

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕЛИЯ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ И КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ СЖАТИЯХ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ ДО 4800 ГПа И ПРИ СТЕПЕНЯХ СЖАТИЙ ДО 900

*М. А. Мочалов<sup>a\*</sup>, Р. И. Илькаев<sup>a</sup>, В. Е. Фортвов<sup>b</sup>, А. Л. Михайлов<sup>a</sup>, В. А. Аринин<sup>a</sup>,  
А. О. Бликов<sup>a\*\*</sup>, С. Е. Елфимов<sup>a</sup>, В. А. Комраков<sup>a</sup>, В. А. Огородников<sup>a</sup>, А. В. Рыжков<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> РФЯЦ-ВНИИЭФ  
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>b</sup> Объединенный институт высоких температур Российской академии наук  
125412, Москва, Россия

Поступила в редакцию 13 июня 2017 г.

Представлены термодинамические параметры сильнонеидеальной плазмы гелия, полученные в экспериментальных устройствах полусферической и сферической геометрии. При ударно-волновом нагружении в полусферическом устройстве плазма гелия сжата до плотности  $\rho \approx 0.76$  г/см<sup>3</sup> давлением  $P \approx 83$  ГПа при температуре  $T \approx 51000$  К. При квазиизэнтропическом сжатии плазмы гелия использовались двухкаскадные сферические экспериментальные устройства двух типов. В устройствах первого типа при одинаковом начальном давлении газа в обеих полостях оболочек плазма гелия сжата примерно в 200 раз до плотности  $\rho \approx 8$  г/см<sup>3</sup> давлением  $P \approx 4800$  ГПа. В устройствах второго типа при соотношении начальных давлений газа в полостях примерно 9 : 1 определены термодинамические параметры неидеальной плазмы гелия, сжатой в 900 раз до плотности  $\rho \approx 5$  г/см<sup>3</sup> давлением  $P \approx 3700$  ГПа. Давление сжатой плазмы определено по результатам газодинамического расчета. Для определения положения границ стальной оболочки, сжимающей газообразный гелий, использовался рентгенографический комплекс, состоящий из трех бетатронов и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений.

DOI: 10.7868/S0044451017110268

## 1. 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 диапазонах давлений, соответствующих внутренним частям планет-гигантов Солнечной системы, а также экзопланетам, активно изучаемым сейчас [1–5]. 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). 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 [6–22].

Основная проблема построения широкодиапазонного уравнения состояния (УРС) гелия заключается в малом количестве экспериментальных данных. Среди известных нам — результаты исследова-

\* E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

\*\* E-mail: mcleodjr@mail.ru

ния ударно-волновой сжимаемости жидкого гелия на прямой и отраженной волнах соответственно до 16 ГПа и 56 ГПа [8]. В работе [9] в области давлений до 200 ГПа в ударной волне измерена сжимаемость газообразного гелия с начальной плотностью  $\rho_0$ , изменяющейся в области  $\rho_{0L} \leq \rho_0 \leq 3.3\rho_{0L}$ , где  $\rho_{0L} = 0.123 \text{ г/см}^3$  — плотность жидкого гелия. Наиболее известные к настоящему времени УРС предсказывают увеличение сжимаемости гелия в ударной волне, связанное с началом ионизации газа, до максимального значения около  $6 \text{ г/см}^3$  при давлениях 300 ГПа и 100 ГПа соответственно по моделям SCVN [23] и АСТЕХ [24] и до примерно  $5.3 \text{ г/см}^3$  при давлении 360 ГПа — по модели РИМС [25]. Как показывает анализ, в области давлений до 30 ГПа теоретические модели [23–25] практически совпадают и хорошо согласуются с данными [8] для прямой ударной волны. В области давлений до 100 ГПа полученные в [9] данные удовлетворительно согласуются с расчетами по моделям [23, 24], предсказывающими рост сжимаемости ударно-сжатого гелия в 6 раз, и не описываются расчетом по модели РИМС [25]. Аналогичная ситуация характерна и для наших данных по ударно-волновой сжимаемости гелия, ранее опубликованных в работе [19].

Интерес к исследованию свойств гелия при давлениях выше 100 ГПа во многом связан с предсказаниями существования фазовых переходов первого рода и плазменных переходов в сжатой жидкости. В [26] из анализа результатов минимизации свободной энергии как функции полной плотности ядер показана возможность фазового перехода первого рода в гелиевой плазме при температуре  $T = 30000 \text{ К}$  и средней плотности ядер  $10^{23} \text{ см}^{-3}$ . При более высокой плотности жидкость ведет себя подобно металлической плазме. Меньшую температуру перехода  $T \approx 28500 \text{ К}$  предсказывают результаты [27] при учете лишь однократной ионизации. Металлизация гелия при плотности  $5.3 \text{ г/см}^3$  предсказана в работе [28]. На основе расчетов зонной структуры различными авторами были получены значения давления металлизации гелия от 0.3 до 20 ТПа [29–32]. Авторы [33, 34], используя в расчетах метод суммарного химического потенциала, пришли к выводу о существовании в сжатой плазме гелия двух плазменных фазовых переходов (ПФП), стартующих из тройных точек с параметрами  $T_1 \sim 1000 \text{ К}$  и  $P_1 \sim 0.2 \text{ ТПа}$  — ПФП 1 и  $T_2 \sim 4000 \text{ К}$  и  $P_2 \sim 3 \text{ ТПа}$  — ПФП 2. Оба плазменных перехода заканчиваются критическими точками  $C_1$  и  $C_2$  с параметрами —  $T_1 \sim 35000 \text{ К}$  и  $P_1 \sim 0.660 \text{ ТПа}$  для ПФП 1 и  $T_2 \sim 120000 \text{ К}$  и  $P_2 \sim 10 \text{ ТПа}$  для ПФП 2.

До настоящего времени область давлений, где были предсказаны фазовые переходы и металлизация гелия, оставалась недоступной для исследователей. Для этого, ранее не исследованного диапазона мегабарных давлений, можно применить метод квазиизэнтропического сжатия газа в двухкаскадных устройствах сферической геометрии, использованный нами в экспериментах с гелием в работах [19–22]. При равном начальном давлении газа в обоих каскадах около 25 МПа гелий был сжат до плотности  $8 \text{ г/см}^3$  давлением примерно 4800 ГПа в устройствах одного типа [20] и приблизительно в 600 раз до плотности  $4.6 \text{ г/см}^3$  давлением около 3000 ГПа в устройствах другого типа [22]. Полученные состояния сильнонеидеальной плазмы гелия при давлении  $P \sim 4800 \text{ ГПа}$  характеризуются высокими значениями кулоновской неидеальности  $\Gamma_d \sim 20$  и параметра вырождения  $n\lambda^3 \sim 20$ .

В настоящей работе приведены термодинамические параметры сильнонеидеальной плазмы гелия, полученные ранее в работах [19–22], уточненные и обработанные единым методом. В новых экспериментах при ударно-волновом нагружении в полусферическом устройстве плазма гелия сжата до плотности  $\rho \approx 0.76 \text{ г/см}^3$  давлением  $P \approx 83 \text{ ГПа}$  при температуре  $T \approx 51000 \text{ К}$ , а с использованием двухкаскадной сферической камеры с разделенными полостями была достигнута рекордно высокая степень сжатия неидеальной плазмы гелия  $\sigma \approx 900$  при соотношении начального давления газа во внешней и внутренней полостях двухкаскадной сферической конструкции около 9 : 1. Выбранные значения начальных давлений гелия позволили обеспечить размер сжатой полости, доступный для его регистрации на имеющемся рентгенографическом оборудовании, и реализовать высокую степень сжатия плазмы.

## 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УДАРНО-СЖАТОГО ГАЗООБРАЗНОГО ГЕЛИЯ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ ДО 90 ГПа

В данном разделе представлены данные по исследованию свойств гелия, находящегося в газообразной форме, но имеющего начальную плотность, близкую к плотности жидкости [19], а также результаты нового эксперимента при давлении  $P \approx 83 \text{ ГПа}$ . Использование в опытах газообразного гелия дало возможность рассчитать его начальную плотность с высокой достоверностью, поскольку в случае газа она определяется начальными зна-

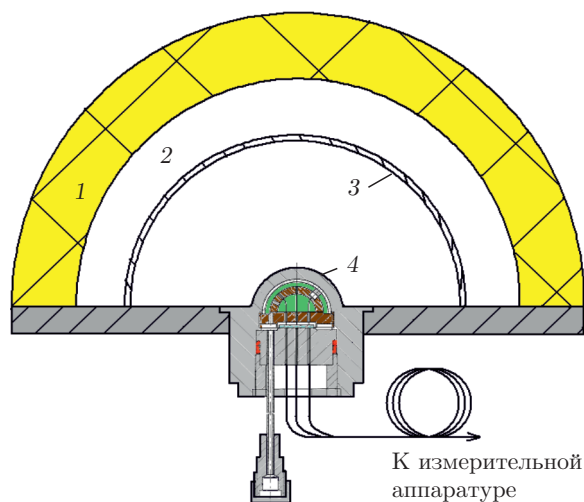


Рис. 1. Схема экспериментального устройства: 1 — ВВ, 2 — воздушный зазор, 3 — ударник, 4 — капсула [35]

чениями давления и температуры. Путем комбинации методов статического и динамического сжатия в экспериментах с гелием удалось достичь давлений мегабарного диапазона. Одновременно со сжимаемостью измерялась температура, что позволило получить дополнительную информацию о свойствах ударно-сжатой плазмы гелия.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. После инициирования мощного ВВ на основе гексогена 1 продуктами взрыва через воздушный зазор 2 разгонялся стальной полусферический ударник 3, формирующий при соударении с полусферическим корпусом капсулы 4 ударную волну в нем, которая далее последовательно передавалась в алюминиевую оболочку и гелий, сжимая и необратимо нагревая его. Для исключения влияния воздушной ударной волны на результаты эксперимента воздух из полости между ударником 3 и корпусом 4 откачивался до остаточного давления не выше 10 Торр (1350 Па).

Конструкция полусферической капсулы 4, рассчитанной на начальное давление газа до 300 МПа, приведена на рис. 2 [35]. Аналогичная капсула ранее использовалась в экспериментах с газообразным дейтерием в [7]. Устройство [35] содержит корпус 1, часть которого имеет полусферическую форму. Полусферический экран 2 из алюминия введен в устройство для повышения давления ударного сжатия в газе. С помощью диска 3, на котором закреплена полусферическая обойма 4, полусферический экран 2 при сборке устройства плотно прижимается к внутренней полусферической поверхности корпуса 1. В обойме 4 под заданными углами вклеены 19 световодов 5, полированные торцы которых с одной

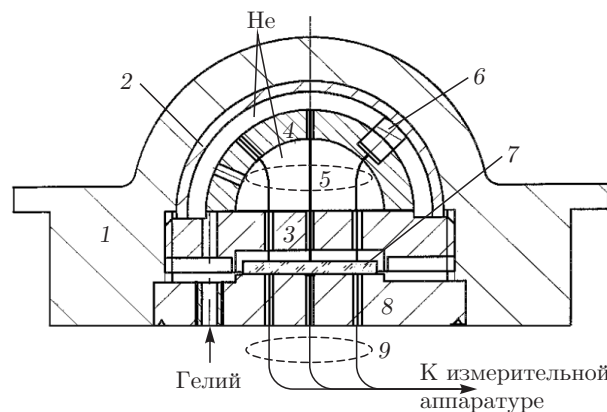


Рис. 2. Полусферическая капсула для измерения параметров ударно-сжатых газов высокой начальной плотности [35]: 1 — корпус, 2 — полусфера (Al), 3 — диск, 4 — обойма, 5 — световоды, 6 — эталон (Al), 7 — кварцевое стекло, 8 — основание, 9 — световоды

стороны установлены заподлицо с внешней поверхностью обоймы 4, а с другой — закреплены в отверстиях диска 3. Кроме того, на обойме 4 устанавливались эталонные образцы 6 из алюминия известной толщины для оценки параметров ударного сжатия в экране 2. Фиксированная высота эталонных образцов 6 (3 шт.) служит базой для измерения скорости ударной волны в исследуемом газе. Для герметизации конструкции используется кварцевое стекло 7, приклеенное к основанию 8 с помощью тонкого слоя клея, прозрачного в видимой области спектра. Как видно на рис. 2, каждый световод в устройстве выполнен из двух частей 5 и 9, установленных напротив друг друга по обе стороны стекла 7, что позволяет регистрировать свечение фронта ударной волны в гелии, по которому измеряется скорость ее распространения и температура. Аналогичные световоды устанавливались и под эталонными образцами 6, что позволяло оптическим методом измерить в них скорость ударной волны, по которой определялись параметры ударного сжатия в экране. При необходимости снижения давления сжатия гелия алюминиевый экран 2 не устанавливался, а эталонные образцы 6 выполнялись из железа.

Для заполнения полусферических капсул газообразным гелием разработан и изготовлен термокомпрессионный источник гелия, рассчитанный на максимальное рабочее давление 300 МПа. По результатам массспектрометрических анализов доля гелия в заправленном в источник газе составляет 99.96–99.97%. Начальная температура гелия принималась равной средней температуре на полусферической поверхности капсулы, которая регистрирова-

лась тремя термопарами. Начальная плотность гелия  $\rho_0$  рассчитывалась по измеренным значениям давления и температуры с использованием справочных данных [36]. С учетом [36] также уточнены значения  $\rho_0$ , ранее приведенные в работах [19–21].

Особенностью опытов со сферическими генераторами является рост скорости ударной волны в исследуемом веществе и элементах экспериментального устройства при движении волны к центру. В этом случае измеренное в эксперименте значение средней скорости ударной волны в гелии имеет смысл лишь для некоторого радиуса  $R_{meas}$ , находящегося на середине базы измерения, образованной высотой эталонного образца  $b$  (см. рис. 2). Таким образом, для оценки параметров ударно-сжатого гелия на границе разрыва экран–гелий необходимо приведение измеренного значения средней скорости к границе экрана. Такая корректировка возможна, но для этого необходимо знание уравнения состояния исследуемого вещества (т. е. гелия в данном случае). Поэтому в настоящей работе использован более простой прием. Параметры ударно-сжатого гелия находились из законов сохранения на границе распада разрыва, формально перенесенной на радиус измерения скорости ударной волны —  $R_{meas}$ . Для этого одновременно с измерением скорости ударной волны в гелии измерялась скорость ударной волны в эталонных образцах  $b$  (см. рис. 2), сделанных из того же материала, что и экран экспериментального устройства. По измеренному значению этой скорости с использованием УРС алюминия [37] или железа [38] находились параметры ударного сжатия в экране на радиусе  $R_{meas}$ , и из этого состояния строилась изэнтропа расширения. Ее пересечение с волновым лучом  $\rho_0 D_{He}$  и определяет состояние в ударно-сжатом гелии. Экспериментальный результат настоящей работы и результаты, полученные ранее в [19], приведены в табл. 1 и ниже на рис. 4 вместе с данными [9] и расчетами по разным уравнениям состояния. Разброс зарегистрированных значений  $D$  связан, по-видимому, с асимметрией выхода УВ на границы экспериментального устройства.

Для регистрации свечения фронта ударной волны использовались преобразователи оптических сигналов видимого спектра излучения, выполненные на фотодиодах со скоростью нарастания сигнала не хуже 2 нс, и фотоэлектронные умножители со временем нарастания анодного импульса 1.2 нс. Время движения ударной волны измерялось оптическим методом от момента появления свечения фронта до момента спада амплитуды свечения из-за повреждения торца световода ударной волной.

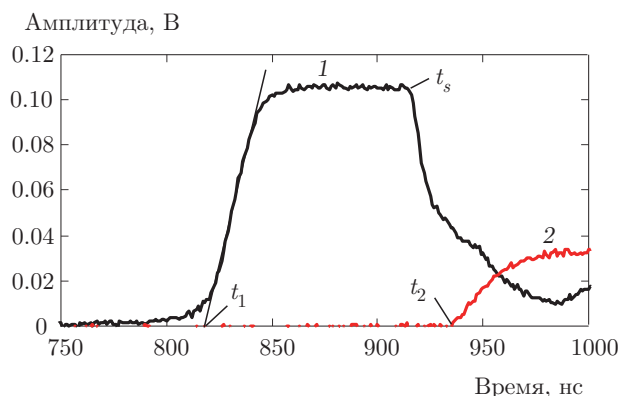


Рис. 3. Типичные осциллограммы излучения фронта ударной волны в гелии (1) и под эталонными образцами алюминия (2):  $t_1$  — выход ударной волны в исследуемый газ,  $t_2$  — выход ударной волны из эталонного образца,  $t_s$  — момент прихода ударной волны на торец световода

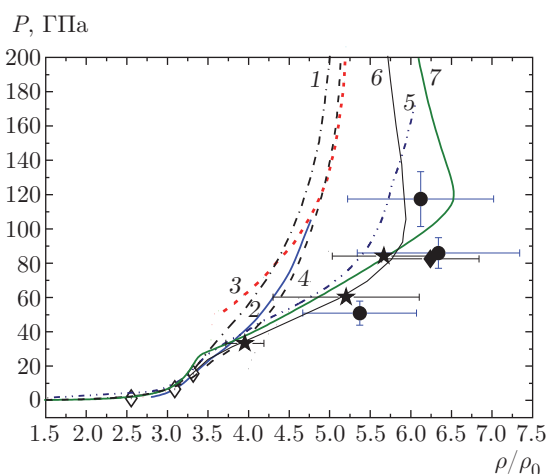


Рис. 4. Ударно-волновая сжимаемость газообразного гелия. Эксперимент:  $\diamond$  — [8],  $\bullet$  — [9],  $\star$  — [19],  $\blacklozenge$  — настоящая работа. Расчет: 1 — модель ВНИИЭФ, 2 — модель DFT-MD [25], 3 — PIMC [25], 4 — УРС 5761 [39], 5 — SCVH [23], 6 — [24], 7 — УРС 5760 [39]

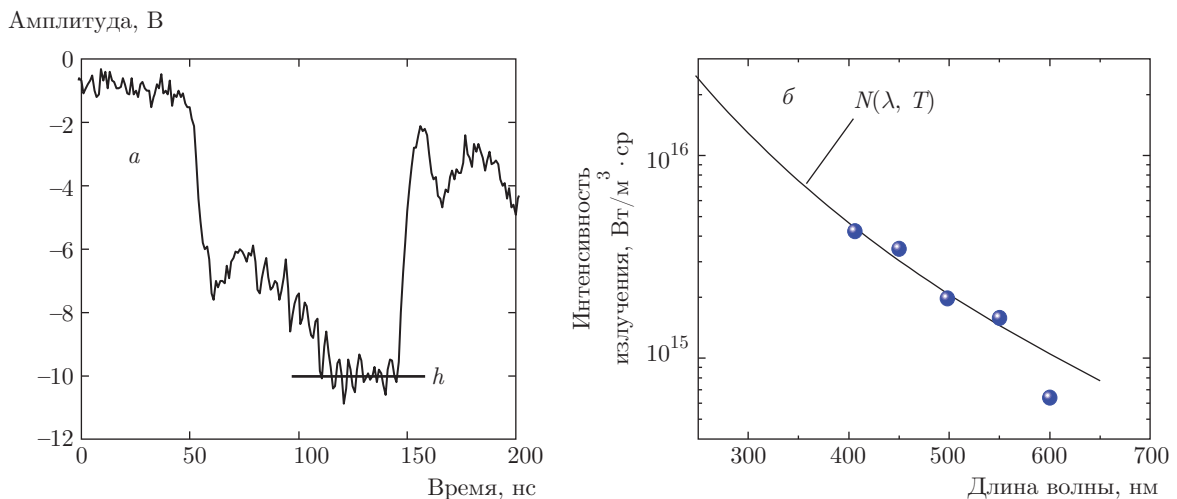
Типичные импульсы излучения, зарегистрированные фотодиодными датчиками, приведены на рис. 3. При обработке осциллограмм передний фронт импульсов аппроксимировали прямой линией и за начало свечения принимали точку ее пересечения с осью абсцисс.

Как видно на рис. 4, полученное в данной работе экспериментальное значение хорошо согласуется с данными [19] и [9]. Результаты расчетов, приведенные на рис. 5, условно можно разделить на две группы. К первой относятся модели, предсказываю-

**Таблица 1.** Параметры ударно-сжатого гелия:  $R_{meas}$  — радиус измерения скорости УВ в гелии и эталонных образцах,  $D_{stand}$  — скорость ударной волны в эталонных образцах,  $P_0, T_0, \rho_0$  — соответственно начальное давление, температура и плотность гелия,  $D_{He}$  и  $U_{He}$  — волновая и массовая скорости УВ в гелии,  $P_{He}, \rho_{He}, T_{He}$  — давление, плотность и температура ударно-сжатого гелия,  $\epsilon$  — излучательная способность фронта УВ

№	Радиус измерения и скорость ударной волны в эталонных образцах 6 (рис. 2)		Начальные параметры состояния гелия		Параметры ударной волны в гелии						
	$R_{meas}$ , мм	$D_{stand}$ , км/с	$P_0$ , атм.	$T_0$ , °C	$\rho_0^*$ , г/см <sup>3</sup>	$D_{He}$ , км/с	$U_{He}$ , км/с	$P_{He}$ , ГПа	$\rho_{He}$ , г/см <sup>3</sup>	$T_{He}$ , кК	$\epsilon$
HeN1 [19]	15.75 (Fe)	14.44(4.54 <sup>b</sup> )	1106	10.6	0.1245	19.1 ± 0.4	14.27	33.3 ± 1	0.48 ± 0.04	15.2 ± 3.8	0.88
HeN2 [19]	15.05 (Al)	18.70(3.16 <sup>b</sup> )	1160	9.8	0.1287	24.3 ± 1.1	19.63	60.3 ± 4	0.66 ± 0.16	32.9 ± 4.6	0.44
HeN3 [19]	15.05 (Al)	21.47(3.16 <sup>b</sup> )	1118	13.6	0.1245	28.9 ± 0.6	23.80	84.1 ± 3	0.69 ± 0.11	53.5 ± 9.2	0.39
HeN4 наст. работа	15.05 (Al)	21.47(3.16 <sup>b</sup> )	1104	10.9	0.1222	28.4 ± 0.3	23.85	82.6 ± 5	0.76 ± 0.11	50.7 ± 8.6	0.235

\* — уточненные значения начальной плотности гелия по данным [36]; (Fe), (Al) — материал экрана; (4.54<sup>b</sup>), (3.16<sup>b</sup>) — база измерения скорости УВ.



**Рис. 5.** Осциллограмма свечения фронта ударной волны в газообразном гелии (а) и описание спектральных температур функцией Планка в опыте HeN3 при  $T = 53500$  К,  $\epsilon = 0.39$  (б)

щие «жесткое» поведение сжимаемости плазмы гелия. Это расчеты, проведенные по модели ВНИИЭФ (кривая 1) и в рамках строгих подходов *ab initio* [25]: кривая 2 — методом DFT-MD, а кривая 3 — методом квантового Монте-Карло (PIMC). Из двух расчетов, выполненных по широкодиапазонным табличным уравнениям состояния гелия [39], расчет по УРС 5761 (кривая 4) также показывает более «жесткое» поведение ударно-сжатой плазмы гелия. Ре-

зультаты этих расчетов демонстрируют рост сжатия плазмы гелия до максимального значения  $\sigma = \rho/\rho_0 \sim 5.25$  при давлениях  $P \geq 200$  ГПа.

Ко второй группе можно отнести расчеты, удовлетворительно описывающие данные экспериментов [8, 9, 19]. К ним относятся расчеты, выполненные по модели SCVH [23] (кривая 5), по модели [24] (кривая 6) и по широкодиапазонному УРС 5760 (кривая 7) из библиотеки [39]. По-видимому, наблю-



даемое различие в расчетах по моделям первой и второй групп связано с особенностями описания в них роли ионизации. Отметим также, что расчеты по всем приведенным моделям, кроме расчета по модели РИМС [25] (кривая 3), хорошо описывают данные работы [8] в области давлений до 30 ГПа. Как видно на рис. 4, результат нового эксперимента подтверждает тенденцию «мягкого» поведения ударно-волновой сжимаемости гелия, впервые зафиксированную в работах [9, 19].

При измерении температуры использовался высокоскоростной оптический пирометр видимого диапазона спектра. Излучение фронта ударной волны в гелии, передающееся по оптической линии, регистрировалось на длинах волн 406, 450, 498, 550, 600 нм, выделяемых набором интерференционных светофильтров с максимальным пропусканием света около 50% при ширине полосы пропускания  $\Delta\lambda \approx 10$  нм на полувысоте. Оптическая линия для измерения температуры перед проведением эксперимента калибровалась с помощью эталонного источника света.

Поток теплового излучения нагретого тела при излучательной способности  $\epsilon$  определялся по формуле Планка:

$$N(\lambda) = \epsilon C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1}.$$

Здесь  $\epsilon$  — излучательная способность тела,  $\lambda$  — длина волны,  $T$  — истинная температура, постоянные  $C_1 = 1.19 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>/ср и  $C_2 = 0.0144$  мК. Задача нахождения температуры ударно-сжатых газов по измеренным значениям спектральных температур решалась нелинейным методом наименьших квадратов для двух параметров  $T$  и  $\epsilon$  и проведением итераций для получения точных оценок искомых величин.

Типичная осциллограмма излучения фронта ударной волны на длине  $\lambda = 406$  нм в гелии в эксперименте HeN3 при давлении  $P \approx 84$  ГПа, приведена на рис. 5а. Спектральная температура ударно-сжатого гелия определялась по амплитуде  $h$  на участке насыщения излучения фронта ударной волны. Описание измеренных температур функцией Планка для этого эксперимента приведено на рис. 5б.

Экспериментальные значения температур ударно-сжатого газообразного гелия приведены в табл. 1 и на рис. 6 вместе с зависимостями, рассчитанными по УРС ВНИИЭФ и квантовым методом Монте-Карло [25]. Как видно на рис. 6, расчеты температуры по обеим моделям хорошо согласуются с

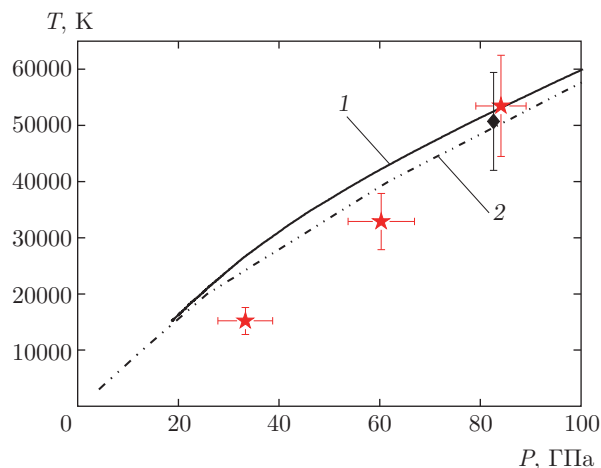


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные данные по температурной зависимости в ударно-сжатом гелии от давления. Эксперимент:  $\blacklozenge$  — настоящая работа;  $\star$  — данные [19]. Расчет: 1 — УРС ВНИИЭФ, 2 — модель РИМС [25]

экспериментом из настоящей работы при давлениях выше примерно 80 ГПа. В области давлений до  $P \approx 70$  ГПа расчеты демонстрируют завышенные значения температуры.

Нарастание свечения фронта УВ после ее выхода в гелий можно связать с увеличением толщины слоя сжатого газа и его прозрачностью. Если пренебречь отражением, а пропускание излучения оценить по формуле Бугера – Ламберта – Бэра

$$\tau = \exp(-\alpha l),$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения излучения слоем толщиной  $l$ , то нарастание интенсивности излучения в направлении нормали можно записать в виде

$$I = I_0 [1 - \exp(-\alpha l)] = I_0 [1 - \exp(-\alpha \{D - U\}t)],$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения оптически плотного слоя,  $l = (D-U)t$  — толщина слоя ударно-сжатого вещества,  $t$  — время движения ударной волны по веществу. В этом случае при известных кинематических параметрах  $D$  и  $U$  из экспериментальной осциллограммы можно определить коэффициент поглощения света в ударно-сжатом гелии:

$$\alpha = -1/(D - U)t \ln(1 - I/I_0).$$

Среднее значение коэффициента поглощения света в ударно-сжатом гелии, полученное таким образом в опыте HeN3, составляет величину  $\alpha \approx 44$  см<sup>-1</sup> в диапазоне длин волн (406–600) нм при температуре ударного сжатия  $T = 51000$  К и давлении  $P \approx 84$  ГПа.

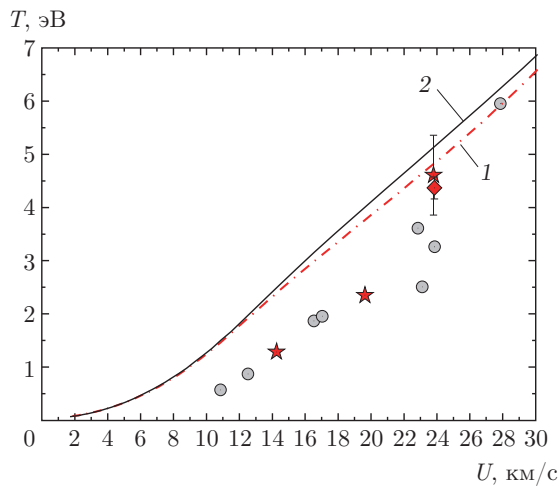


Рис. 7. Температура ударно-сжатого газообразного гелия в зависимости от массовой скорости. Эксперимент: ● — [9], ★ — [19], ◆ — настоящая работа. Расчет: 1 — УРС ВНИИЭФ, 2 — [25]

Сравнение данных по температурной зависимости ударно-сжатого гелия от массовой скорости, полученных во ВНИИЭФ и [9], показано на рис. 7. Как видно на рисунке, экспериментальные данные демонстрируют anomalous скачкообразное изменение температуры ударно-сжатого гелия в области массовых скоростей  $U \approx 24$  км/с.

### 3. КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ГАЗООБРАЗНОГО ГЕЛИЯ

#### 3.1. Экспериментальные устройства. Схема опыта

Общий вид экспериментальных сферических устройств для исследования квазиизэнтропической сжимаемости гелия приведен на рис. 8. Для сжатия газа используется мощное ВВ 1 на основе октогена. Обе оболочки двухкаскадных экспериментальных устройств изготовлены из стали. Соединения полусферических оболочек 2 и 3 выполнены методом электронно-лучевой сварки. В устройстве первого типа (рис. 8а) заполнение полостей газом осуществляется по трубопроводу Т1, впаянному в оболочку 2, и через отверстия во внутренней оболочке 3. В устройстве второго типа (рис. 8) система подачи газа в полости оболочек выполнена коаксиальным способом по трубопроводам Т1 и Т2. Соединение внутренней камеры 3 с трубкой подачи газа Т2 выполнено лазерной сваркой. Диаметр внешней трубки Т1 составляет 4 мм, внутренней Т2 —

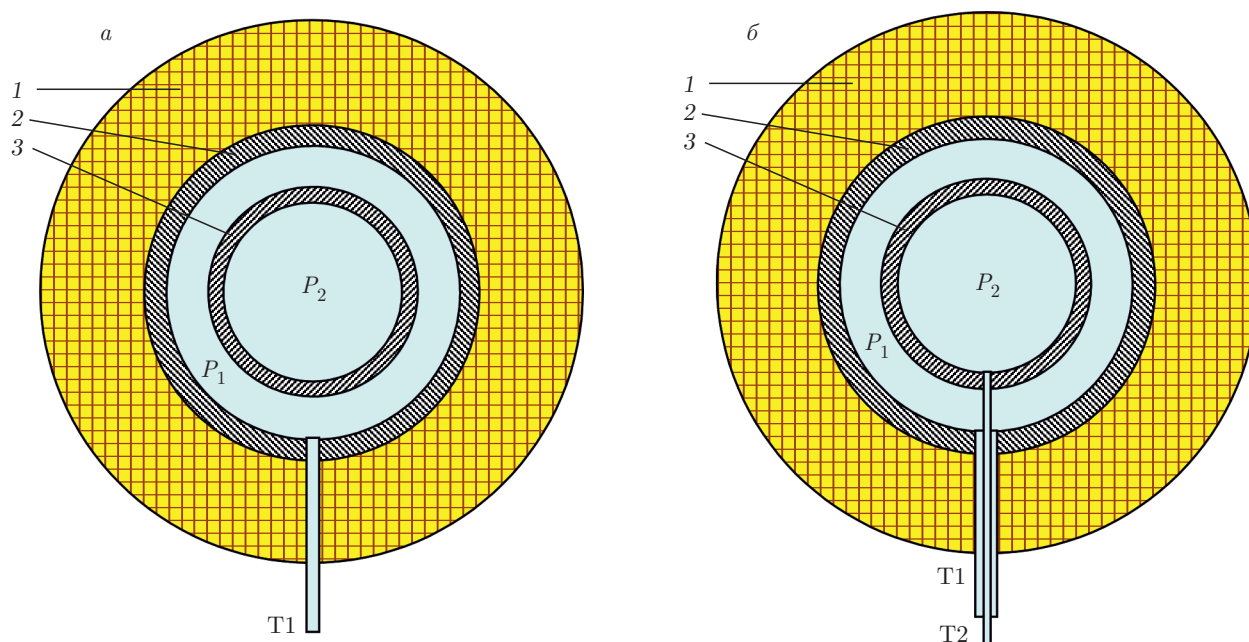
1 мм. Параметры экспериментальных устройств и начального состояния газа в полостях оболочек приведены в табл. 2.

Схема эксперимента приведена на рис. 9. Для регистрации фаз движения оболочек, сжимающих исходно газообразный гелий, одновременно используются три мощных безжелезных [40] импульсных бетатрона 1. Особенностью данного комплекса является возможность последовательной генерации трех рентгеновских импульсов каждым бетатроном. Длительность излучения бетатрона в моноимпульсе составляет примерно 90 нс. В режиме генерации трех импульсов длительность каждого из них составляет 120...190 нс.

Рентгеновские установки расположены под углом  $45^\circ$  друг к другу в защитном сооружении 2. В опыте используется индивидуальная оптико-электронная система детектирования 3, имеющая динамический диапазон регистрации около  $10^3$ , которая активируется синхронно с импульсами бетатрона, что и позволяет получать три независимых рентгеновских изображения. В качестве преобразователей рентгеновского излучения в видимое в данной системе используются монокристаллы йодистого натрия и силикат лютеция. Для устранения паразитного рассеянного излучения используются свинцовые коллиматоры 4. Для защиты регистраторов 3 применены алюминиевые конусы 5.

Наполнение камер гелием производилось от термомокомпрессора, способного заполнять газом чистой 99.99% объема около 2 л до давлений примерно 50 МПа (500 кгс/см<sup>2</sup>). Процесс заполнения газом полостей сферического устройства контролировался в реальном времени. Величина начального давления газа в процессе заполнения измерялась датчиком S-10 фирмы WIKA (класс точности 0.25). Температура газа контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, расположенной внутри оболочки в устройстве первого типа и на входе в камеру в устройстве второго типа. Плотность гелия  $\rho_0$  рассчитывалась по измеренным значениям давления и температуры с использованием справочных данных [36]. Начальные параметры гелия в экспериментах приведены в табл. 2.

Все полученные рентгенограммы обработаны методом, изложенным в [41]. Относительная погрешность определения радиуса газовой полости методом [41] определена авторами на основании экспериментов со статическими макетами и составляет примерно 4% для объектов радиусом  $R \approx 10$  мм. С учетом погрешностей трассировки газовой полости, измерений начальной плотности газа и абсолютной по-



**Рис. 8.** Схематическая конструкция двухкаскадных устройств сферической геометрии: 1 — ВВ, 2 — внешняя оболочка Fe1, 3 — внутренняя оболочка Fe2: а — устройство первого типа с равным давлением в полостях оболочек  $P_1 = P_2$ ; б — устройство второго типа с разделенными полостями  $P_1 \neq P_2$

**Таблица 2.** Начальные параметры гелия в опытах:  $P_0$  — начальное давление,  $T_0$  — начальная температура,  $\rho_0$  — начальная плотность,  $S_0/R$  — относительная энтропия,  $R = 2.0785 \cdot 10^{-3}$  кДж/г·К

Устройства первого типа						
Опыт №	$P_{01}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$T_0$ , К	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$S_0/R$		
HeN5	167	300.2	0.0244	4.8489		
HeN6	273	302	0.0380	4.8535		
Устройства второго типа						
Опыт	$P_{01}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$P_{02}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$T_0$ , К	$\rho_{01}$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_{02}$ , г/см <sup>3</sup>	$S_0/R$
HeN7	364	51	301.5	0.049	0.0078	4.8547
HeN8	357	34.7	282.5	0.051	0.0058	4.7586

грешности измерения начального диаметра газовой полости  $\Delta R \approx 0.02$  мм относительная погрешность измерения плотности квазиизэнтропически сжатой плазмы гелия в настоящей работе оценивается величиной  $\Delta\rho/\rho \approx \pm 13\%$ .

### 3.2. Определение параметров сжатой плазмы гелия

Для определения давления в сжатой плазме гелия выполнены газодинамические расчеты экспери-

ментальных устройств с использованием одномерной программы [42], предназначенной для численного моделирования неустановившихся движений сплошной среды, протестированной по экспериментальным данным, полученным в России и за рубежом.

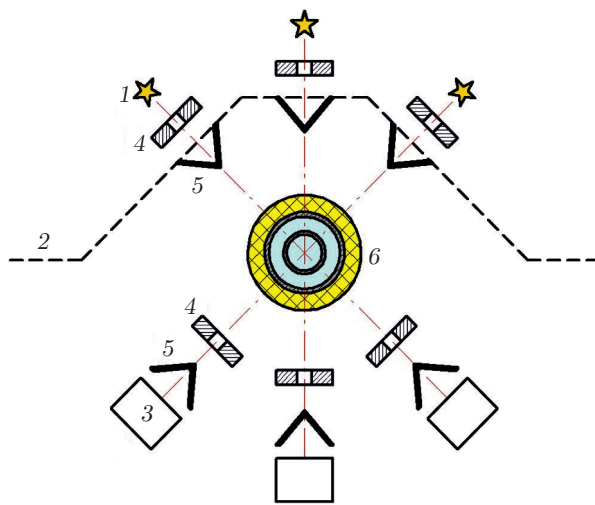
В расчетах для гелия использовалось УРС в табличной форме, разработанное во ВНИИЭФ В. В. Хрустальевым на основе модифицированной модели сжимаемого коволюма [43, 44], в которой учитывались результаты расчетов термодинамических свойств жидкости, выполненные



**Таблица 3.** Данные по квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия. Расчеты выполнены в одномерном приближении

Эксперимент	$\rho_0, \text{г/см}^3$	$R_{min}, \text{мм}$	$\rho_{exp}, \text{г/см}^3$	$\sigma = \rho_{exp}/\rho_0$	$P_{calc}, \text{ГПа}$	$\rho_{calc}, \text{г/см}^3$	$T_{calc}, \text{кК}$	$S/R$
HeN5 [19]	0.0244	10.0	$3.8 \pm 0.5$	152	1659	3.74	69	14
HeN6 [20, 21]	0.038	6.6	$7.7 \pm 1.0$	221	4780	7.2	71	16
HeN7 [22]	0.0078*	8.27	$4.6 \pm 0.6$	575	2960	4.86	101	14.6
HeN8 наст. работа	0.0057*	7.24	$5 \pm 0.65$	862	3685	5.35	113	14.9

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



**Рис. 9.** Схема эксперимента с устройствами сферической геометрии: 1 — бетатрон, 2 — защитное сооружение, 3 — регистратор, 4 — коллиматор (Pb), 5 — защитный конус (Al), 6 — экспериментальное устройство

методом Монте-Карло, с обратным степенным потенциалом взаимодействия между частицами  $\varphi(r) = \epsilon(\sigma/r)^n$  [45].

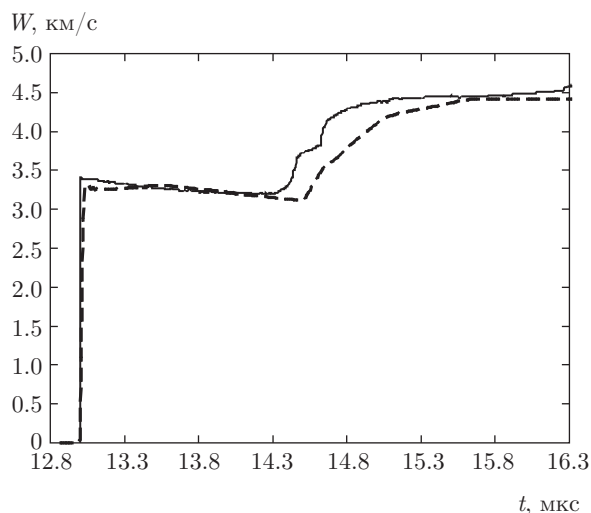
Для учета влияния упругопластических свойств стальных оболочек в настоящей работе использована дислокационная модель [46], учитывающая затухание упругого предвестника и релаксацию сдвиговых напряжений, что позволяет детально описать эволюцию импульса ударно-волнового нагружения. В рамках этой модели были заново проведены газодинамические расчеты экспериментальных устройств для ранее выполненных экспериментов [19–22], что позволило обработать все полученные данные по сжатию неидеальной плазмы гелия единым методом.

### 3.3. Экспериментальные данные

Давление в плазме сжатого гелия определялось из газодинамических расчетов с учетом реальных термодинамических и прочностных свойств всех элементов экспериментальных устройств и их уравнений состояния. Основным критерием истинности получаемого в расчетах давления можно считать удовлетворительное описание всей  $R(t)$  траектории движения оболочек экспериментального устройства. Для тестирования расчетных моделей авторами в серии специально поставленных опытов была изучена динамика разгона полета оболочки первого каскада, а также определено ее состояние (наличие откола и последующего компактирования). Для регистрации параметров движения ударной и детонационной волн использована электроконтактная методика (более 200 датчиков), а также рентгенографическая и гетеродин-интерферометрическая (PDV) [47] методики. Результаты этих исследований приведены ниже.

HeN5. Диаграмма скорости движения внутренней границы внешней оболочки Fe1 (см. рис. 8), зарегистрированная PDV-методом для эксперимента HeN5 (см. табл. 2), приведена на рис. 10.

Экспериментальные данные для опыта HeN5 вместе с рассчитанными  $R(t)$  траекториями движения оболочек приведены на рис. 11а и рис. 11б. Также на рис. 11б приведена рассчитанная траектория движения внутренней границы оболочки Fe2 без газа в ее полости. В эксперименте зарегистрировано 9 фаз сжатой плазмы гелия [19]. Рентгенограмма эксперимента в момент максимального сжатия приведена на рис. 11б. Положение внутренней границы оболочки Fe2 экспериментального устройства и гелия обозначено белыми штрихами. Результат трас-



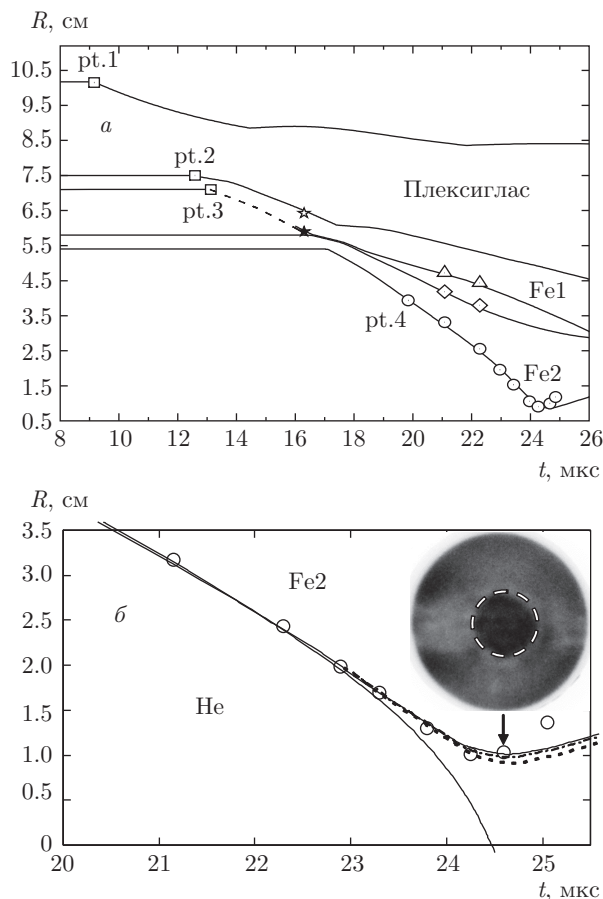
**Рис. 10.** Диаграмма скорости движения внутренней границы внешней оболочки в экспериментальном устройстве первого типа: сплошная линия — эксперимент, штриховая — расчет

сировки газовой полости в момент максимального сжатия приведен в табл. 3.

Полученная информация о скорости движения внутренней границы оболочки, зарегистрированная методом PDV, вместе с учетом дислокационной модели деформирования стальных оболочек, была использована для ревизии методики расчета процесса сжатия плазмы гелия в этом и во всех последующих экспериментах. На рис. 11а видно, что выполненный расчет хорошо согласуется с экспериментальной траекторией движения внутренней границы оболочки (ВГО1) первого каскада (Fe1), полученной методом лазерной PDV-диагностики.

Рассчитанная траектория  $R(t)$  внутренней границы оболочки (ВГО2) второго каскада (Fe2) также хорошо согласуется с результатами эксперимента и описывает все контрольные точки (pt.1, pt.2, pt.3) движения УВ, а также время первого рентгенографирования ( $t_4$ ). Здесь: точка pt.1 — время ( $t_1$ ) прихода УВ на внешнюю границу плексигласовой оболочки; точка pt.2 — время ( $t_2$ ) прихода УВ на наружную границу Об.1, точка pt.3 — время ( $t_3$ ) прихода УВ на ВГО2.

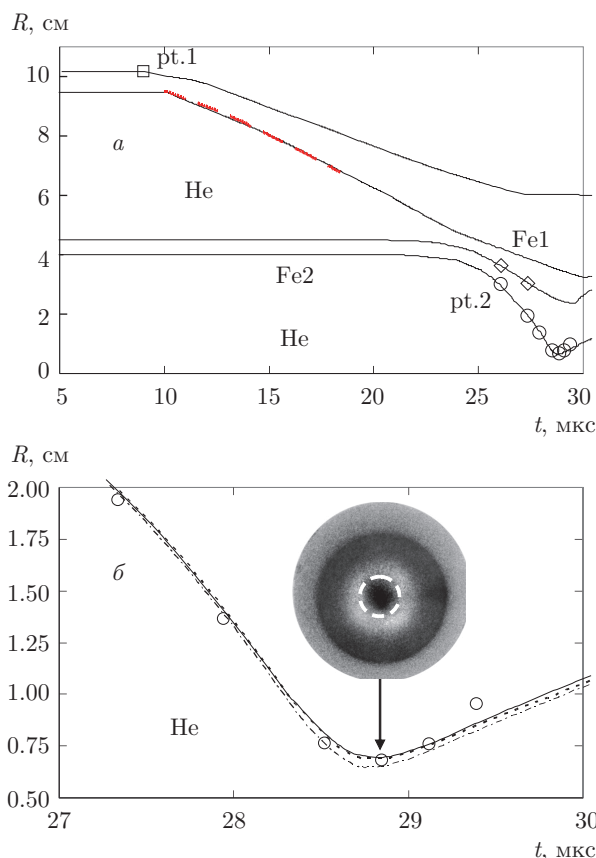
Как видно на рис. 11б, торможение оболочки Fe2 плазмой проявляется лишь на конечной стадии процесса сжатия и приводит к отклонению траектории  $R(t)$  от траектории движения при отсутствии газа в ее полости (эталонная кривая). Это отклонение полностью определяется свойствами сжатой плазмы и позволяет использовать метод диаграмм  $R(t)$  для определения УРС. Этот вывод имеет место для



**Рис. 11.** Диаграммы движения оболочек экспериментального устройства в опыте HeN5: □ — результат измерения движения УВ (по данным электроконтактных измерений); штриховая линия — траектория движения внутренней границы внешней оболочки (Fe1) по данным лазерной методики PDV; результаты рентгенографирования [19]: △ — внутренняя граница оболочки первого каскада (Fe1); ◇ — внешняя граница оболочки второго каскада (Fe2); ○ — внутренняя граница оболочки второго каскада (Fe2); светлая и темная звездочки — соответственно наружная и внутренняя границы оболочки первого каскада [19]; расчет: сплошная линия — УРС гелия ВНИИЭФ, штрихпунктир — УРС 5760 [39], пунктир — УРС 5761 [39], белые штрихи — результат обработки рентгенограммы

всех экспериментальных устройств из настоящей работы. Совпадение на значительном участке траекторий  $R(t)$  движения оболочек при наличии и отсутствии газа позволяет не проводить «эталонные» опыты, учитывая их высокую стоимость.

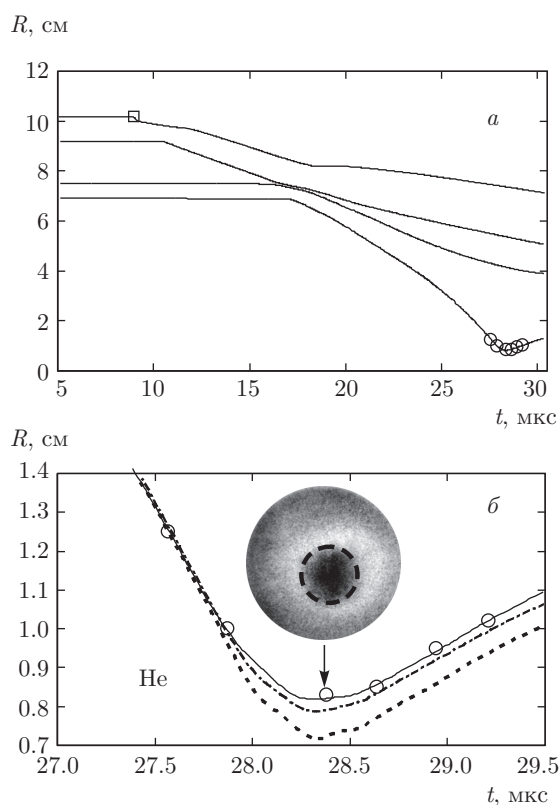
На рис. 11б показаны также результаты газодинамических расчетов в области максимального сжатия плазмы при использовании в расчетах УРС гелия 5760 и 5761 из библиотеки [39]. При выбранной методике расчетов из рис. 11б следует, что расчет



**Рис. 12.** а) Диаграммы движения оболочек экспериментального устройства в опыте HeN6: □ — результат измерения движения УВ (по данным электроконтактных измерений); штриховая линия — траектория движения внутренней границы внешней оболочки (Fe1) по данным лазерной методики PDV; результаты рентгенографирования [20]: ◇ — внешняя граница оболочки второго каскада (Fe2); ○ — внутренняя граница оболочки второго каскада (Fe2); б) расчет: сплошная линия — УРС гелия ВНИИЭФ, пунктир — УРС 5760 [39], штрихпунктир — УРС 5761 [39], белые штрихи — результат обработки рентгенограммы

с использованием УРС гелия 5760 [39] удовлетворительно согласуется с данными эксперимента. Расчет по УРС гелия 5761 [39] демонстрирует несколько более высокое сжатие ( $R_{min} = 0.91$  см), чем это следует из расчетов по УРС гелия ВНИИЭФ ( $R_{min} = 1.01$  см) и УРС гелия 5760 ( $R_{min} = 0.97$  см).

Из расчетов конструкций, кроме диаграмм  $R(t)$ , получены также распределения давлений  $P(R)$ , температур  $T(R)$  и плотностей  $\rho(R)$  в плазме гелия по радиусу полости. Учитывая кумулятивный характер процесса сжатия в использованных устройствах, для оценки основных термодинамических параметров сжатой плазмы авторы использовали значения давления и температуры в плазме в момент ее мак-



**Рис. 13.** а) Экспериментальные данные и рассчитанные диаграммы движения оболочек  $R(t)$  сферического устройства в эксперименте HeN7 [22]: ○ — данные рентгенографического эксперимента, □ — результат измерения движения УВ; б) сравнение результатов газодинамических расчетов с использованием различных УРС: сплошная линия — УРС ВНИИЭФ, штрихпунктир — УРС 5760 [39], пунктир — УРС 5761 [39], черные штрихи — результат обработки рентгенограммы

симального сжатия, полученные усреднением расчетных значений  $P(R)$  и  $T(R)$  по массе. Термодинамические параметры неидеальной плазмы гелия, достигнутые в опыте HeN5 [19], приведены в табл. 3.

HeN6 [20]. Экспериментальные данные и рассчитанные диаграммы  $R(t)$  движения оболочек приведены на рис. 12 в области, где проявляется основное влияние газа. Там же показана рентгенограмма сжатой плазмы гелия в момент максимального сжатия. Положение внутренней границы оболочки Fe2 экспериментального устройства обозначено белыми штрихами. Как видно на рис. 12а, при выбранной методике тестирования результаты расчета хорошо описывают как время ( $t_1$ ) прихода УВ на внешнюю границу первого каскада устройства (pt.1), время ( $t_2$ ) первого рентгенографирования (pt.2), так и размеры оболочки в последующие моменты сжатия.



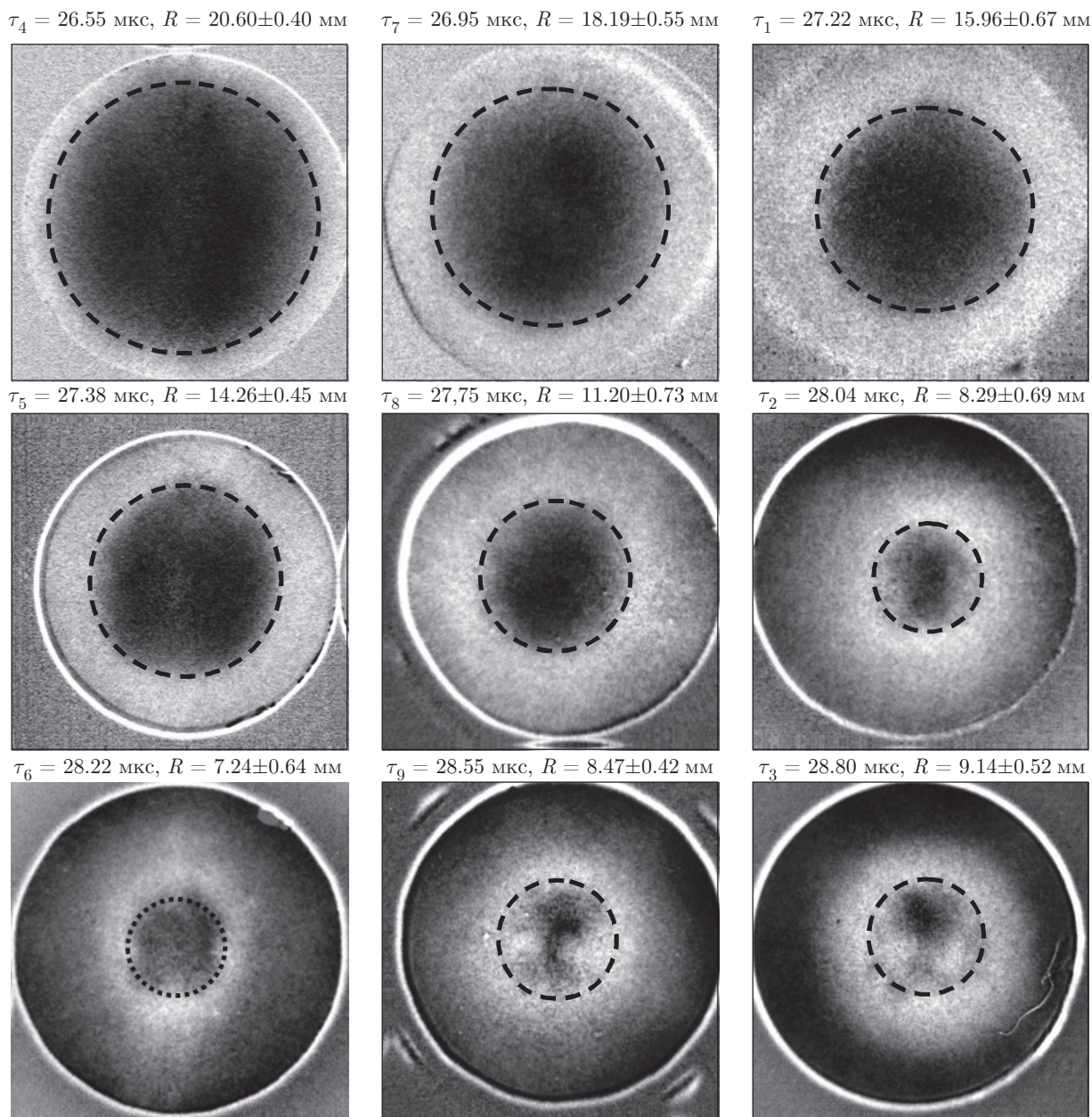


Рис. 14. Результаты трассировки границ (черные штрихи) экспериментального устройства HeN8, масштаб представления 1 : 1 относительно объекта. Времена даны от момента иницирования ВВ

В эксперименте HeN6 зарегистрирован внутренний радиус оболочки Fe2 на момент максимального сжатия газа  $R_{min} = 0.66 \text{ см}$ , что соответствует плотности плазмы гелия  $\rho = 7.7 \text{ г/см}^3$  и сжатию  $\sigma \approx 200$  при давлении  $P = 4780 \text{ ГПа}$ . Экспериментально измеренная величина плотности сжатой плазмы гелия  $\rho_{exp} = (7.7 \pm 1.0) \text{ г/см}^3$  согласуется с рассчитанным значением  $\rho_{calc} = 7.2 \text{ г/см}^3$  в пределах 7%. Термодинамические параметры неидеальной плазмы гелия

для опыта HeN6 приведены в табл. 3.

Последующие два эксперимента HeN7 и HeN8, которые различаются только давлением гелия во внутренней полости (см. табл. 2), выполнены на сферических устройствах второго типа с разделенными полостями.

HeN7 [22]. Экспериментальные данные и рассчитанные диаграммы  $R(t)$  движения оболочек приведены на рис. 13 в области, где начинает сказываться

Таблица 4. Исходные состояния для расчета изэнтроп и параметры плазмы гелия в момент «фокусировки» ударной волны

№ устройств	Исходные состояния на ударной адиабате гелия для расчета изэнтроп			Параметры плазмы гелия в момент «фокусировки»		
	$P_{0H}$ , ГПа	$\rho_{0H}$ , г/см <sup>3</sup>	$T_{0H}$ , К	$P_{foc}$ , ГПа	$\rho_{foc}$ , г/см <sup>3</sup>	$T_{foc}$ , К
HeN5 [19]	1.394	0.0895	6580	8.25	0.238	13474
HeN6 [20, 21]	1.22	0.125	3750	33.54	0.703	13577
HeN7 [22]	0.246	0.028	3970	2.336	0.106	9780
HeN8 наст. работа	0.1695	0.021	3779	1.677	0.08	9716

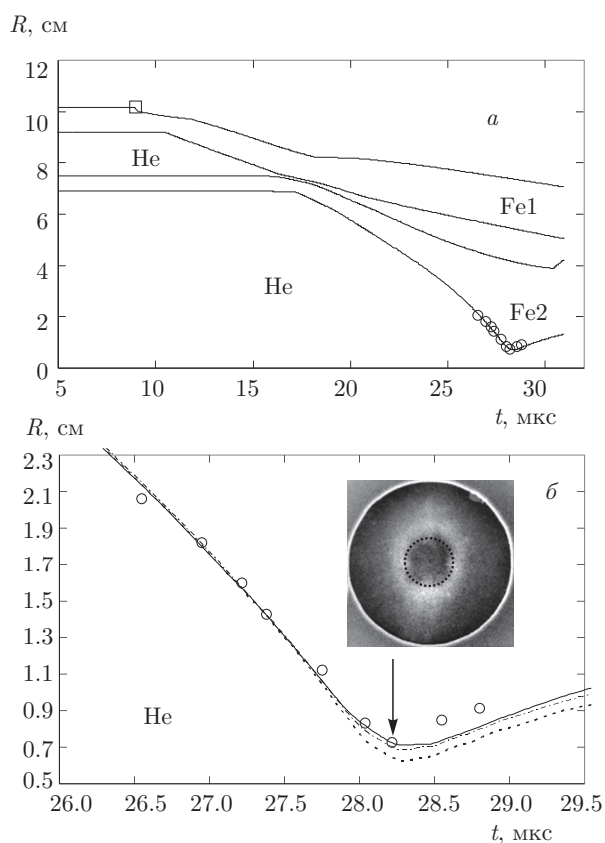


Рис. 15. Экспериментальные данные и рассчитанные диаграммы движения оболочек  $R(t)$  сферического устройства в эксперименте HeN8:  $\circ$  — данные рентгенографического эксперимента,  $\square$  — результат измерения движения УВ, сплошная линия — газодинамический расчет (УРС ВНИИЭФ), штрихпунктир — УРС 5760 [39], пунктир — УРС 5761 [39], черный пунктир — результат обработки рентгенограммы методом [41]

влияние газа. Там же показана рентгенограмма эксперимента на момент максимального сжатия.

HeN8. В новом эксперименте с гелием зарегистрированы 9 фаз сжатия плазмы. Результаты трассировки границ оболочки Fe2 приведены на рис. 14; пунктиром показана граница полости с плазмой гелия.

Экспериментальные данные и рассчитанные диаграммы  $R(t)$  движения оболочек в новом эксперименте HeN8 приведены на рис. 15 в области, где начинает проявляться влияние газа.

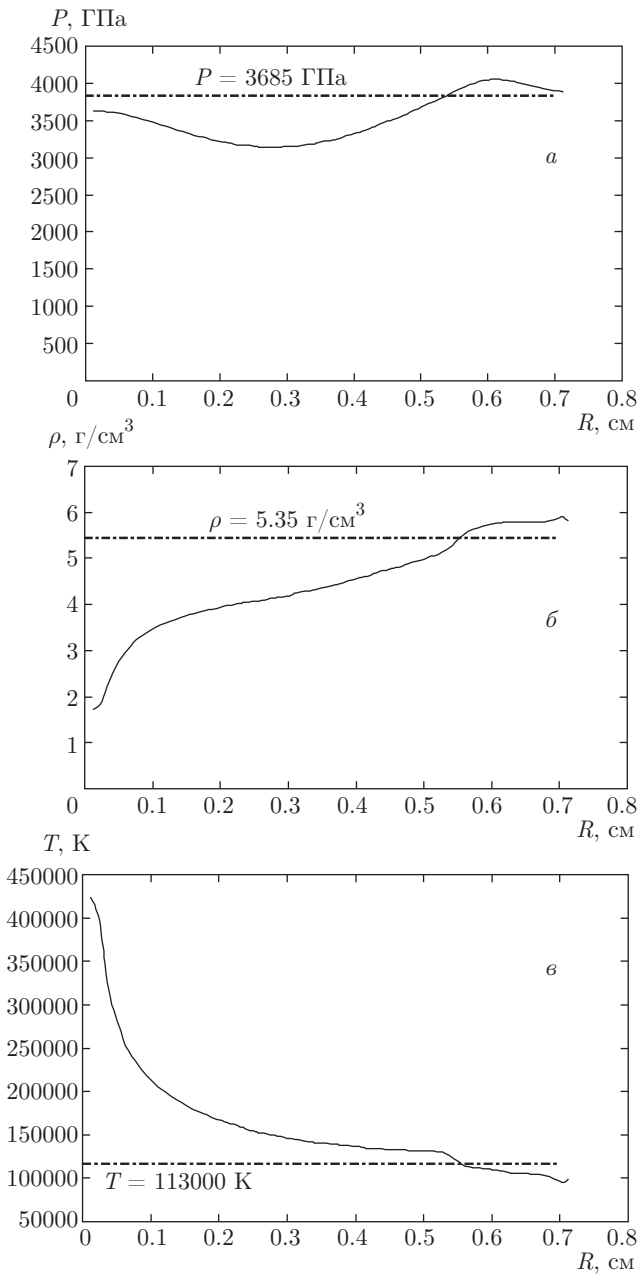
Результаты расчетов распределений  $P(R)$ ,  $\rho(R)$ ,  $T(R)$  в неидеальной плазме гелия при максимальном сжатии в опыте HeN8 приведены на рис. 16. Там же показаны усредненные по массе значения давления, плотности и температуры.

Термодинамические параметры неидеальной плазмы гелия для опытов HeN7 и HeN8 приведены в табл. 3.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 17 приведена зависимость давления квазиэнтропически сжатой неидеальной плазмы гелия от степени сжатия. Анализ полученных данных показывает, что в двухкаскадных сферических устройствах первого типа при одинаковом начальном давлении газа в обеих полостях степень сжатия не превышает  $\sigma \approx 200$  вплоть до давлений  $P \approx 4800$  ГПа. В экспериментах с устройствами второго типа в настоящей работе достигнута уникально высокая степень сжатия гелия  $\sigma \approx 900$ . Полученный результат удовлетворительно согласуется с кривой, рассчитанной в предположении, что давление

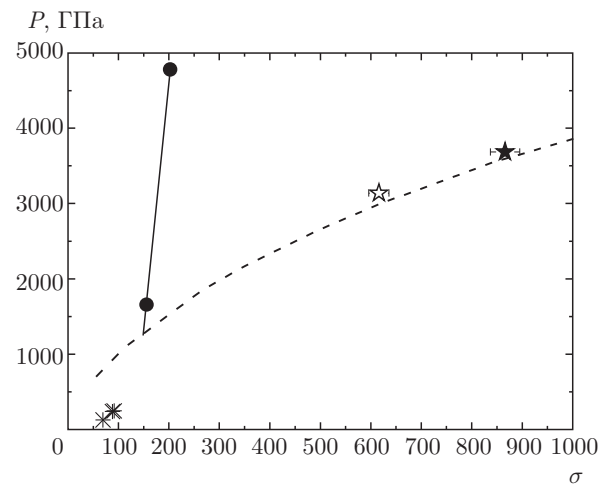




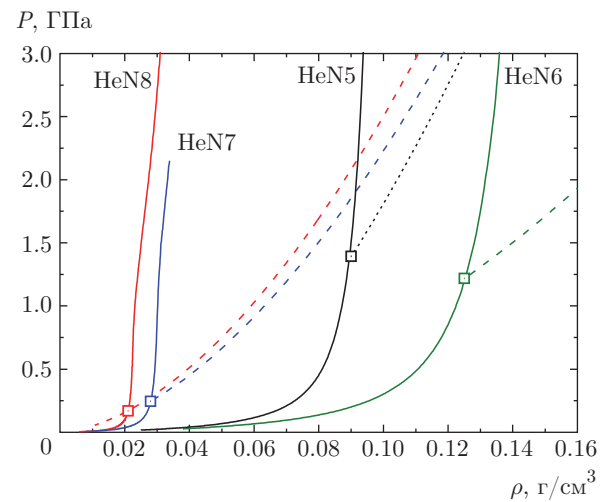
**Рис. 16.** Распределения давления (а), плотности (б) и температуры (е) по радиусу плазмы гелия в момент «остановки» оболочки (максимальное сжатие) в опыте HeN8

во внешнем каскаде устройства сохраняется постоянным  $P_{01} = 36.5$  МПа, а во внутренней оболочке — меняется от 4 до 36.5 МПа.

Как видно из анализа экспериментальных данных для устройств первого типа (опыт HeN5), расчеты диаграмм  $R(t)$  по УРС гелия ВНИИЭФ и УРС гелия 5760 [39] удовлетворительно согласуются друг с другом, однако расчет по УРС гелия 5761 [39] демонстрирует более высокую степень сжатия



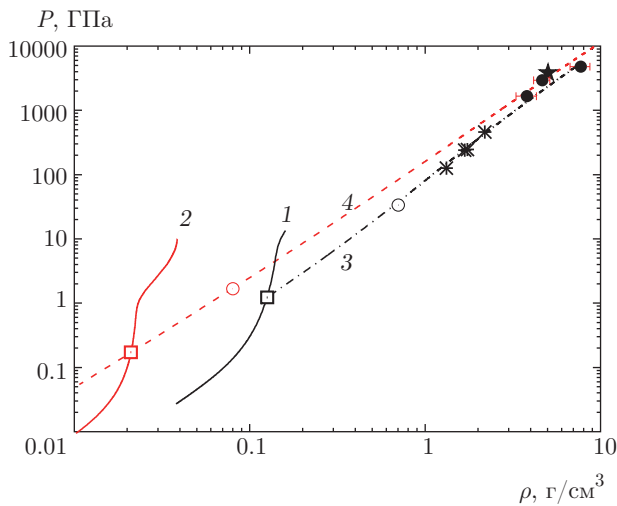
**Рис. 17.** Зависимость давления от степени сжатия в квазиизэнтропически сжатой неидеальной плазме гелия. Эксперимент: ● — при равном давлении газа в обеих полостях [19–21], \* — [48]. Эксперименты с разным давлением гелия в полостях: светлая звездочка — [22], темная — настоящая работа. Расчет: штриховая линия — с переменным давлением во внутреннем каскаде  $P_2 = 40 \dots 365$  атм при давлении газа во внешней полости  $P_1 = 365$  атм, сплошная линия — аппроксимация результатов сферических экспериментов [19–21]



**Рис. 18.** Зависимости давления от плотности при ударно-волновом сжатии гелия: □ — исходные состояния для расчета изэнтроп; начальные участки изэнтроп обозначены штриховыми линиями

(рис. 11б). Иная ситуация наблюдается для эксперимента HeN6 при давлении сжатой плазмы гелия  $P = 4780$  ГПа, где расчеты по всем трем УРС хорошо описывают экспериментальные данные.

Существенно более значимое различие расчетов имеет место при описании данных  $R(t)$  для

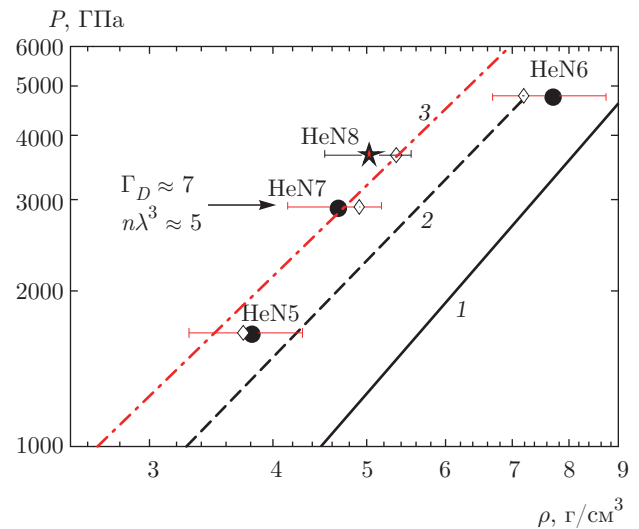


**Рис. 19.** Квазиизэнтропическое сжатие неидеальной плазмы гелия. Эксперимент: ★ — настоящая работа; ● — [19–22]; \* — [48]; 1 — ударная адиабата для опыта HeN6; 2 — ударная адиабата для опыта HeN8; 3 — изэнтропа  $S/R = 16$  [20, 21] для опыта HeN6; 4 — изэнтропа  $S/R = 14.9$  (настоящая работа); ◻ — параметры плазмы гелия в момент «фокусировки» УВ

устройств второго типа в опытах HeN7 (рис. 13б) и HeN8 (рис. 15б).

Как показывает анализ данных, различие расчетов траекторий  $R(t)$  по всем рассмотренным УРС гелия уменьшается при давлениях  $P \approx 4000$  ГПа и практически исчезает при давлениях сжатой плазмы гелия  $P = 4800$  ГПа.

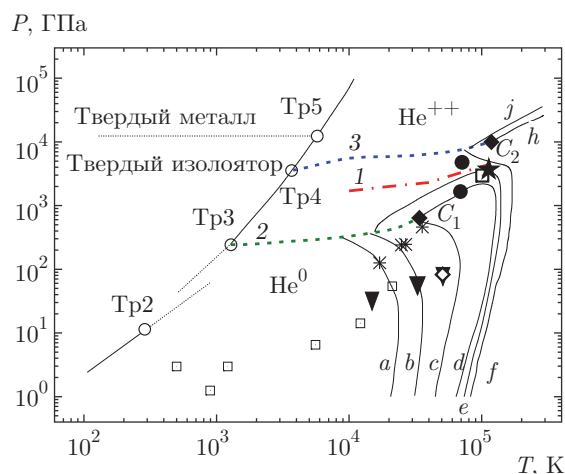
Процесс квазиизэнтропического сжатия, реализованный в настоящей работе, предполагает, что газообразный гелий сжимается в два этапа. Как следует из постановки экспериментов, первоначально гелий сжимается в ударной волне. В работе [22] показано, что изэнтропическим процесс сжатия можно считать уже с момента времени, когда первая ударная волна прошла всю область газа, «сфокусировалась» в центре оболочки (момент «фокусировки» —  $t_{foc}$ ) и сформировалась отраженная ударная волна. При расчете изэнтроп использовали следующий формальный подход. Изэнтропа разгрузки строилась из состояний при максимальном сжатии плазмы гелия, рассчитанных для конкретных экспериментов, до ее пересечения с ударной адиабатой, решая обратную задачу нахождения исходного состояния на ударной адиабате. Найденные таким образом исходные  $P$ – $\rho$ –состояния для расчета изэнтроп обозначены прямоугольниками на рис. 18 и приведены в табл. 4. Ударные адиабаты гелия, рассчитанные по УРС гелия ВНИИЭФ, также приведены на рис. 18.



**Рис. 20.** Квазиизэнтропическое сжатие неидеальной плазмы гелия. Эксперимент: ★ — настоящая работа; ● — [19–22]; ◊ — результаты расчетов (максимальное сжатие), 1 — «холодная» адиабата по УРС гелия ВНИИЭФ; 2 — изэнтропа  $S/R = 16$  [20] для опыта HeN6; 3 — изэнтропа  $S/R = 14.9$  для опыта HeN8 (настоящая работа). Для опыта HeN7 на графике указаны параметры кулоновской неидеальности  $\Gamma_D$  и вырождения электронов  $n\lambda^3$  из работы [22]

Результат настоящей работы в координатах давление–плотность приведен на рис. 19 вместе с данными [19–22]. На этом же рисунке нанесены изэнтропы, рассчитанные по УРС гелия ВНИИЭФ. Для наглядности на рис. 19 оставлены только две ударные адиабаты (1, 2) и две изэнтропы (3, 4), рассчитанные соответственно для опытов HeN6 и HeN8. Как видно на рисунке, изэнтропа 3 при значении  $S/R = 16$  удовлетворительно описывает все имеющиеся данные по сжимаемости гелия в области давлений до 4800 ГПа, полученные в цилиндрических [48] и сферических устройствах первого типа [19–22], несмотря на разницу в значениях начальной плотности газа в диапазоне  $\rho_0 = 0.019$ – $0.038$  г/см<sup>3</sup>.

Более наглядно взаимное положение экспериментальных данных и рассчитанных изэнтроп показано на рис. 20. Как уже было сказано выше, изэнтропа 2 при  $S/R = 16$ , описывающая данные цилиндрических опытов [48] и опыта HeN6 [20] при начальных плотностях газа в области  $\rho_0 = 0.019$ – $0.038$  г/см<sup>3</sup>, не описывает данные экспериментов в устройствах второго типа для плазмы гелия, сжатой примерно в 600 [22] и 900 раз в настоящей работе. Возможная причина этого может быть связана с металлизацией гелия при плотности  $\rho =$



**Рис. 21.** Фазовая диаграмма гелия [34]. Эксперимент: ★ — настоящая работа; ● — [19–22]; ▼ — [19]; \* — [48]; □ — [49]; ◇ — настоящая работа. Расчет: 1 — линия металлизации гелия при плотности  $\rho = 5.3 \text{ г/см}^3$  [28] в области температур 10–100 кК; 2 — плазменный фазовый переход ПФП1 ( $\text{He}^0 \rightarrow \text{He}^+$ ); 3 — ПФП2 ( $\text{He}^+ \rightarrow \text{He}^{++}$ );  $C_1, C_2$  — критические точки;  $\text{Tr}2\text{--Tr}5$  — тройные точки; линии ионизации:  $a - 0.01, b - 0.05, c - 0.1, d - 0.5, e - 1.0, f - 1.1, h - 1.9, j - 1.99$

$= 5.3 \text{ г/см}^3$ , теоретически предсказанной в работе [28]. Рассчитанная в работе [28] зависимость давления металлизации от температуры плазмы при плотности гелия  $\rho = 5.3 \text{ г/см}^3$ , экстраполированная в область температур порядка 100 кК, показана на фазовой диаграмме гелия рис. 21 (кривая 1), заимствованной авторами из работы [34]. Как следует из приведенного графика, состояние гелия, достигнутое в эксперименте HeN6 из работы [20], находится с учетом данных [28] в области металлической плазмы. Из приведенного рисунка следует, что остальные данные сферических экспериментов из [19–22] находятся в области полностью однократно ионизованной плазмы, правее критической точки  $C_1$ , а данные цилиндрических опытов с гелием из [48] — ниже линии первого плазменного фазового перехода ПФП1  $\text{He}^0 \rightarrow \text{He}^+$  (кривая 2). Авторы намерены разработать новые экспериментальные устройства для исследования характера плазменного фазового перехода ПФП1, а также исследовать сжимаемость плазмы гелия в области давлений порядка 10 ТПа, т. е. выше теоретически предсказанной линии второго плазменного перехода  $\text{He}^+ \rightarrow \text{He}^{++}$  ПФП 2 (кривая 3).

Анализ результатов проведенных исследований показал, что разработанная авторами методология изготовления сферических устройств и технология

проведения опытов позволили успешно получить новые экспериментальные данные по квазиизэнтропическому сжатию неидеальной плазмы гелия до уникально высокого значения  $\sigma \approx 900$ . Как следует из рис. 20, полученные в опытах HeN7 и HeN8 данные лежат на изэнтропе  $S/R = 14.9$ , в то время как данные опытов HeN5 и HeN6 описываются изэнтропой  $S/R = 16$ . Таким образом, расширена область исследованных состояний квазиизэнтропически сжатого гелия.

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Хрусталеву за возможность использовать в расчетах разработанное им УРС гелия, за полезные обсуждения и замечания по существу выполненной работы, а также сотрудникам, принимавшим участие в организации, проведении экспериментов и обработке полученных данных: А. И. Лебедеву, Р. В. Борисову, О. А. Есину, А. В. Романову, Д. П. Турутину, А. С. Пупкову, С. В. Ерунову.

Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физики сильносжатого вещества» и РФФИ (грант № 16-02-00275).

## ЛИТЕРАТУРА

1. V. E. Fortov, R. I. Il'kaev, 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).
2. В. Е. Фортвов, *Физика высоких плотностей энергии*, Физматлит, Москва (2013).
3. V. E. Fortov, *Extreme States of Matter on Earth and in the Cosmos*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2011).
4. V. E. Fortov and I. T. Iakubov, *The Physics of Non-Ideal Plasma*, World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong (2000).
5. В. Е. Фортвов, *Уравнения состояния вещества: от идеального газа до кварк-глюонной плазмы*, Физматлит, Москва (2012).
6. В. Е. Фортвов, В. Я. Терновой, М. В. Жерноклетов, М. А. Мочалов, А. Л. Михайлов, А. С. Филимонов, А. А. Пяллинг, В. Б. Минцев, В. К. Грязнов, И. Л. Иосилевский, *ЖЭТФ* **124**, 288 (2003).
7. С. К. Гришечкин, С. К. Груздев, В. К. Грязнов, М. В. Жерноклетов, Р. И. Илькаев, И. Л. Иосилев-

- ский, Г. Н. Кашинцева, С. И. Киршанов, С. Ф. Маначкин, В. Б. Минцев, А. Л. Михайлов, А. Б. Межевов, М. А. Мочалов, В. Е. Фортов, В. В. Хрусталева, А. Н. Шуйкин, А. А. Юхимчук, Письма в ЖЭТФ **80**, 452 (2004).
8. W. J. Nellis, N. C. Holmes, A. C. Mitchell, R. J. Trainor, G. K. Governo, M. Ross, and D. A. Young, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1248 (1984).
  9. J. Eggert, S. Brygoo, P. Loubeyre, R. S. McWilliams, P. M. Celliers, D. G. Hicks, T. R. Boehly, R. Jeanloz, and G. W. Collins, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 124503 (2008); J. Eggert, P. Loubeyre, S. Brygoo et al., Joint 20<sup>th</sup> AIRAPT-43th EHPRG Conference on Science and Technology of High Pressure, June 27-July 1, Karlsruhe/Germany (2005), p. 133.
  10. D. G. Hicks, T. R. Boehly, P. M. Celliers, J. N. Eggert, S. J. Moon, D. D. Meyerhofer, and G. W. Collins, *Phys. Rev. B* **79**, 014112 (2009).
  11. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова, А. П. Толочко, В. Д. Урлин, Письма в ЖЭТФ **16**, 286 (1972).
  12. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова, А. П. Толочко, В. Д. Урлин, ЖЭТФ **75**, 1683 (1978).
  13. S. T. Weir, A. C. Mitchell, and W. J. Nellis, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1860 (1996); W. J. Nellis, S. T. Weir, and A. C. Mitchell, *Phys. Rev. B* **59**, 3434 (1999).
  14. W. J. Nellis, *Rep. Progr. Phys.* **69**, 1195 (2006).
  15. L. B. Da Silva, P. Celliers, G. W. Collins, K. S. Budil, N. C. Holmes, T. W. Barbee Jr., B. A. Hammel, J. D. Kilkenny, R. J. Wallace, M. Ross, R. Cauble, A. Ng, and G. Chiu, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 483 (1997).
  16. G. W. Collins, L. B. Da Silva, R. Celliers, D. M. Gold, M. E. Foord, R. J. Wallace, A. Ng, S. V. Weber, K. S. Budil, and R. Cauble, *Science* **281**, 1178 (1998).
  17. M. D. Knudson and D. L. Hanson, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 035505 (2003).
  18. M. D. Knudson, D. L. Hanson, J. E. Bailey, C. A. Hall, J. R. Asay, and A. Deeney, *Phys. Rev. B* **69**, 144209 (2004).
  19. 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).
  20. 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).
  21. 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).
  22. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, В. А. Комраков, А. В. Рыжков, В. А. Огородников, А. А. Юхимчук, Письма в ЖЭТФ **101**, 575 (2015).
  23. D. Saumon, G. Chabrier, and H. M. Van Horn, *Astrophys. J.* **99**, 713 (1995).
  24. M. Ross, F. Rogers, N. Winter et al., *Phys. Rev. B* **76**, 020502 (2007).
  25. B. Militzer, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 175501 (2006).
  26. W. Ebeling, *Contrib. Plasma Phys.* **30**, 553 (1990).
  27. H. Hess, *High Press. Res.* **1**, 203 (1989).
  28. В. Т. Швеиц, ЖЭТФ **143**, 182 (2013).
  29. C. A. Seldam, *Proc. Phys. Soc. A* **70**, 97 (1957).
  30. В. П. Трубицын, Ф. Р. Улинич, ДАН СССР **142**, 578 (1962).
  31. D. A. Young, A. K. McMahan, and M. Ross, *Phys. Rev. B* **24**, 5119 (1981).
  32. J. Meyer-ter-Vehn and W. Zittel, *Phys. Rev. B* **37**, 8674 (1988).
  33. A. Förster, T. Kahlbaum, and W. Ebeling, *High Press. Res.* **7**, 375 (1991).
  34. A. Förster, T. Kahlbaum, and W. Ebeling, *Laser and Particle Beams* **10**, 253 (1992).
  35. М. А. Мочалов, С. К. Гришечкин, С. К. Груздев, Г. Н. Кашинцева, *Устройство для измерения параметров ударно-сжатых легких газов высокой начальной плотности*, Патент (RU) 129249 U1, бюлл. № 17, 20.06.2013.
  36. В. В. Сычев, А. А. Вассерман, Г. А. Спиридонов, В. А. Цымарный, *Термодинамические свойства гелия*. ГСССД, Изд-во стандартов, Москва (1984).

37. Л. Ф. Гударенко, Д. Г. Гордеев, В. Г. Куделькин, ВАНТ, серия: теоретическая и прикладная физика, Вып. 1/2, 51 (2005).
38. Б. Л. Глушак, Л. Ф. Гударенко, Ю. М. Стяжкин, ВАНТ, Сер.: Матем. моделирование физических процессов, Вып. 2, 57 (1991).
39. SESAME: The Los Alamos National Laboratory Equation of State. Database Stanford P. Lyon, James D. Johnson, Group T-1, LA-UR-92-3407 (1995).
40. Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov, D. I. Zenkov, and B. F. Tkachenko, in: *11<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conference/Digest of Technical Papers*, ed. by G. Cooperstein and I. Vitkovitsky (1997), p. 1669.
41. В. А. Аринин, Б. И. Ткаченко, Л. А. Фадеев, В. Д. Орлов, В. В. Бурцев, Ю. М. Макаров, в сб.: *XI Харитоновские тематические научные чтения*, под ред. доктора технических наук А. Л. Михайлова, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, с. 714 (2009); В. А. Аринин, Цифровая обработка сигналов **8**(2), 52 (2006); V. A. Arinin and B. I. Tkachenko, *Pattern Recognition and Image Analysis* **19**, 63 (2010).
42. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин, В. Н. Софронов, ВАНТ. Сер.: Методики и программы числ. решения задач матем. физ., Вып. 3, 11 (1982).
43. В. П. Копышев, ПМТФ **12**, 103 (1971).
44. В. П. Копышев, В. В. Хрусталева, ПМТФ **21**, 122 (1980).
45. W. G. Hoover, S. G. Gray, and K. W. Johnson, *J. Chem. Phys.* **55**, 1128 (1971).
46. И. Р. Трунин, С. В. Корицкая, В. Арнолд, Препринт 75-2000, Саров (2000).
47. О. Т. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez, T. L. Whitworth, and W. W. Kuhlow, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 083108 (2006).
48. 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. Хрусталева, В. Е. Фортов, Письма в ЖЭТФ **96**, 479 (2012).
49. V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, A. A. Pyalling, V. B. Mintsev, and V. E. Fortov, *Shock Compression of Condensed Matter-2001*, ed. by M. D. Furnish, N. N. Thadhani, and Y. Horie, AIP Press, New York (2002).