

Список литературы

1. Кузьмицкий И.В., М.В. Жерноклетов, В.В. Комиссаров. Новый подход к построению уравнения состояния вещества с фазовым переходом на фронте ударной волны. Уравнение состояния фенилона//Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 4. УДК 539.89. С. 103-113//Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2012. Vol. 48, № 4. УДК 539.89. PP. 465-474.
2. Кузьмицкий И.В. Гетерогенная физическая точка. Равновесный, неравновесный и квазиравновесный режим фазового превращения. Основные уравнения эволюции// International Conference "Shock Wave in Condensed Matter". St.-Petersburg-Novgorod, Russia. 2010. С. 251-255//XIII Харитоновские тематические научные чтения. Сб. тезисов докладов. Саров, 2011. С.137-141.// Труды XIII Харитоновских тематических научных чтений. Саров, 2011. С. 278-285.
3. Кузьмицкий И.В. Система уравнений для ударной адиабаты в области фазового перехода и её решение// International Conference "Shock Wave in Condensed Matter". St.-Petersburg-Novgorod, Russia. 2010. С. 255-259//XIII Харитоновские тематические научные чтения. Сб. тезисов докладов. Саров, 2011. С.141-146// Труды XIII Харитоновских тематических научных чтений. Саров. 2011. С. 285-292.
4. Кузьмицкий И.В. Фазовое превращение в бериллии. Метод нескольких виртуальных экранов. Труды международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". Саров. 2015. С. 212-234.
5. Кузьмицкий И.В. Подвижная точка Жуге. Детонация как фазовый переход//LAP LAMBERT Academic Publishing. 2017. 452 с.
6. Кузьмицкий И.В. Подвижная точка Жуге в классической теории детонации. Детонация как фазовый переход//ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. Монография. Саров. 2018. 317 с.
7. Кузьмицкий И.В. Пластифицированный ТЭН. Принцип Гленсдорфа-Пригожина при определении детонационных параметров в модели "Детонация как фазовое превращение". Труды международной конференции XIX Харитоновские тематические научные чтения. "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". Саров. 2017. Том 1. С. 78-85.
8. Кузьмицкий И.В. Затухание ударной волны с фазовым превращением за фронтом ударного скачка. Труды международной конференции XIX Харитоновские тематические научные чтения. "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". Саров. 2017. Том 1. С. 320-324.
9. Кузьмицкий И.В. Моделирование механизма откола в материалах с фазовым превращением. Применение к бериллию. Труды международной конференции XIX Харитоновские тематические научные чтения. "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". Саров. 2017. Том 1. С. 414-422.
10. Кузьмицкий И.В. Модель плавления вещества на ударной волне на основе уравнений фазового превращения. Плавление бериллия. Труды международной конференции XXI Харитоновские тематические научные чтения. "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". Саров. 2019. Настоящее издание.

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ГАЗООБРАЗНОГО ДЕЙТЕРИЯ

Г.А. Козлов, Е.Н. Богданов, М.В. Жерноклетов, А.В. Родионов, М.Е. Шаврин,
А.В. Федоров, Е.А. Чудаков, Д.А. Калашников, И.С. Гнуттов, А.О. Яговкин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение. Исследования поведения газов в экстремальных состояниях представляют интерес с точки зрения верификации широкодиапазонных уравнений состояния. Эти уравнения состояния необходимы, например, при решении проблемы осуществления инерциального термоядерного

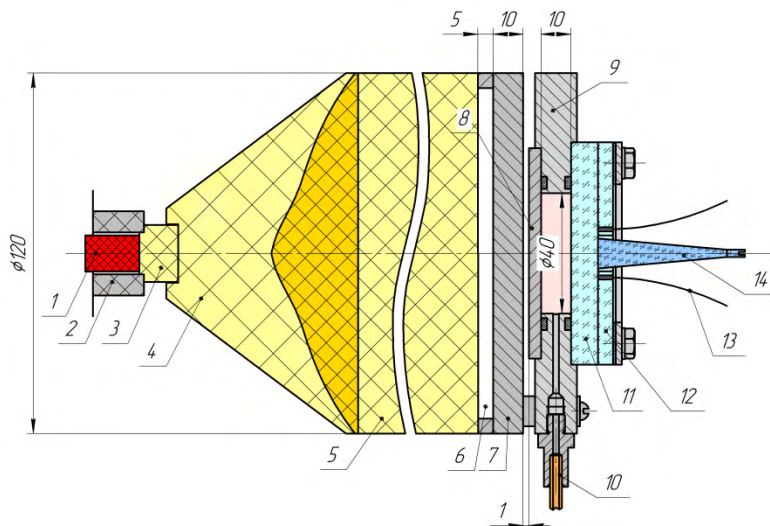
синтеза, а также при моделировании процессов образования и эволюции звезд и гигантских газовых планет.

Для изучения свойств газов при высоких давлениях и температурах широко применяется нагружение ударными волнами. Благодаря развитию методической базы и повсеместному внедрению методик доплеровской диагностики, имеется возможность продвинуться в исследованиях ударно-волнового сжатия газов, которые под воздействием импульсных давлений и температур являются плотной неидеальной плазмой.

В настоящем докладе представлены результаты экспериментов по исследованию ударно-волновой сжимаемости плотного газообразного дейтерия ($P_0=15$ атм.). Исследования проведены с применением двух независимых методик непрерывной доплеровской диагностики – гетеродин-интерферометра PDV ($\lambda=1550$ нм) и радиоинтерферометра ($\lambda=3,2$ мм).

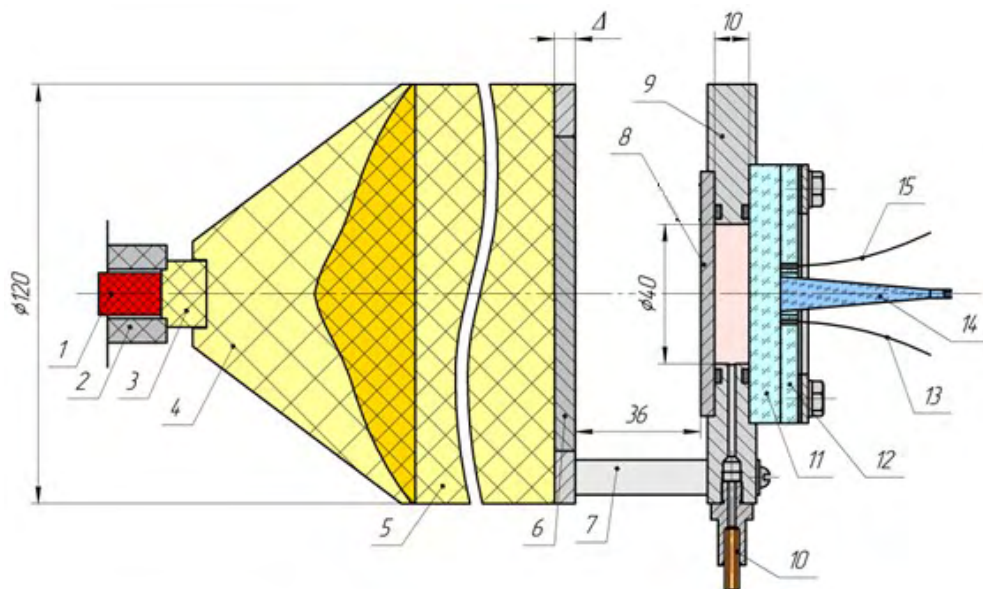
Постановка экспериментов

Проведено четыре взрывных эксперимента по определению динамических характеристик ударно-сжатого дейтерия. Разгон металлических ударников осуществлялся продуктами детонации цилиндрических зарядов взрывчатых веществ (ВВ). Определенная область давления ударного сжатия достигалась за счет варьирования толщины ударника и заряда ВВ. Эскизы экспериментальных сборок с различным типом нагружающих устройств представлены на рисунках 1 и 2.



- 1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – промежуточный детонатор;
4 – плоскостолновой генератор; 5 – заряд ВВ; 6 – воздушный зазор 5 мм;
7 – ударник, алюминий; 8 – экран, алюминий; 9 – корпус; 10 – трубопровод;
11 – окно; 12 – обойма; 13 – оптическое волокно методики PDV;
14 – излучатель радиоинтерферометра

Рисунок 1. Эскиз экспериментальной сборки №1



- 1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – промежуточный детонатор;
4 – плосковолновой генератор; 5 – заряд ВВ; 6 – ударник, алюминий; 7 – стойка;
8 – экран, алюминий; 9 – корпус; 10 – трубопровод; 11 – окно; 12 – обойма;
13 – оптическое волокно методики PDV; 14 – излучатель радиointерферометра

Рисунок 2. Эскиз экспериментальной сборки №2

Тип нагружающего устройства, толщина ударника и экрана экспериментальной сборки, а также размер и состав активного заряда взрывчатого вещества в каждом опыте представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики нагружающих устройств

Опыт	Эксп. сборка	h ударника, мм	h экрана, мм	Заряд ВВ и его размер
1	№1	-	4	ВВ на основе гексогена Ø120x40
2	№2	6	4	ТНТ Ø120x80
3	№2	6	4	ВВ на основе гексогена Ø120x80
4	№2	4	4	ВВ на основе гексогена Ø120x180

Ударная волна в исследуемом газе заданной амплитуды создавалась при распаде разрыва на границе с алюминиевым экраном. В устройствах первого типа (см. рисунок 1) она генерируется в экране при торможении продуктов взрыва заряда мощного вторичного взрывчатого вещества, в устройствах второго типа (см. рисунок 2) – при торможении алюминиевого ударника, разгоняемого на базе 36 мм продуктами детонации активного заряда. Инициирование детонации в активном заряде взрывчатого вещества осуществлялось с использованием плосковолнового генератора.

Заполнение газом экспериментальныхборок производилось от автоматизированной системы напуска, с использованием в качестве источника дейтерия металлгидридного генератора на основе ванадия. Величина давления в процессе заполнения сборки измерялась датчиком давления WKA (диапазон измерения 0...250 кг/см², класс точности 0,5).

На момент подрыва экспериментальныхборок давление дейтерия внутриборок составляло 15 атм., начальная температура $T_0 = 10^{\circ}\text{C}$, начальная плотность дейтерия при данной температуре и давлении составляет $\rho_0 = 0,00262 \text{ г/см}^3$.

Регистрация движения поверхности алюминиевого ударника и момента прихода ударной волны в дейтерии на отсечку из полиметилметакрилата (окно поз. 11 на рисунках 1 и 2) осуществлялась с помощью 4-х канального комплекса гетеродин-интерферометра [1]. Метод измерений основан на регистрации интерференционного оптического сигнала с длиной волны зондирующего излучения ($\lambda=1550$ нм), несущего информацию о доплеровском сдвиге частоты зондирующего излучения при его отражении от движущейся поверхности с помощью высокочастотных фотодетекторов инфракрасного излучения с шириной полосы до 25 ГГц и широкополосного осциллографа с аналогичной шириной полосы пропускания. После выполнения обработки экспериментальных данных по алгоритму оконного преобразования Фурье с помощью полученных спектрограмм определяются скорости движения объектов.

Для тех же целей в опытах применялся радиоинтерферометр (РИФ) ПРИ-03, предназначенный для измерения перемещений и скоростей физических объектов, которые способны отражать радиоволны миллиметрового (3,2 мм) диапазона длин волн [1]. Результатом регистрации является сигнал на частоте, равной разности частот принимаемых и излучаемых радиоинтерферометром радиоволн -интерферограмма. После обработки интерферограммы в цифровой форме вычисляется ее текущая фаза и частота. Результаты вычислений регистрируются как функции времени. Текущая фаза и мгновенная частота интерферограммы несут информацию о перемещении и мгновенной скорости отражающего объекта. Связь параметров интерферограммы с параметрами движения исследуемого объекта обусловлена эффектом Доплера.

Экспериментальные результаты

На рисунке 3 представлены результаты регистрации с помощью гетеродин-интерферометра. Представленные профили скорости демонстрируют возможность регистрации не только движения свободной поверхности ударника, но и моменты прихода ударной волны в дейтерии на границу с окном из полиметилметакрилата (ПММА).

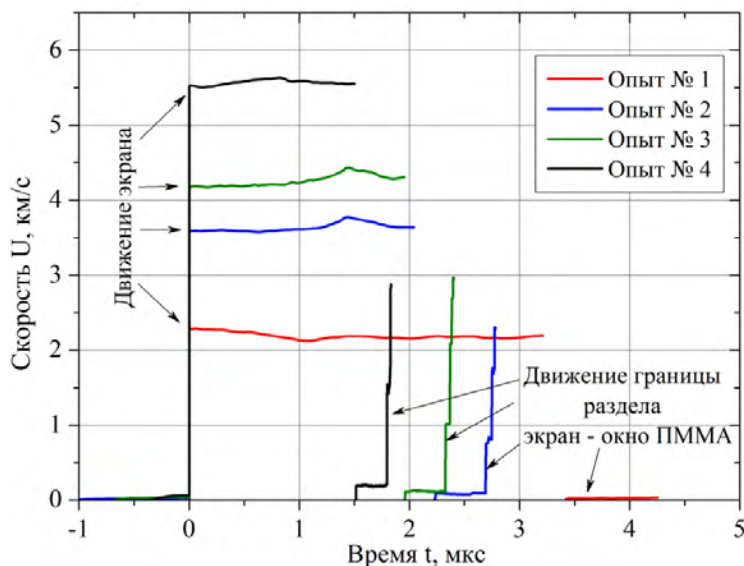


Рисунок 3. Экспериментальные зависимости скорости свободной поверхности экрана и границы раздела экран – окно ПММА от времени, зарегистрированные гетеродин-интерферометром

На рисунке 4 представлены зависимости скорости свободной поверхности экрана от времени, зарегистрированные гетеродин-интерферометром и радиоинтерферометром. Сравнение результатов демонстрирует согласие между двумя методиками, которое свидетельствует об отражении микроволнового излучения только от поверхности экрана. Следовательно, в опытах не зарегистрировано превышения проводимости ударно-сжатого дейтерия выше 0,001 См/см, а

определение скорости ударной волны в дейтерии при начальном давлении $P_0 = 15$ атм в диапазоне скоростей 2 – 5,6 км/с радиоинтерферометром невозможно.

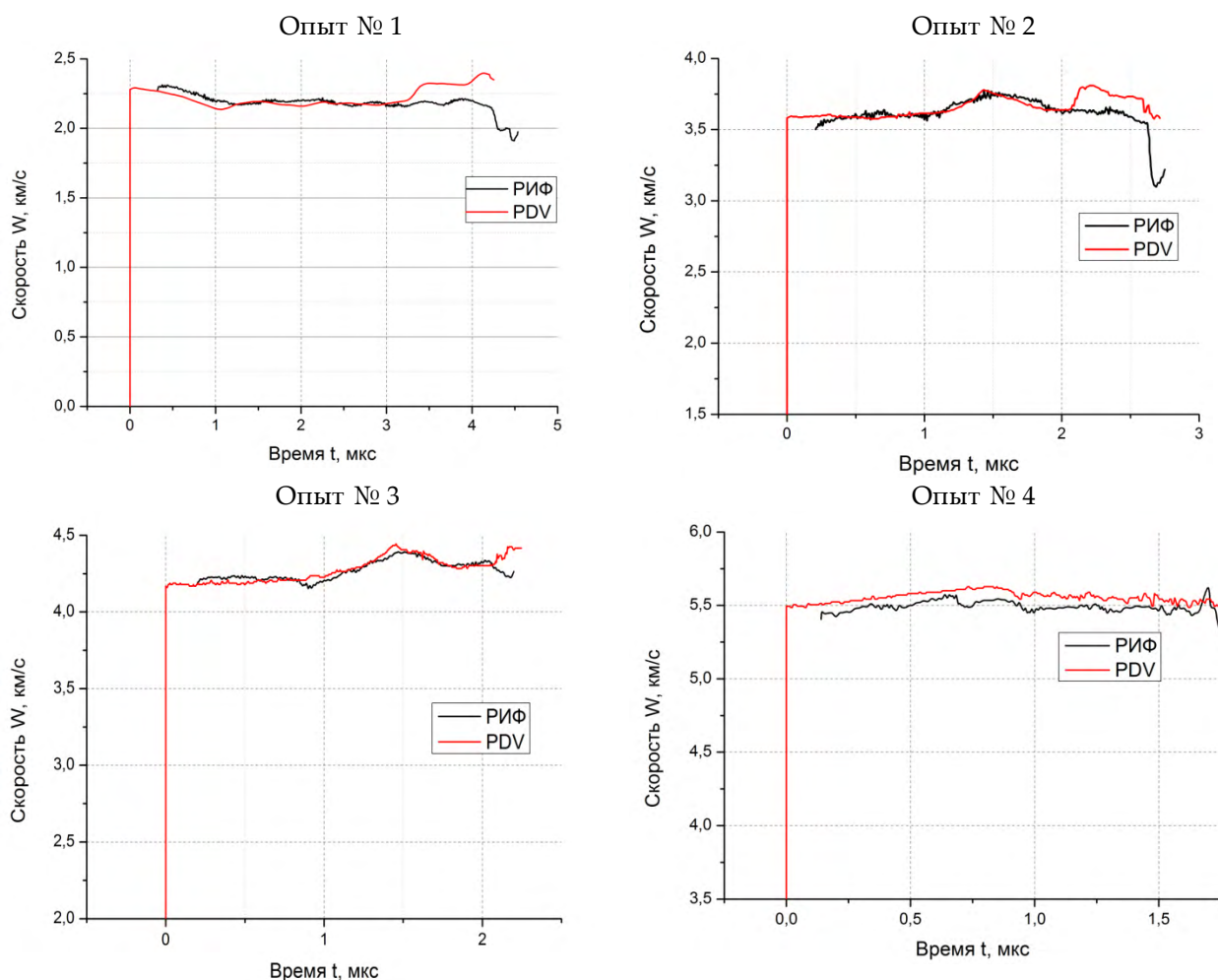


Рисунок 4. Зависимости скорости свободной поверхности экрана от времени, зарегистрированные гетеродин-интерферометром PDV и микроволновым радиоинтерферометром РИФ

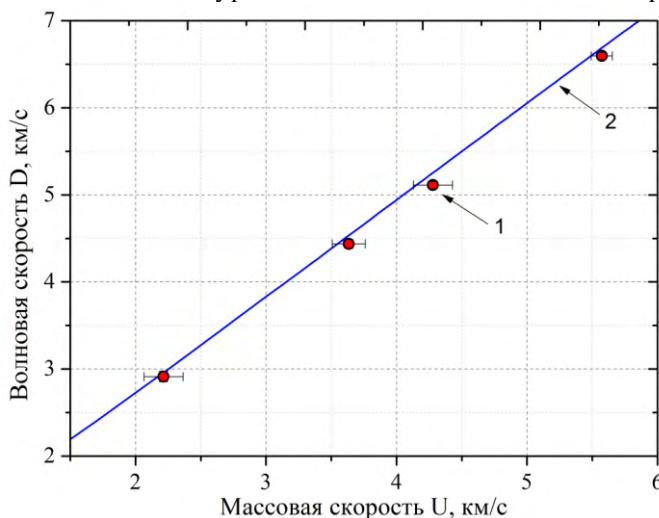
Полученные с помощью методики гетеродин-интерферометра данные позволяют получить информацию о параметрах ударно-волновой сжимаемости дейтерия. Средняя по базе измерения 10 мм скорость ударной волны в дейтерии D определялась по моментам времени начала движения свободной поверхности экрана и выхода ударной волны на поверхность оптического окна из ПММА. Массовая скорость U определялась путем усреднения скорости движения экрана на базе измерения. Данная процедура применялась для каждого из четырёх каналов регистрации, после чего производилось усреднение. В таблице 2 представлены результаты определения характеристик ударного сжатия с помощью гетеродин-интерферометра и радиоинтерферометра. Представленные в таблице 2 результаты демонстрируют согласие между двумя методиками регистрации скорости движения свободной поверхности экрана.

Данные методики гетеродин интерферометра были использованы для определения параметров ударного сжатия дейтерия, для этого использованы законы сохранения массы и импульса. Результаты приведены также в таблице 2.

Таблица 2. Результаты экспериментов

Опыт	U, км/с (РИФ)	U, км/с (PDV)	D, км/с (PDV)	P, ГПа	ρ , г/см ³
№1	2,20±0,07	2,22±0,15	2,91±0,04	0,0184±0,0015	0,0109±0,0016
№2	3,64±0,11	3,63±0,13	4,44±0,05	0,0438±0,002	0,0145±0,0016
№3	4,27±0,12	4,28±0,15	5,11±0,03	0,0588±0,0025	0,0161±0,0022
№4	5,49±0,06	5,57±0,08	6,60±0,04	0,0978±0,002	0,0169±0,0008

На рисунке 5 в D-U-переменных, а на рисунке 6 в P(ρ)-переменных, представлены полученные в настоящей работе методикой гетеродин-интерферометра точки на ударной адиабате дейтерия в сравнении с результатами расчета по уравнению состояния дейтерия Копышева-Хрусталева [2]. Учитывая, что на каждую точку на ударной адиабате проводился всего один эксперимент, наблюдается неплохое согласие в пределах погрешности измерений экспериментальных данных с результатами расчета с использованием уравнения состояния Копышева-Хрусталева.



1 – экспериментальные данные; 2 – результат расчета с использованием уравнения состояния Копышева-Хрусталева

Рисунок 5. Зависимость волновой скорости от массовой скорости на ударной адиабате дейтерия ($P_0=15$ атм., $T_0=10^\circ\text{C}$)

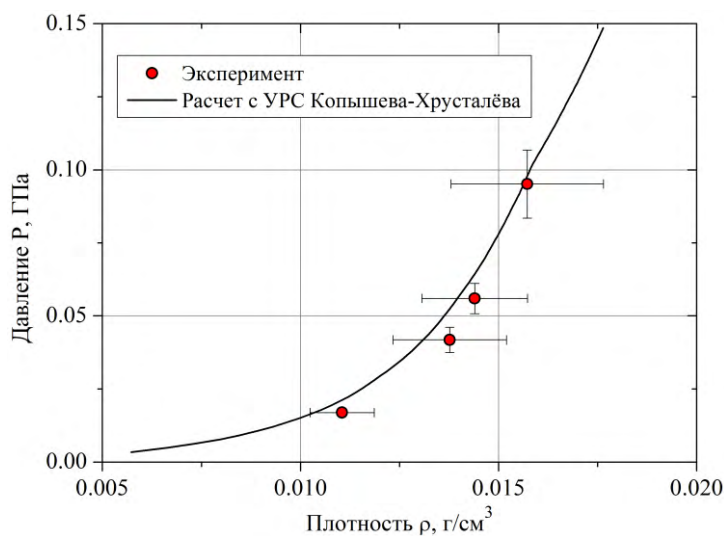


Рисунок 6. Зависимость давления от плотности на ударной адиабате дейтерия ($P_0=15$ атм., $T_0=10^\circ\text{C}$)

Выводы. В докладе представлены результаты экспериментальных исследований ударно-волновой сжимаемости газообразного дейтерия, изначально находившегося при давлении 15 атм. и температуре $T_0 = +10^\circ\text{C}$, в диапазоне волновых скоростей от 2,9 до 6,6 км/с.

В каждом опыте методикой гетеродин-интерферометра PDV регистрировались зависимости скорости движения металлического экрана от времени и моменты выхода ударной волны в дейтерий на поверхность оптического окна, а также скорость границы раздела экран-окно. Зависимости скорости движения экрана от времени, зарегистрированные методикой микроволновой диагностики, согласуются с результатами измерений методикой гетеродин-интерферометра, при этом в проведенных опытах не зарегистрировано превышения проводимости ударно-сжатого дейтерия выше 0,001 См/см.

Полученные в экспериментах данные по ударно-волновой сжимаемости плотного газообразного дейтерия согласуются с результатами расчета с использованием уравнения состояния Копышева-Хрусталева.

Список литературы

1. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. доктора техн. наук А.Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 322 с.
2. Копышев В.П., Хрусталева В.В. Уравнение состояния водорода до 10 Мбар // ПТМФ. 1980, №1, С. 122-128.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ СПЛАВА ВМ 3-2 ДО СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

*Г.В. Борисков, А.И. Быков, Н.И. Егоров, А.С. Коршунов, В.Н. Павлов,
И.С. Стрелков, О.М. Сурдин, В.И. Тимарева, С.И. Белов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Изложены постановка и результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию в устройстве на основе магнитокумулятивного генератора «тяжёлого» сплава марки ВМ 3-2 (на основе вольфрама) с нормальной плотностью 17,29 г/см³ и 18,22 г/см³. Полученные на P - r диаграмме точки сопоставляются с нормальными изоэнтропами, построенными ранее по данным ударно-волновых экспериментов методом Альтшулера-Брусникуина-Кузьменкова. Наблюдается хорошее согласие экспериментальных точек и указанных полуфемениологических кривых.

Введение

В работе [1] обсуждались результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию тяжёлого сплава марки ВМ-3-2 (содержит 95 % W, 3 % Ni, 2 % Cu) с нормальной плотностью 17,29 г/см³ в устройстве на основе взрывомагнитного генератора (ВМГ) типа МК-1 с целью построения кривой холодного сжатия (нулевой изотермы) данного сплава в области сверхвысоких давлений. В данной работе изложена постановка и результаты двух дополнительных экспериментов по исследованию нулевой изотермы сплава ВМ-3-2. Нормальная плотность исследуемых образцов, используемых в проведённых экспериментах, равнялась 18,22 г/см³.

1 Постановка эксперимента

Экспериментальная установка содержит: устройство сжатия; рентгенографическое устройство; элементы электроизмерительных схем; устройства подрыва и синхронизации; источники питания. Рентгенографическое устройство, в свою очередь, состоит из бетатрона (в