

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ГАЗООБРАЗНОГО ДЕЙТЕРИЯ

*Г. А. Козлов, Е. Н. Богданов, А. В. Родионов, М. Е. Шаврин, А. В. Федоров,
Е. А. Чудаков, Д. А. Калашиников, И. С. Гнутов, А. О. Яговкин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

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. Каждому эксперименту соответствовала определенная область давлений ударного сжатия, которая достигалась с использованием определенных нагружающих устройств. Эскизы экспериментальных сборок с различным типом нагружающих устройств представлены на рис. 1 и 2.

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

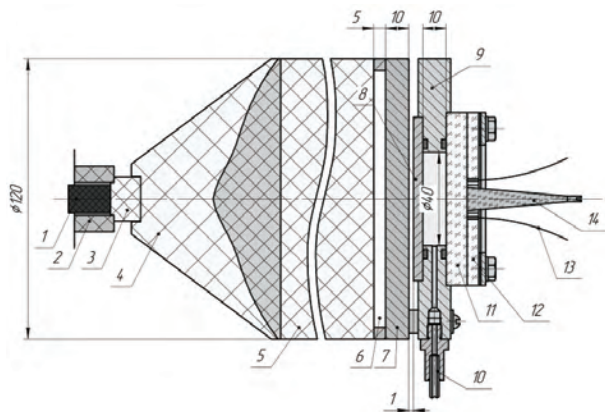


Рис. 1. Эскиз экспериментальной сборки № 1: 1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – промежуточный детонатор; 4 – плосковолновой генератор; 5 – заряд ВВ; 6 – воздушный зазор 5 мм; 7 – ударник, алюминий; 8 – экран, алюминий; 9 – корпус; 10 – трубопровод; 11 – окно; 12 – обойма; 13 – оптическое волокно методики PDV; 14 – излучатель радиоинтерферометра

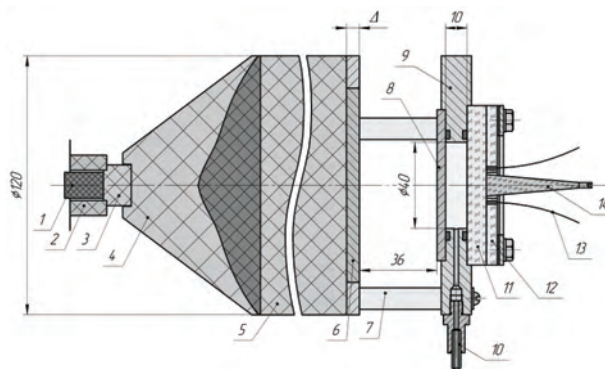


Рис. 2. Эскиз экспериментальной сборки № 2: 1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – промежуточный детонатор; 4 – плосковолновой генератор; 5 – заряд ВВ; 6 – ударник, алюминий; 7 – стойка; 8 – экран, алюминий; 9 – корпус; 10 – трубопровод; 11 – окно; 12 – обойма; 13 – оптическое волокно методики PDV; 14 – излучатель радиоинтерферометра

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 Ø120×40
2	№ 2	6	4	ТНТ Ø120×80
3	№ 2	6	4	ВВ на основе гексогена Ø120×80
4	№ 2	4	4	ВВ на основе гексогена Ø120×180

Ударная волна в исследуемом газе заданной амплитуды создавалась при распаде разрыва на границе с алюминиевым экраном. В устройствах первого типа (см. рис. 1) она генерируется в экране при торможении продуктов взрыва заряда мощного вторичного взрывчатого вещества, в устройствах второго типа (см. рис. 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 WIKA (диапазон измерения 0...250 кг²/см, класс точности 0,5).

На момент подрыва экспериментальныхборок давления дейтерия внутриборок составляло 15 атм., начальная температура $T_0 = 10$ °С, начальная плотность дейтерия при данной температуре и давлении составляет $\rho_0 = 0,00262$ г/см³.

Регистрация движения поверхности алюминиевого ударника и момента прихода ударной волны в дейтерии на отсечку из полиметилметакрилата (окно 11 на рис. 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 аналоговичной 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) диапазонов длин волн [1]. Результатом регистрации является сигнал-интерфе-

рограмма 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 рис. 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).

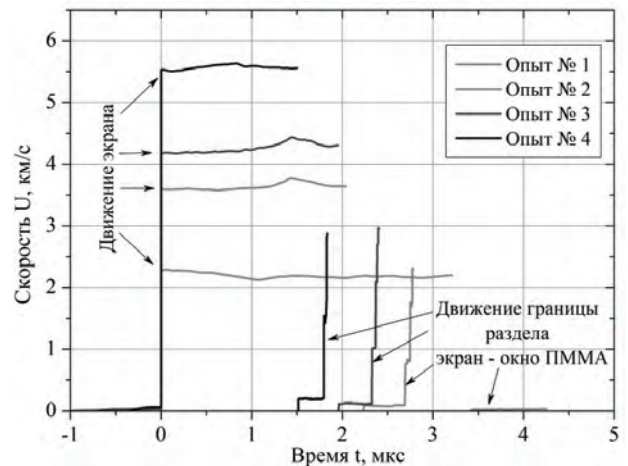


Рис. 3. Экспериментальные зависимости скорости свободной поверхности экрана и границы раздела экран – окно ПММА от времени, зарегистрированные гетеродин-интерферометром

На рис. 4 представлены зависимости скорости свободной поверхности экрана о 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.

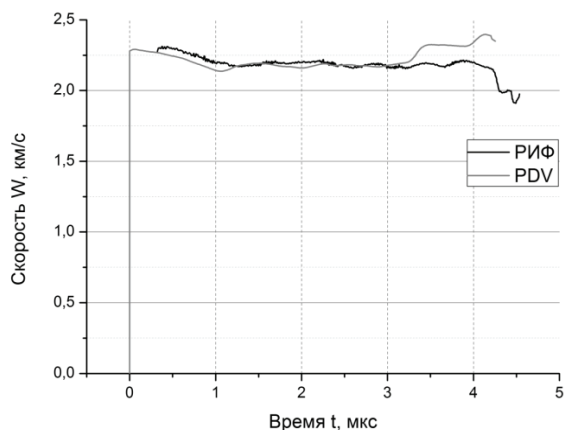
Полученные с помощью методики гетеродин-интерферометра данные позволяют получить информацию о параметрах ударно-волновой сжимаемости дейтерия. Средняя по базе измерения 10 мм скорость ударной волны в дейтерии D определялась по моментам времени начала движения свободной

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 четырех каналов регистрации, после чего производилось усреднение. В табл. 2 представлены результаты определения характеристик ударного сжатия с помощью гетеродин-интерферометра и радиоинтерферометра. Представленные в табл. 2 результаты демонстрируют согласие между двумя методиками регистрации скорости движения свободной поверхности экрана.

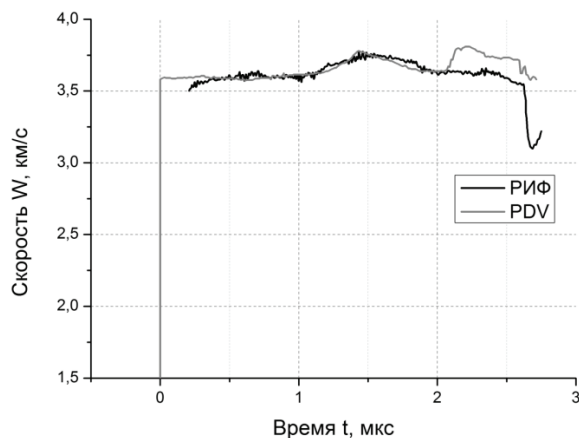
Данные методики гетеродин интерферометра были использованы для определения параметров

ударного сжатия дейтерия, для этого использованы законы сохранения массы и импульса.

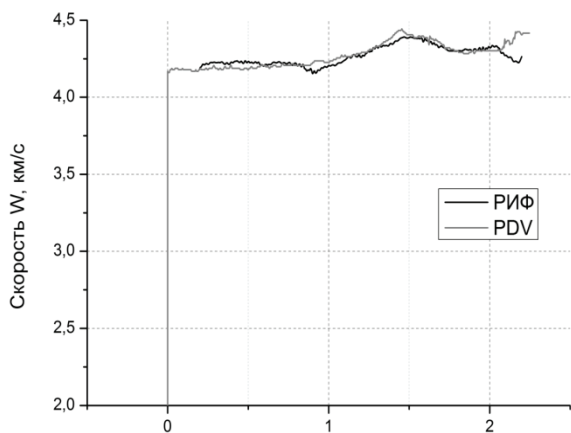
На рис. 5 в $D-U$ -переменных, а на рис. 6 в $P(\rho)$ -переменных, представлены полученные в настоящей работе методикой гетеродин-интерферометра точки на ударной адиабате дейтерия в сравнении с результатами расчета с уравнением состояния дейтерия Копышева–Хрусталева [2]. Учитывая, что на каждую точку 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.



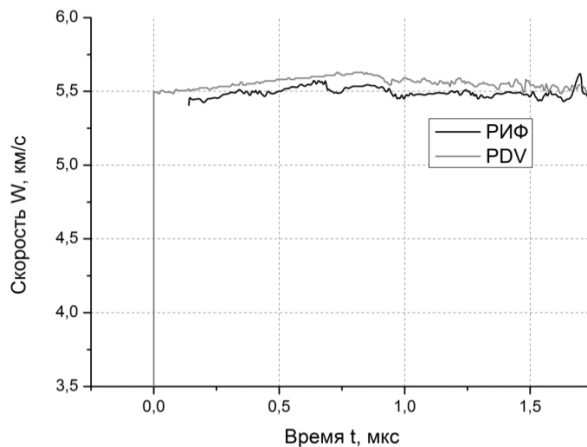
а



б



в



г

Рис. 4. Зависимости скорости свободной поверхности экрана от времени, зарегистрированные гетеродин-интерферометром PDV и микроволновым радиоинтерферометром РИФ: а – опыт № 1, б – опыт № 2, в – опыт № 3, г – опыт № 4

Таблица 2

Результаты экспериментов

Опыт	U , км/с (РИФ)	U , км/с (PDV)	D , км/с (PDV)	P , ГПа	ρ , г ³ /см
№ 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

Выводы

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований ударно-волновой сжимаемости газообразного дейтерия, изначально находившегося при начальном давлении 15 атм. и температуре $T_0 = +10$ °С, 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 дейтерии 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.

Литература

1. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. доктора техн. наук А. Л. Михайлова. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 322

2 Копышев В. П., Хрусталева В. В. Уравнение состояния водорода до 10 Мбар // ПТМФ. 1980. № 1. С. 122–128.

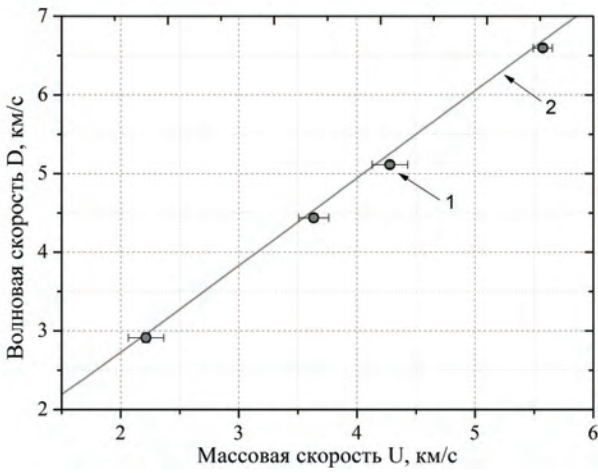


Рис. 5. Зависимость волновой скорости от массовой скорости на ударной адиабате дейтерия ($P_0 = 15$ атм., $T_0 = 10$ °С): 1 – экспериментальные данные; 2 – результат расчета с использованием уравнения состояния Копышева-Хрусталева

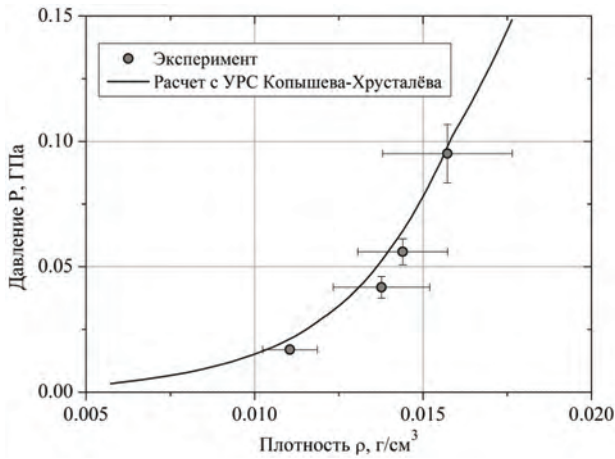


Рис. 6. Зависимость давления от плотности на ударной адиабате дейтерия ($P_0 = 15$ атм., $T_0 = 10$ °С)