

УДК 539.6+533.6

Результаты экспериментов по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия и гелия до экстремальных давлений ~3000 ГПа

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

Проведены эксперименты по исследованию процесса сферического сжатия дейтерия и гелия до давлений ≈ 3000 ГПа в квазиизэнтропическом 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 $5,5 \text{ г/см}^3$, $3,6 \text{ ТПа}$; гелий – плотность $4,7 \text{ г/см}^3$, давление $2,4 \text{ ТПа}$.

Введение

Исследования поведения таких газов, как дейтерий и гелий, в экстремальных состояниях при давлениях в десятки и сотни мегабар и плотностях $\sim 10 \text{ г/см}^3$ представляют большой научный интерес. Результаты этих исследований необходимы для построения широкодиапазонных уравнений состояния данных газов. Эти уравнения состояния используются, например, при решении проблемы осуществления инерциального термоядерного синтеза. Кроме того, так как наша вселенная состоит, в основном, из водорода и гелия, уравнения состояния этих газов необходимы в космологии при разработке теорий образования и эволюции звезд и гигантских газовых планет.

Для исследований поведения различных материалов (в т. ч. и газов) широко используются методы нагружения исследуемых веществ ударными волнами и методы изэнтропического и квазиизэнтропического сжатия. Эти методы дополняют друг друга и позволяют осуществлять проверку различных моделей уравнений состояния в широком диапазоне давлений, плотностей и температур. Ударно-волновые методы нагружения позволяют достичь высоких давлений и температур, но имеют ограничения по максимально достижимым плотностям. Достижение значительно больших плотностей позволяют методы изэнтропического и квазиизэнтропического сжатия. Для получения высоких плотностей и давлений в исследуемых материалах применяются нагружающие устройства, использующие взрывчатые вещества. Наиболее эффективно применение сферических взрывных устройств, в которых передача энергии от взрывчатого вещества к исследуемому материалу осуществляется с помощью сферической кумуляции энергии.

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

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

В данной статье представлены результаты недавно проведенных экспериментов, в которых в одинаковых по конструкции взрывных экспериментальных устройствах исследовались сжатия дейтерия и гелия при одинаковых начальных давлениях исследуемых газов. Использовались модернизированные взрывные экспериментальные устройства, изменения в конструкции которых были направлены на улучшение симметрии полости с газом.

Схемы экспериментов

Схема взрывного сферического нагружающего устройства для исследований сжатия газов представлена 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 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 гелия между оболочками кумулирующей системы обеспечивает плавный разгон титановой оболочки и способствует снижению амплитуды возможных отклонений от сферической симметрии при сжатии исследуемого газа. Исследуемый газ закачивается в центральную полость взрывного нагружающего устройства. В проведенных экспериментах начальное давление исследуемых газов в полости составляло 120 атм.

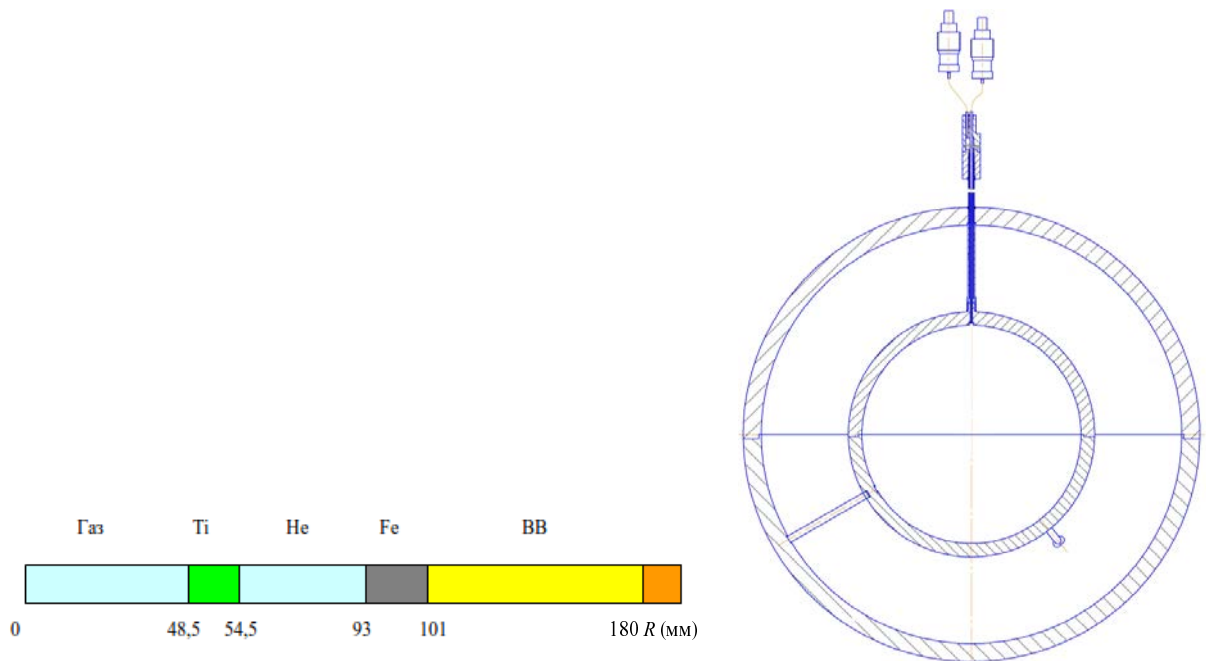


Рис. 1. Схема взрывного устройства для исследований сжатия газов и схема конструкции кумулирующей системы

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 2.

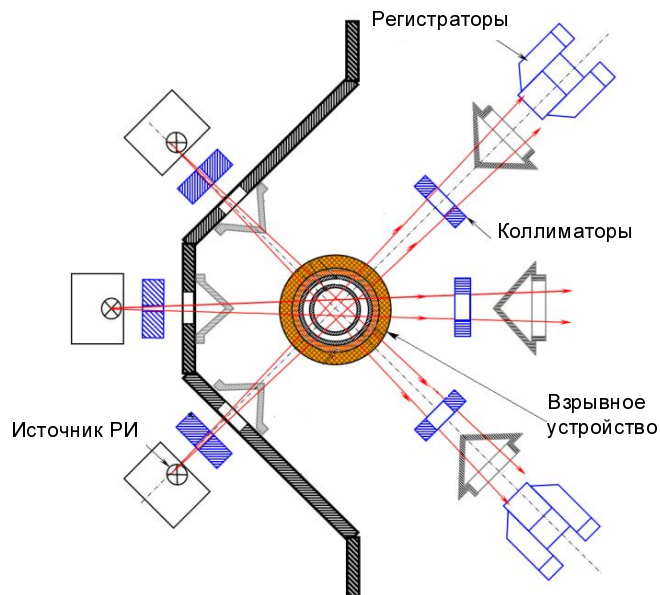


Рис. 2. Схема проведения взрывных экспериментов с использованием многокадровой рентгеновской установки

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

Взрывное сферическое экспериментальное устройство располагается таким образом, чтобы его центр находился в точке пересечения осей пучков рентгеновского излучения. Каждый из источников рентгеновского излучения в процессе проведения эксперимента может генерировать до трех импульсов с минимальными интервалами между импульсами $\sim 0,5$ мкс. Изображение сжимаемой газовой полости формируется и регистрируется с помощью системы электронно-оптических регистраторов, которые активируются синхронно с моментами генерации рентгеновских импульсов. Регистраторы также располагаются за соответствующей защитой. Более подробное описание работы многокадровой рентгеновской установки содержится, например, в [2].

Проводится цифровая обработка полученных изображений [5], в результате которой определяются величины средних радиусов полости с газом в различные моменты времени, которые 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 нагружающих устройств объемом $\sim 0,5$ л. Начальная плотность газов составляла $0,02$ г/см³. Температура воздуха при проведении экспериментов ~ -10 °С.

В таблице даны экспериментальные результаты, полученные в процессе цифровой обработки рентгеноснимков. Приведены экспериментальные времена рентгенографирования (T), отсчитанные от реперного сигнала, значения средних радиусов полости с газом (R) в каждый момент времени и величины среднеквадратичных отклонений радиусов, определенных для нескольких сечений по рентгеноснимку, от величины среднего радиуса полости для данного рентгеноснимка.

Экспериментальные данные зависимости от времени радиусов полости с газом

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

Исследуемый газ	T , мкс	R , мм	σ , мм
Гелий	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
	48,13	11,53	0,87

На рис. 3, 4 дано сравнение экспериментальных данных с результатами численных расчетов. Расчеты проведены по разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ одномерной программе расчета газодинамических течений сжимаемых сред [6]. Счет велся по лагранжевой методике. В расчетах для дейтерия и гелия использовались табличные уравнения состояния [7].

На рис. 3, 4 расчетные зависимости радиусов полостей с газом показаны линиями, экспериментальные результаты – точками с планками погрешностей. Погрешности по времени составляют $\pm 0,1$ мкс (2σ), за погрешности радиусов приняты удвоенные значения σ из таблицы. Кроме того, на рисунках приведены полученные в экспериментах рентгено снимки полостей с газом в моменты, близкие к максимальному сжатию газа. Видно, что в эти моменты форма сжатого газа (темная область в центре рентгено снимков) близка к сферической. На стадии расширения асимметрия газа резко возрастает, что приводит к увеличению погрешности определения среднего радиуса полости с газом.

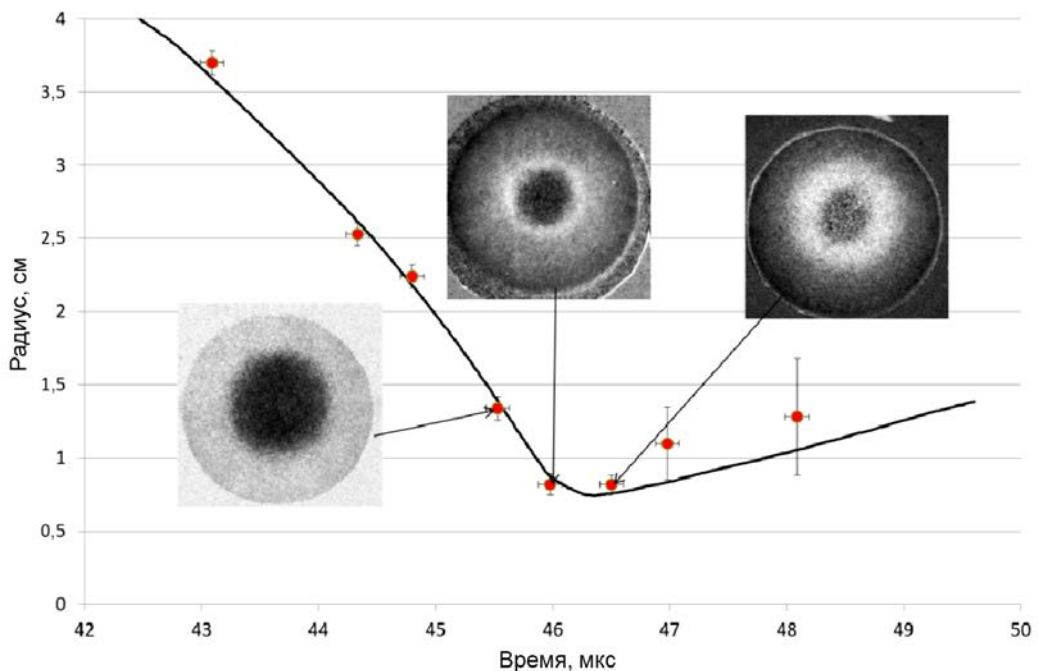


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для опыта по сжатию дейтерия

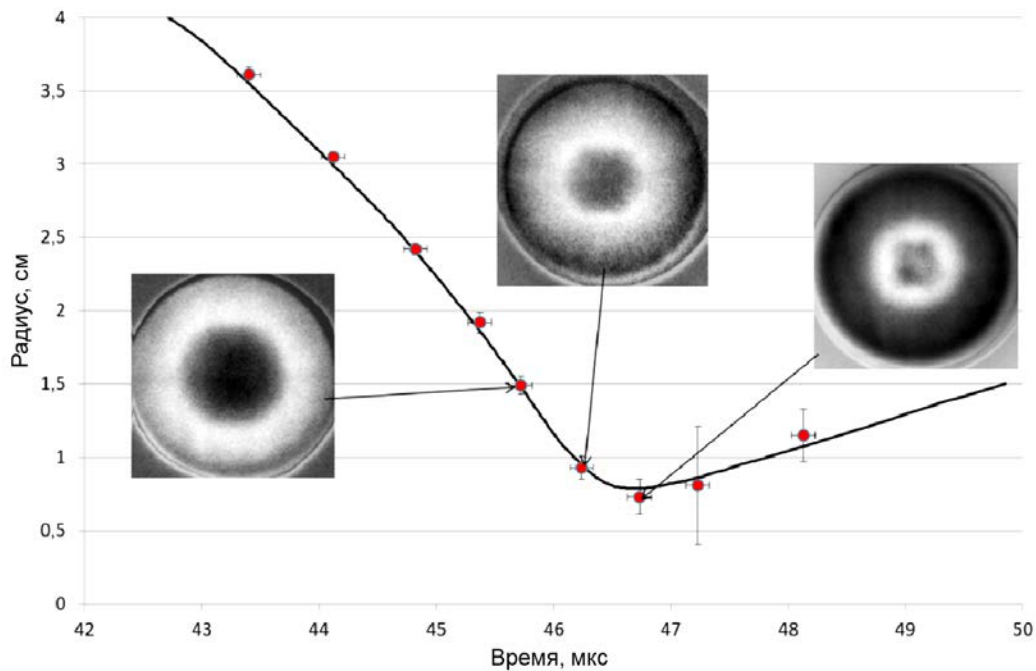


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для опыта по сжатию гелия

Из рис. 3, 4 видно, что вплоть до моментов достижения максимального сжатия полости с исследуемым газом имеется удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных.

Используемая экспериментальная методика не позволяет получать прямые данные об уравнениях состояния исследуемых газов, т. е. в данных экспериментах не измеряются одновременно три величины, характеризующие уравнение состояния газа, например, плотность, давление и внутренняя энергия. В экспериментах 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 о том, что используемое в расчетах уравнение состояния газа адекватно описывает его свойства в данных условиях. В случае несовпадения делается вывод о необходимости корректировки использованного в расчетах уравнения состояния.

Процесс сжатия газа в сферическом взрывном нагружающем устройстве зависит от многих факторов, однако, как показывают расчеты, основным фактором, определяющим величину минимального радиуса полости с газом, является именно уравнение состояния исследуемого газа.

На рис. 5 приведены зависимости радиусов полостей с газом в процессе сжатия, полученные в трех расчетах, в которых для газа использовались уравнения состояния в форме идеального газа, позволяющие легко изменять «жесткость» уравнения состояния путем варьирования только одного параметра «гамма». Использовались значения $\gamma = 1,7; 1,8$ и $1,9$.

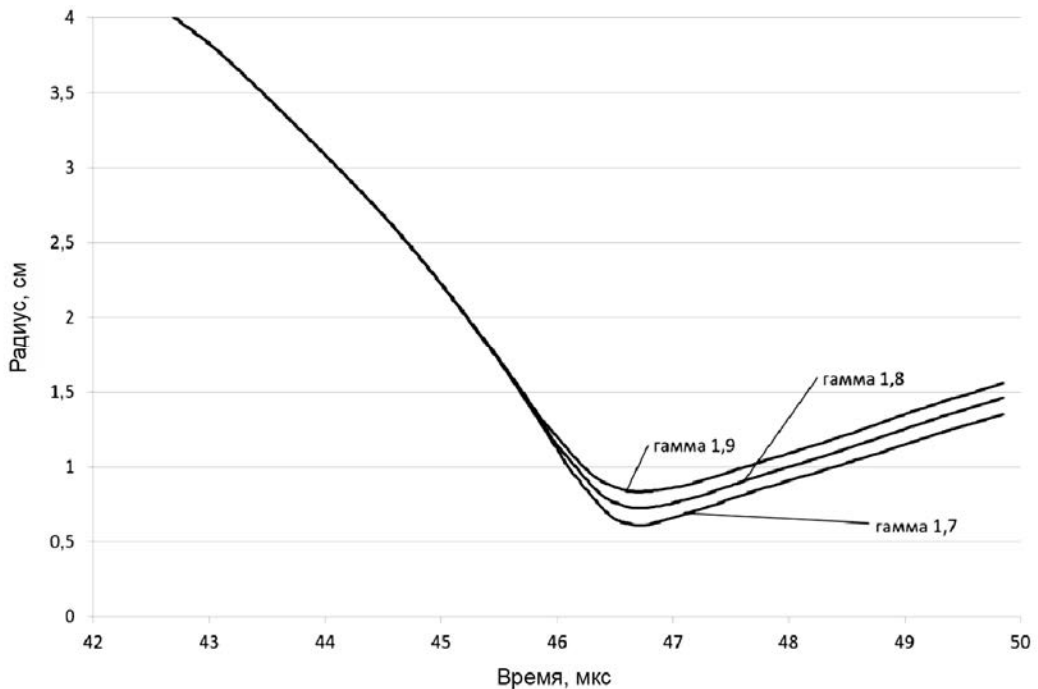


Рис. 5. Результаты расчетов с использованием уравнения состояния в форме идеального газа

Из рис. 5 видно, что расчетная траектория границы полости с газом чувствительна к сравнительно небольшим изменениям уравнения состояния газа. Изменение параметра «гамма» на $\pm 0,1$ приводит к изменению минимального радиуса полости на $\pm 1,1$ мм при экспериментальной погрешности определения радиуса в $\pm 0,8$ мм (2σ). При варьировании же в расчетах уравнения состояния материала обжимающей газ оболочки (в разумных пределах) не удалось заметным образом изменить траекторию границы полости.

Таким образом, сравнение результатов проведенных экспериментов с расчетами, в которых использовались разработанные в РФЯЦ-ВНИИЭФ табличные уравнения состояния дейтерия и гелия, свидетельствует об удовлетворительном совпадении расчетных и экспериментальных данных. Результаты экспериментов показывают, что нет необходимости в корректировке уравнений состояния исследованных газов в области состояний, реализовавшейся 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}). Для проведенных экспериментов достигнутые экстремальные состояния характеризуются следующими величинами: дейтерий — $\rho_{\max} = 5,5$ г/см³, $P_{\max} = 3,6$ ТПа; гелий — $\rho_{\max} = 4,7$ г/см³, $P_{\max} = 2,4$ ТПа.

Список литературы

1. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. Измерение сжимаемости дейтериевой плазмы при давлении 1800 ГПа // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. С. 336.
2. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия при давлении ~5000 ГПа // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. С. 172.
3. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия и дейтерия при давлениях 1500–2000 ГПа // ЖЭТФ. 2012. Т. 142. С. 696.
4. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. Исследование квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия при давлениях 1500–5000 ГПа // Там же. 2014. Т. 146. С. 169.
5. Аринин В. А. Функциональный метод трассировки границ раздела двух сред в осесимметричных объектах по их рентгеновским изображениям // Сб. мат. конф. «Х Забабахинские научные чтения». Снежинск, 2009.
6. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. Вып. 3. С. 11.
7. Копышев В. П., Хрусталеv В. В. Уравнение состояния водорода до 10 Мбар // ПМТФ. 1980. Т. 21. С. 122.

Results of Experiments on Quasi-Isentropic Compression of Deuterium and Helium to Extreme Pressures of 3000 GPa

M. V. Zhernokletov, V. A. Raevskii, S. F. Manachkin, N. B. Davydov, K. N. Panov,
A. V. Ryzhkov, V. A. Arinin, B. I. Tkachenko, A. I. Davydov, N. N. Anashkin, A. I. Logvinov,
V. A. Komrakov

Experiments were performed to study the spherical compression of deuterium and helium to pressures of ≈ 3000 GPa in a quasi-isentropic regime. The process was recorded by a multi-frame radiographic system which produces up to nine X-ray images of a cavity with gas at various times in one experiment. X-ray images show that explosive devices provide a cavity shape close to spherically symmetric with gas up to the maximum compression of the gas. The experimental data are in good agreement with the results of calculations performed using the RFNC-VNIIEF equations of state of the gases studied. The results of these calculations are used to determine the parameters of the region of compressed gas states reached in the experiments: for deuterium, density 5.5 g/cm^3 and pressure 3.6 TPa; for helium, density 4.7 g/cm^3 and, pressure 2.4 TPa.