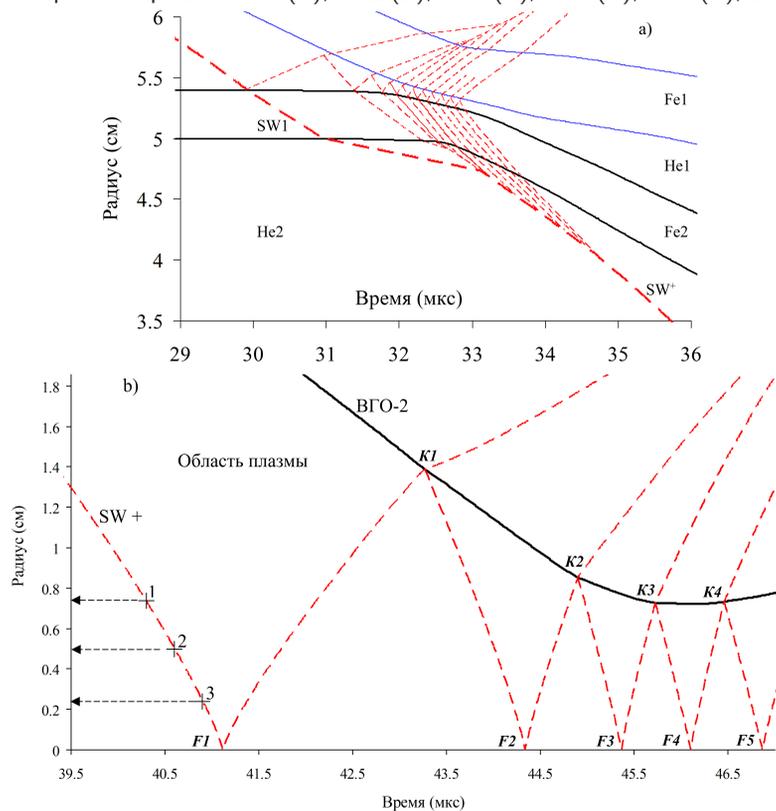


Рис. 16. (В цвете онлайн) а) Траектории УВ в начальной фазе: SW1 — первая УВ; SW⁺ — суммарная УВ; Fe1 и Fe2 — оболочки первого и второго каскадов. б) $R(t)$ -диаграммы: сплошная линия — траектория ВГО-2; красные штрихи — траектории УВ SW⁺; F1–F5 — моменты фокусировки УВ SW⁺; K1–K4 — моменты отражения УВ SW⁺ от ВГО-2

5. СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА ПО МОДЕЛИ SANA И ПОДХОДА *AB INITIO* В РАМКАХ КВАНТОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В рамках теоретического сопровождения экспериментов ВНИИЭФ и сравнения различных

теоретических подходов помимо расчетов с УРС ВНИИЭФ в данной работе были проведены дополнительные расчеты термодинамических параметров ударно-сжатой плазмы гелия при параметрах давления и плотности, достигнутых в настоящем эксперименте. Для этой цели, как и ранее [22, 36], использовались два подхода: традиционный метод

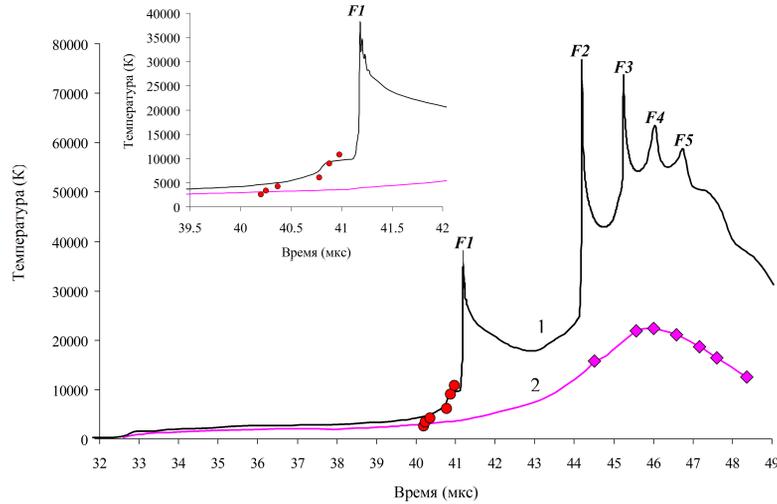


Рис. 17. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанной зависимостью температуры на фронте цилиндрической УВ (кривая 1) от времени. Эксперимент: кружки — $\lambda = 775$ нм. Расчет: кривая 2 — усредненная по массе температура в плазме гелия в зависимости от времени; ромбы — усредненные по массе значения температур в моменты рентгенографирования. На вкладке — область диаграммы вблизи фокусировки первой УВ

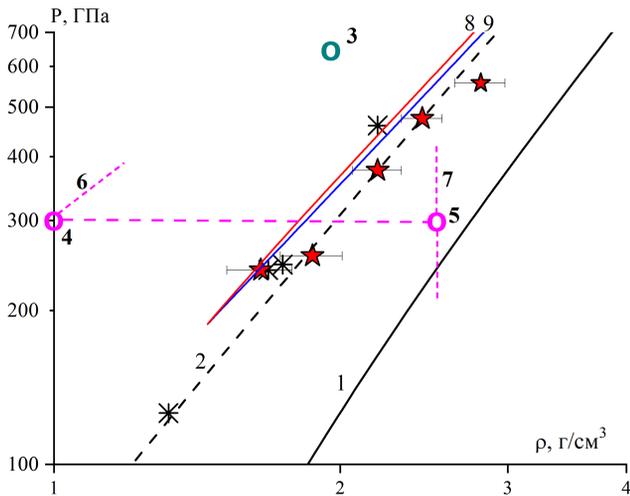


Рис. 18. (В цвете онлайн) Сжимаемость неидеальной плазмы гелия. Эксперимент: * — [23]; красные звездочки — настоящая работа. Расчет: 1 — изотерма $T = 0$ K; 2 — изэнтропа $S/R = 11.55$ (УРС ВНИИЭФ); 3 — критическая точка (660 ГПа, 2 г/см^3 , 35000 K) [7]; 4, 5 — границы участка изотермы-изобары $T \approx 8000$ K $\Leftrightarrow P \approx 300$ ГПа в двухфазной зоне фазового перехода [7]; 6 и 7 — части границ «купола» двухфазной области [7] со стороны атомарной (6) и плазменной (7) областей; 8 и 9 — изэнтропы плазмы гелия, выходящие из единой точки $\{\rho = 1.45 \text{ г/см}^3, P = 188 \text{ ГПа}\}$, рассчитанные согласно УРС SAHA и УРС QMD соответственно

расчета состава и термодинамических функций неидеальной многократно ионизованной плазмы в рамках «Химической модели плазмы» (chemical picture), реализованной в коде SAHA [3, 19], а также расчет в рамках современного подхода

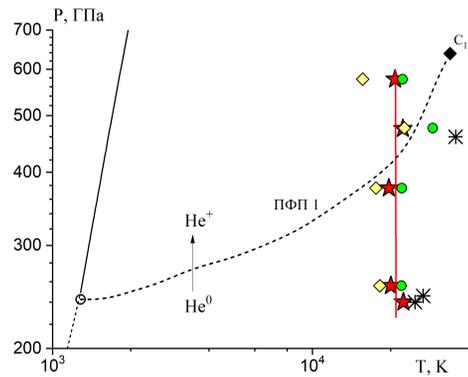


Рис. 19. (В цвете онлайн) Термодинамические параметры неидеальной плазмы гелия: * — [23]; красные звездочки — настоящая работа; красная линия — средняя изотерма 21045 K; штрихи — граница плазменного фазового перехода из атомарного состояния гелия в состояние однократно ионизованной плазмы [7]; черный ромб — критическая точка плазменного фазового перехода [7]; O — гипотетическая тройная точка [7]; желтые ромбы — расчет температуры (см. табл. 3) в химической модели (код SAHA); зеленые кружки — то же с использованием УРС QMD (код VASP с функционалом PBE [36])

ab initio — квантовой молекулярной динамики (QMD) [39]. Процедура расчетов QMD реализована с использованием известного пакета VASP [40] с обменно-корреляционным функционалом с использованием обобщенно-градиентного приближения (GGA) с параметризацией PBE [41]. Конкретно, в нашей настоящей работе были проведены

следующие расчеты.

1) Для всех экспериментальных точек $\{P_i, \rho_i\}_{exp}$ в рамках моделей SAHA и QMD были рассчитаны соответствующие этим моделям значения температур $\{T_i\}$. Пользуясь методическим достоинством модели SAHA, с помощью этого кода мы рассчитали также ряд дополнительных физически значимых характеристик термодинамических состояний $\{P_i, \rho_i, T_i\}$, соответствующих в рамках модели SAHA экспериментально достигнутым параметрам $\{P_i, \rho_i\}_{exp}$, а именно, равновесные степени ионизации гелия, фактор сжимаемости $(P_i V_i / RT_i)$, характеризующий знак и величину степени неидеальности плазмы в целом, показательный («дебаевский») параметр кулоновской неидеальности $\Gamma_D = e^2 / k T r_D$ (r_D — дебаевский радиус с учетом многократной ионизации и частичного вырождения электронного газа) и, наконец, параметр квантового вырождения электронного газа $n_e \lambda_e^3$.

2) Также в рамках обоих подходов были рассчитаны параметры показательной энтропии, «выпущенной» из одной и той же начальной точки $\{\rho = 1.45 \text{ г/см}^3, P = 188 \text{ ГПа}\}$, для сравнения с приведенной на рис. 18 энтропией, рассчитанной с использованием УРС ВНИИЭФ.

Для обоих указанных альтернативных расчетов термодинамики гелия, SAHA и QMD, в настоящей работе использовались численные методики и реализующие их расчетные коды, уже неоднократно использовавшиеся в недавних работах [22, 36], где подробно описаны важнейшие особенности двух указанных альтернативных методик. По этой причине более подробное описание опущено в настоящей работе. Все указанные выше величины, рассчитанные как кодом SAHA, так и в рамках модели QMD (код VASP с функционалом PBE), вместе с экспериментальными данными приведены в табл. 3, а также на рис. 18 и 19 в $P(\rho)$ - и $P(T)$ -плоскостях. Эти результаты демонстрируют хорошее согласие в исследованной области давлений как друг с другом, так и с экспериментальными данными работы [23].

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СРАВНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ВНИИЭФ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Результаты по сжимаемости плазмы гелия в $P(\rho)$ -координатах, полученные в пяти экспериментах настоящей работы, приведены на рис. 18 и демонстрируют хорошее согласие в исследованной области давлений с данными работы [23]. Там же пред-

ставлен расчет с использованием УРС ВНИИЭФ изотермы $T = 0 \text{ К}$ и энтропии, наилучшим образом описывающей экспериментальные данные. Также на рис. 18 приведены результаты сравнительного расчета согласно УРС SAHA и УРС QMD для энтропии, выпущенных из единой точки с координатами $\{\rho = 1.45 \text{ г/см}^3, P = 188 \text{ ГПа}\}$, и показаны доступные параметры границы первой стадии гипотетического ПФП, предсказанного в [7]. Из приведенного на рис. 18 сравнения можно заключить, что все три рассчитанные энтропии имеют разный наклон, т. е. предсказывают различную скорость звука. Наиболее «жестким» является УРС ВНИИЭФ, более «мягким» оказывается УРС SAHA и наиболее «мягким» — УРС QMD. Следует еще раз подчеркнуть, что все три теоретические УРС, используемые в данной статье, не содержат в области параметров, представленных на рис. 18, никаких аномалий типа фазовых переходов, как это предсказывает теория [7]. При этом все три энтропии большей своей частью проходят глубоко в пределах гипотетической двухфазной области, предсказываемой теоретической моделью [7] (см. зону в границах 3, 4, 5, 6, 7), где по существующим представлениям равновесные энтропии должны иметь существенно меньшую скорость звука, т. е. существенно меньшую «крутизну» в принятых на рис. 18 координатах [42]. Ввиду сказанного можно рассматривать большую величину наклона серии экспериментальных точек как аргумент в пользу отсутствия фазового разрыва в представленной зоне фазовой диаграммы.

На рис. 19 экспериментальные данные настоящей работы показаны на плоскости $P-T$ вместе с результатами работы [23]. Помимо этого, на рис. 19 представлены температуры $\{T_i\}$ в точках $\{P_i, \rho_i\}_{exp}$, рассчитанные по теоретическим моделям УРС SAHA и QMD.

Сравнение представленных на рис. 19 результатов расчета температуры, полученных с помощью трех принципиально различных теоретических подходов, позволяет сделать следующие выводы.

1. Все три варианта набора температур, соответствующих экспериментальным точкам $\{P_i, \rho_i\}_{exp}$, близки друг другу и в хорошем приближении соответствуют изотермическому характеру всей совокупности точек с несущественно различающейся величиной средней температуры. Однако следует признать, что все три варианта УРС (ВНИИЭФ, SAHA и QMD) исходно и не предполагают никаких фазовых аномалий в зоне экспериментально исследованных параметров.

Таблица 3. Расчетные и экспериментальные параметры плазмы гелия в фазе максимального сжатия

Эксперимент	УРС ВНИИЭФ				УРС SANA					УРС QMD	
	ρ_{exp} , г/см ³	P_{calc} , ГПа	T_{calc} , К	$\frac{P}{\rho RT}$	T_{calc} , К	$\frac{n_i}{n_i + n_a}$	Γ_D	$n_e \lambda_e^3$	$\frac{P}{\rho RT}$	T_{calc} , К	$\frac{P}{\rho RT}$
1	1.87	256	20039	3.27	18175	$5.59 \cdot 10^{-4}$	1.758	$2.67 \cdot 10^{-2}$	3.61	21997	2.97
2	2.30	376	19700	3.99	17564	$5.66 \cdot 10^{-4}$	2.059	$3.48 \cdot 10^{-2}$	4.48	22079	3.56
3	2.44	476	22300	4.20	22561	$9.06 \cdot 10^{-3}$	5.828	$4.06 \cdot 10^{-1}$	4.16	29081	3.22
4	2.87	577	20842	4.64	15606	$3.05 \cdot 10^{-4}$	2.015	$2.79 \cdot 10^{-2}$	6.20	22235	4.35
5	1.65	240	22388	—	—	—	—	—	—	—	—

2. Наиболее весомый аргумент в пользу отсутствия первого из предсказанных [7] обширных плазменных (ionization-driven) фазовых переходов следует из анализа самого факта фиксации представленных на рис. 18 равновесных состояний плазмы гелия в переменных давление–плотность. Напомним, что плотность плазмы непосредственно измеряется в эксперименте, в то время как достоверность рассчитанных величин давления, строго говоря, подкрепляется лишь хорошим совпадением измеренных и рассчитанных (с помощью не содержащего температуру калорического УРС ВНИИЭФ $U(P, \rho)$) основных измерявшихся кинематических параметров процесса квазиизэнтропического сжатия, т. е. $R(t)$ - и $W(t)$ -траекторий сжатия, представленных на рис. 5–10. Дело в том, что, как уже подчеркивалось выше, каждая экспериментальная точка, приведенная на рис. 18 и 19 и в табл. 2 и 3, в реальности является финалом цепочки равновесных состояний, реализующихся в процессе реверберации последовательности ударных сжатий при квазиизэнтропическом достижении состояния максимального сжатия. Примером такой цепочки является серия состояний сжатия 1–5 эксперимента №1 в табл. 2. При этом в самой идеологии метода квазиизэнтропического сжатия [43–45] подразумевается, что все обсуждаемые промежуточные состояния на пути к состоянию максимального сжатия являются равновесными и, следовательно, оправдывающими применение двух фундаментальных инструментов теоретического описания процесса квазиизэнтропического сжатия — приближения локального термодинамического равновесия и локального гидродинамического описания. Но в том-то и состоит обсуждаемая особенность гипотетического плазменного фазового перехода [7] по отношению к на-

стоящему эксперименту, что для всех экспериментальных точек, приведенных в табл. 3, все состояния обсуждаемых цепочек ударных сжатий и состояния максимального сжатия оказываются (согласно УРС ВНИИЭФ и расчетам работы [7]) попадающими на фазовой диаграмме $P-\rho$ внутрь двухфазной области проверяемого фазового перехода [7] и даже, по-видимому, внутрь «спинодальной» зоны этого фазового перехода, т. е. зоны абсолютной термодинамической неустойчивости вещества, для которой устойчивым равновесным состоянием является состояние двухфазной смеси, обладающей бесконечной изотермической сжимаемостью, $(\partial\rho/\partial P)_T = \infty$. Представляется достаточно убедительным, что динамика движения сжимающей оболочки в такой ситуации, когда сжимаемое вещество вследствие фазового превращения теряет свою «упругость», будет существенно иной, нежели в случае «обычного» однофазного состояния вещества с конечной сжимаемостью. Поэтому можно полагать, что в принятой в настоящем эксперименте диагностике движение сжимающей оболочки в случае фазового расслоения в сжимаемом веществе будет по своему характеру более походить на движение оболочки в специальных тестовых условиях сжатия «пустой» сборки, т. е. при отсутствии сжимаемого вещества в центральной камере, когда упругость этого вещества не препятствует свободному «схлопыванию» оболочек. Никаких признаков подобного поведения на $R(t)$ -диаграммах в настоящих экспериментах не зафиксировано. Это может считаться прямым доказательством отсутствия предсказанного [7] ионизационного фазового превращения в зоне изэнтропической полосы, перекрываемой «цепочками» многократно ударного сжатия настоящего эксперимента.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные в $P(\rho)$ - и $P(T)$ -координатах не зафиксировали наличия в гелии аномалий, которые могли бы указывать на существование плазменного фазового перехода, предсказанного ранее теоретически Эбелингом [5], а также в работах [1–14], но и не позволяют сделать окончательного вывода о его отсутствии. Возможно, что область плазменного фазового перехода для сжатой плазмы гелия находится в диапазоне более высоких давлений, что обосновывает необходимость продолжения исследований.

Полученные экспериментальные данные показывают, что расчет с использованием для гелия УРС ВНИИЭФ адекватно описывает температуру сжатой плазмы на фронте цилиндрической УВ. С долей сдержанного оптимизма это позволяет утверждать, что температура плазмы гелия в момент максимального сжатия, рассчитанная с использованием УРС ВНИИЭФ, также вычисляется правильно.

В дальнейших исследованиях термодинамических параметров сжатой плазмы гелия авторы предполагают поднять диапазон исследований изотермически сжатой плазмы гелия до давлений 2500 ГПа, продолжить исследования излучательных характеристик фронта УВ и экспериментально зарегистрировать температуру плазмы гелия при максимальном сжатии, по крайней мере, в экспериментах с цилиндрическими устройствами.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам, принимавшим участие в организации, проведении экспериментов и обработке полученных данных: С. Е. Елфимову, 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. Авторы также выражают благодарность А. В. Шутову за плодотворные обсуждения проблемы динамического сжатия вещества при наличии в нем фазовых превращений.

Финансирование. Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации «Росатом» по Государственной программе развития техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии (РГТН) (проект «Исследование теплофизических свойств веществ при сжатии до рекордно высоких давлений и магнитных полей»), Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-02-00287), Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы по созданию молодежных лабораторий

(научная тема № FSWE-2021-0010 «Газодинамика и физика взрыва») и Национального центра физики и математики (г. Саров Нижегородской обл.).

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Iosilevskiy, V. Gryaznov, E. Yakub et al., *Contrib. Plasma Phys.* **43**, 316 (2003).
2. M. Schlanges, M. Bonitz, and A. Tschttschjan, *Contrib. Plasma Phys.* **35**, 109 (1995).
3. В. К. Грязнов, И. Л. Иосилевский, В. Е. Фортов, *Термодинамика ударно-сжатой плазмы в квазихимическом представлении* / Энциклопедия низкотемпературной плазмы под общей ред. В. Е. Фортова. Том приложений III-1 / Ред. А. Н. Старостин и И. Л. Иосилевский, Физматлит, Москва (2004), сс. 111-139.
4. C. Winisdoerffer and G. Chabrier, *Phys. Rev. E* **71**, 026402 (2005).
5. W. Ebeling, *Contrib. Plasma Phys.* **30**, 553 (1990).
6. H. Hess, *High Press. Res.* **1**, 203 (1989).
7. В. Эбелинг, А. Фёрстер, В. Фортов и др., *Теплофизические свойства горячей плотной плазмы*, Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований (2007).
8. A. Forster, T. Kalbaum, and W. Ebeling, *High Press. Res.* **7**, 375 (1991).
9. В. Т. Швец, *ЖЭТФ* **143**, 182 (2013).
10. C. A. Seldam, *Proc. Phys. Soc. A* **70**, 97 (1957).
11. В. П. Трубицын, Ф. Р. Улинич, *ДАН СССР* **142**, 578 (1962).
12. D. A. Young, A. K. McMahan, and M. Ross, *Phys. Rev. B* **24**, 5119 (1981).
13. J. Meyer-ter-Vehn and W. Zittel, *Phys. Rev. B* **37**, 8674 (1988).
14. M. Preising and R. Redmer, *Contrib. Plasma Phys.* **61**, e202100105 (2021).
15. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др., *ЖЭТФ* **142**, 696 (2012).
16. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др., *Письма в ЖЭТФ* **96**, 172 (2012).
17. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др., *ЖЭТФ* **146**, 169 (2014).
18. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др., *Письма в ЖЭТФ* **101**, 575 (2015).

19. В. К. Грязнов, И. Л. Иосилевский, В. Е. Фортов, в сб. *Ударные волны и экстремальные состояния вещества* под ред. В. Е. Фортова и др., Наука, Москва (2000), с. 299.
20. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., ЖЭТФ **151**, 592 (2017).
21. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., Письма в ЖЭТФ **108**, 692 (2018).
22. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., ЖЭТФ **160**, 735 (2021).
23. М. В. Жерноклетов, В. К. Грязнов, В. А. Аринин и др., Письма в ЖЭТФ **96**, 479 (2012).
24. V. E. Fortov, R. I. Il'kaev, V. A. Arinin et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 185001 (2007).
25. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., ЖЭТФ **152**, 1113 (2017).
26. В. А. Огородников, А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов и др., ФГВ **34**, 103 (1998).
27. В. А. Огородников, С. В. Ерунов, А. О. Бликов и др., ЖЭТФ **160**, 621 (2021).
28. Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov et al., in *11th IEEE Pulsed Power Conference/Digest of technical papers*, ed. by G. Cooperstein and I. Vitkovitsky (1997), p. 1669.
29. В. В. Сычев, А. А. Вассерман, А. Д. Козлов и др., *Термодинамические свойства гелия*, ГСССД, Изд-во стандартов, Москва (1984).
30. V. A. Arinin and V. I. Tkachenko, Pattern Recogn. and Image Anal. **19**, 63 (2009).
31. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин, В. Н. Софронов, ВАНТ. Сер.: Методики и программы численные решения задач математической физики, Вып. 3, 11 (1982).
32. Б. Л. Глушак, Л. Ф. Гударенко, Ю. М. Стяжкин, ВАНТ. Сер.: Математическое моделирование физических процессов, Вып. 2, 57 (1991).
33. И. Р. Трунин, С. В. Корицкая, В. Арнолд, Препринт 75-2000, Саров (2000); S. V. Koritskaya, I. R. Trunin, and W. Arnold, AIP Conf. Proc. **505**, 475 (2000).
34. Б. А. Надикто, А. И. Ломайкин, И. Н. Павлуша, М. О. Ширшова, ВАНТ. Сер.: Теоретическая и прикладная физика, Вып. 2, 43 (2012).
35. А. А. Евстигнеев, М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев, ФГВ **12**, 758 (1976).
36. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др., ЖЭТФ **159**, 1118 (2021).
37. Р. Ф. Трунин, Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов, Г. В. Симаков, *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ*, под ред. Р. Ф. Трунина, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2001).
38. O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez et al., Rev. Sci. Instrum. **77**, 083108 (2006).
39. A. V. Chentsov and P. R. Levashov, Contrib. Plasma Phys. **52**, 33 (2012).
40. G. Kresse and J. Hafner, Phys. Rev. B **47**, 558 (1993).
41. J. P. Perdew, K. Burke, and M. Ernzerhof, Phys. Rev. Lett. **77**, 3865 (1996).
42. В. Е. Фортов, *Термодинамика динамических воздействий на вещество*, Физматлит, Москва (2019).
43. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова и др., Письма в ЖЭТФ **16**, 286 (1972).
44. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова и др., ЖЭТФ **69**, 743 (1975).
45. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова и др., ЖЭТФ **75**, 1683 (1978).