

УДК 532.593

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ ДО ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ ≈ 3000 ГПа

М. В. Жерноклетов^{1,3}, В. А. Раевский¹, С. Ф. Маначкин¹, Н. Б. Давыдов¹,
К. Н. Панов¹, А. В. Рыжков¹, В. А. Аринин¹, Б. И. Ткаченко¹,
А. И. Логвинов^{1,3}, В. А. Комраков¹, А. И. Давыдов², Н. Н. Анашкин²

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт физики взрыва, 607188 Саров
postmaster@ifv.vniief.ru

²РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт теоретической и математической физики
607188 Саров

³Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ», 607186 Саров

Проведены эксперименты по исследованию процесса сферического сжатия дейтерия и гелия до давлений ≈ 3000 ГПа в квазиизоэнтропическом режиме. Процесс регистрировался многокадровым рентгенографическим комплексом, который позволяет в одном эксперименте получить до девяти рентгеновских снимков полости с газом в различные моменты времени. Рентгеновские снимки свидетельствуют о том, что взрывные устройства обеспечивают близкую к сферически-симметричной форму полости с газом вплоть до максимального сжатия газа. Имеется хорошее совпадение экспериментальных данных с результатами расчетов, выполненных с использованием разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ уравнений состояния исследованных газов. По результатам этих расчетов определены параметры, характеризующие область достигнутых в экспериментах состояний сжатых газов: дейтерий — плотность 5.5 г/см^3 , давление 3.6 ТПа; гелий — плотность 4.7 г/см^3 , давление 2.4 ТПа.

Ключевые слова: дейтерий, гелий, квазиизоэнтропическое сжатие, уравнение состояния.

DOI 10.15372/FGV20180502

ВВЕДЕНИЕ

Исследование поведения таких газов, как дейтерий и гелий, в экстремальных состояниях при давлении в десятки и сотни мегабар и при плотности $\approx 10 \text{ г/см}^3$ представляет большой научный интерес. Результаты этих исследований используются для построения широкодиапазонных уравнений состояния данных газов. Такие уравнения необходимы, например, при решении проблемы осуществления инерциального термоядерного синтеза. Кроме того, наша Вселенная состоит в основном из водорода и гелия и их уравнения состояния важны для космологии при разработке теорий образо-

вания и эволюции звезд и гигантских газовых планет.

Для изучения свойств различных материалов (в том числе и газов) при высоких давлениях и температурах широко используются методы нагружения исследуемых веществ ударными волнами и методы изоэнтропического и квазиизоэнтропического сжатия. Эти методы дополняют друг друга и дают возможность осуществлять проверку различных моделей уравнений состояния в широких диапазонах давления, плотности и температуры. Ударно-волновые методы нагружения позволяют достичь высоких давлений и температур, но имеют ограничения по максимально достижимым плотностям. Значительно больших плотностей можно достичь методами изоэнтропического и квазиизоэнтропического сжатия. Для получения высоких плотностей и давлений в исследуемых материалах применяют нагружающие устройства, использующие взрывча-

Работа выполнена при финансовой поддержке госкорпорации «Росатом» (государственный контракт № Н.4х.44.9Б.16.1037).

© Жерноклетов М. В., Раевский В. А., Маначкин С. Ф., Давыдов Н. Б., Панов К. Н., Рыжков А. В., Аринин В. А., Ткаченко Б. И., Логвинов А. И., Комраков В. А., Давыдов А. И., Анашкин Н. Н., 2018.

тые вещества. Наиболее эффективны сферические взрывные устройства, в которых передача энергии от взрывчатого вещества к исследуемому материалу осуществляется с помощью сферической кумуляции энергии.

В последние годы в РФЯЦ-ВНИИЭФ после ввода в эксплуатацию нового диагностического инструмента — многокадровой импульсной рентгеновской установки активно проводятся исследования квазиизоэнтропического сжатия газов с применением сферических взрывных нагружающих устройств [1–4]. Установка позволяет в одном взрывном эксперименте получить до девяти рентгеновских снимков полости с исследуемым газом в различные моменты сжатия.

По рентгеновским снимкам для каждого момента времени определяется средний радиус полости с газом. Сравнение экспериментальных данных с аналогичными расчетными зависимостями, полученными при численном моделировании работы экспериментальных взрывных устройств, дает возможность определить, насколько хорошо использованное в расчетах уравнение состояния исследуемого газа описывает экспериментальную зависимость радиуса сжимаемой полости с газом от времени, и сделать вывод о том, нуждается ли использованное уравнение состояния в какой-либо корректировке.

В данной работе представлены результаты двух экспериментов — по сжатию дейтерия и по сжатию гелия при одинаковых начальных давлениях, выполненных в одинаковых по конструкции взрывных экспериментальных устройствах. Использовались модернизированные, по сравнению с применявшимися в [1–4], взрывные экспериментальные устройства, изменения в конструкции которых были направлены на улучшение симметрии полости с газом.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования сжатия газов использовалось многослойное взрывное сферическое нагружающее устройство. Разрез устройства по радиусу и кумулирующая система для сжатия газа приведены на рис. 1. Заряд взрывчатого вещества выполнен в виде сферического слоя, в котором генерируется сходящаяся сферически-симметричная детонационная волна. Кумулирующая система, обеспечивающая передачу энергии от взрывчатого вещества к

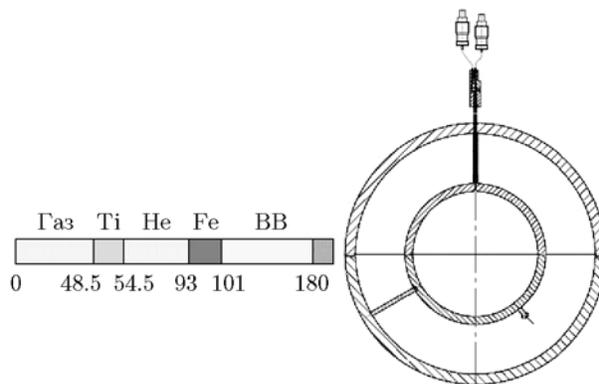


Рис. 1. Сечение взрывного устройства и схема конструкции кумулирующей системы

исследуемому газу, состоит из двух оболочек, разделенных промежутком, заполненным гелием при давлении ≈ 250 атм. Внешняя оболочка, примыкающая к заряду взрывчатого вещества, выполнена из стали, внутренняя, непосредственно обжимающая исследуемый газ — из титана. Наличие слоя гелия между оболочками кумулирующей системы обеспечивает плавный разгон титановой оболочки и способствует снижению амплитуды возмущений, искажающих сферическую симметрию сжатия исследуемого газа. Исследуемый газ закачивается в центральную полость взрывного нагружающего устройства. В проведенных экспериментах начальное давление исследуемых газов в полости составляло 120 атм.

Схема проведения эксперимента дана на рис. 2.

Многокадровая рентгенографическая установка включает в себя три источника рентгеновского излучения, расположенные в защитном сооружении. Оси пучков излучения этих источников пересекаются в одной точке вне защитного сооружения. Углы между осями пучков составляют 45° .

Взрывное сферическое устройство устанавливается таким образом, чтобы его центр находился в точке пересечения осей пучков рентгеновского излучения. Каждый из источников излучения в ходе эксперимента может генерировать до трех импульсов с минимальными интервалами между ними ≈ 0.5 мкс. Изображение сжимаемой газовой полости формируется и регистрируется системой электронно-оптических регистраторов, которые активируются синхронно с моментами генерации рентгеновских импульсов. Регистраторы также располагают-

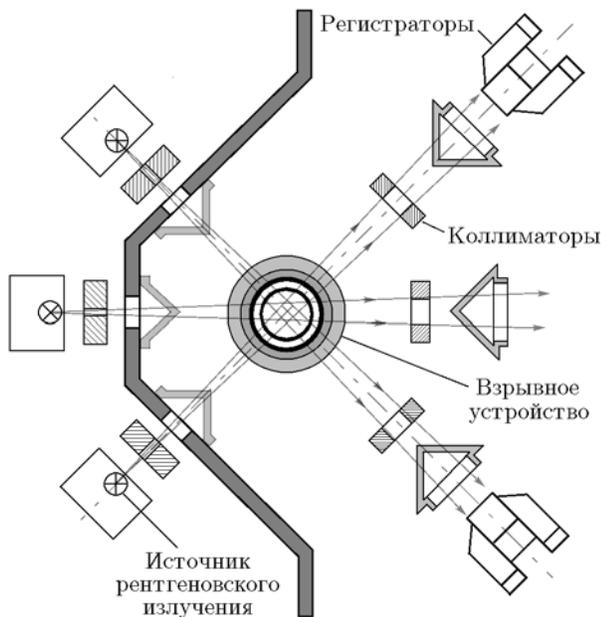


Рис. 2. Схема проведения взрывных экспериментов с использованием многокадровой рентгеновской установки

ся за соответствующей защитой. Более подробно работа многокадровой рентгеновской установки описана, например, в [2].

Далее в результате цифровой обработки полученных изображений [5] определяются средние радиусы полости с газом в различные моменты времени и сравниваются с соответствующими расчетными зависимостями радиуса полости с газом от времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведено два эксперимента по регистрации процесса сжатия дейтерия и гелия в одинаковых взрывных сферических нагружающих устройствах. Исследуемые газы закачивались в центральную полость объемом ≈ 0.5 л нагружающих устройств. Начальная плотность газов составляла 0.02 г/см^3 . Температура воздуха при проведении экспериментов поддерживалась около $-10 \text{ }^\circ\text{C}$.

В таблице даны экспериментальные результаты, полученные в процессе цифровой обработки рентгеновских снимков: время рентгенографирования (t), отсчитанное от реперного сигнала, средние радиусы полости с газом (R) в каждый момент времени и их среднеквадратичные отклонения (σ) от среднего радиуса полости для данного снимка, определенные в

Экспериментальные данные по зависимости радиуса полости с газом от времени

Исследуемый газ	t , мкс	R , мм	σ , мм
Дейтерий	43.09	36.97	0.4
	44.33	25.28	0.4
	44.8	22.37	0.4
	45.53	13.39	0.33
	45.98	8.21	0.29
	46.5	8.2	0.56
	46.98	11.04	1.04
	48.09	13.01	2.04
Гелий	43.4	36.13	0.27
	44.12	30.53	0.19
	44.82	24.24	0.22
	45.37	19.21	0.36
	45.72	14.85	0.3
	46.24	9.32	0.42
	46.73	7.28	0.61
	47.23	8.13	2.0
48.13	11.53	0.87	

нескольких сечениях по рентгеновскому снимку.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные в сравнении с результатами численных расчетов по разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ одномерной программе расчета течений сжимаемых сред [6]. Счет велся по лагранжевой методике. Для дейтерия и гелия использовались табличные уравнения состояния [7]. Погрешность по времени составляла ± 0.1 мкс (2σ), в качестве погрешности радиусов приняты удвоенные значения σ из таблицы. На рисунках приведены также полученные в экспериментах рентгеновские снимки полостей с газом в моменты, близкие к максимальному сжатию газа. Видно, что в эти моменты форма сжатого газа (темная область в центре снимков) близка к сферической. На стадии расширения асимметрия газа резко возрастает, что приводит к увеличению погрешности определения среднего радиуса полости с газом.

Из рис. 3 видно, что вплоть до достижения максимального сжатия полости с исследуемым газом расчетные и экспериментальные данные

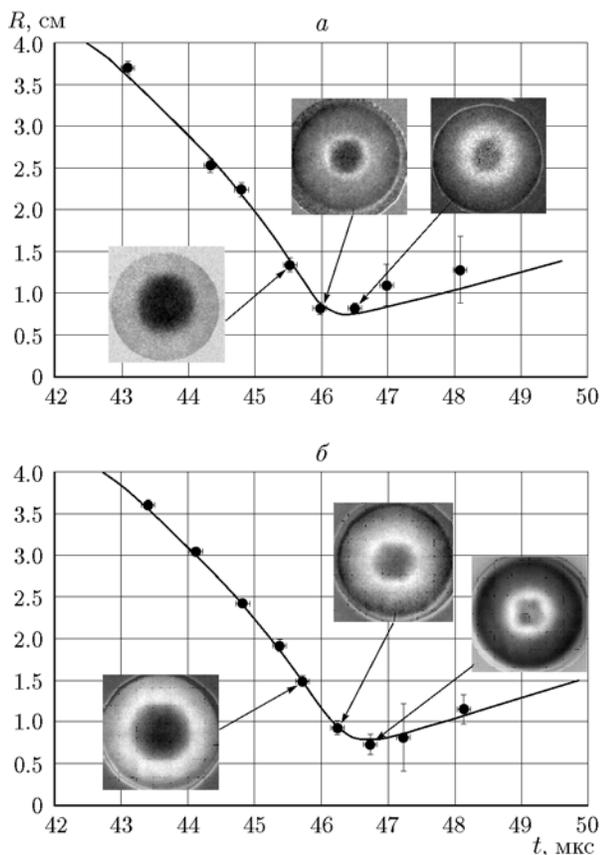


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для опыта по сжатию дейтерия (а) и опыта по сжатию гелия (б):

линии — расчет, точки — эксперимент

находятся в удовлетворительном согласии.

Использованная экспериментальная методика не позволяет получать прямые данные об уравнениях состояния исследуемых газов. То есть в таких экспериментах не измеряются одновременно три величины, характеризующие уравнение состояния газа, например плотность, давление и внутренняя энергия. Регистрируются фазы процесса сжатия газа, которые зависят от свойств газа в условиях, реализующихся в опыте. В случае совпадения расчетных и экспериментальных результатов можно сделать вывод, что используемое в расчетах уравнение состояния газа адекватно описывает его свойства в данных условиях. В случае несовпадения необходима корректировка использованного в расчетах уравнения состояния.

Процесс сжатия газа в сферическом взрывном нагружающем устройстве зависит от мно-

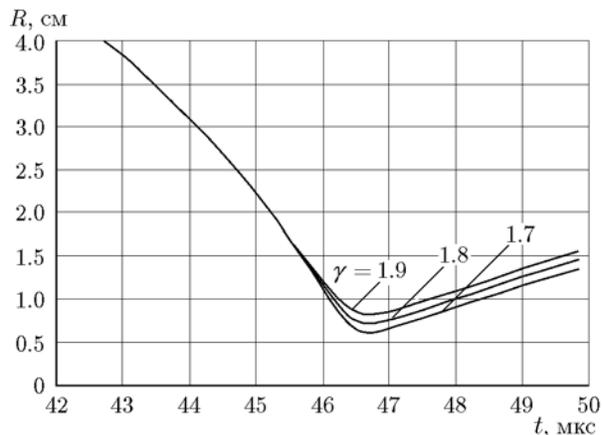


Рис. 4. Результаты расчетов с использованием уравнения состояния в форме идеального газа

гих факторов, таких, например, как мощность взрывчатого вещества, динамические свойства материалов оболочек и т. д., однако, как показывают расчеты, основным фактором, определяющим минимальную величину радиуса полости с газом, являются именно свойства исследуемого газа.

Для иллюстрации этого положения на рис. 4 приведены зависимости радиуса полости с газом в процессе сжатия, полученные в трех расчетах, в которых для газа применялось уравнение состояния идеального газа, позволяющее легко изменять «жесткость» уравнения состояния путем варьирования только одного параметра — показателя политропы γ . Использовались значения $\gamma = 1.7, 1.8$ и 1.9 . Из рисунка видно, что расчетная траектория границы полости с газом чувствительна к сравнительно небольшим изменениям в уравнении состояния газа. Изменение параметра γ на ± 0.1 приводит к изменению минимального радиуса полости на ± 1.1 мм при экспериментальной погрешности определения радиуса ± 0.8 мм (2σ). При варьировании же в расчетах уравнения состояния материала обжимающей газ оболочки (в разумных пределах) не удалось заметным образом изменить траекторию границы полости.

ВЫВОДЫ

Сравнение результатов проведенных экспериментов с результатами расчетов, в которых использовались разработанные в РФЯЦ-ВНИИЭФ табличные уравнения состояния дей-

терия и гелия, свидетельствует об их удовлетворительном согласии. Результаты экспериментов показывают, что нет необходимости в корректировке уравнений состояния исследованных газов в области состояний, реализованных в процессе сжатия газов.

Для характеристики области состояний газов, достигнутых в экспериментах, можно использовать величины, полученные в расчетах, описывающих экспериментальные данные: максимальную среднюю плотность газа (ρ_{\max}) и максимальное расчетное давление на поверхности полости с газом (p_{\max}). В проведенных экспериментах достигнуты следующие экстремальные состояния:

дейтерий — $\rho_{\max} = 5.5 \pm 1.6 \text{ г/см}^3$,

$p_{\max} = 3.6 \pm 0.5 \text{ ТПа}$;

гелий — $\rho_{\max} = 4.7 \pm 1.4 \text{ г/см}^3$,

$p_{\max} = 2.4 \pm 0.4 \text{ ТПа}$.

Указанные погрешности приведены для доверительной вероятности 2σ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Фортон В. Е. и др. Измерение сжимаемости дейтериевой плазмы при давлении 1 800 ГПа // Письма в ЖЭТФ. — 2010. — Т. 92. — С. 336–341.
2. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Фортон В. Е. и др. Измерение квазиизоэнтропической сжимаемости гелия при давлении $\approx 5\,000$ ГПа // Письма в ЖЭТФ. — 2012. — Т. 96. — С. 172–177.
3. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Фортон В. Е. и др. Измерение квазиизоэнтропической сжимаемости гелия и дейтерия при давлениях 1 500–2 000 ГПа // ЖЭТФ. — 2012. — Т. 142. — С. 696–709.
4. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Фортон В. Е. и др. Исследование квазиизоэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия при давлениях 1 500–5 000 ГПа // ЖЭТФ. — 2014. — Т. 146. — С. 169–185.
5. Аринин В. А. Функциональный метод трассировки границ раздела двух сред в осесимметричных объектах по их рентгеновским изображениям // X Забабахинские научные чтения: сб. ОНТИ РФЯЦ ВНИИТФ. — Снежинск, 2009.
6. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа УПОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. — 1982. — № 3. — С. 11–16.
7. Копышев В. П., Хрусталева В. В. Уравнение состояния водорода до 10 Мбар // ПМТФ. — 1980. — Т. 21. — С. 122–128.

Поступила в редакцию 21/XII 2017 г.