

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПЛЕРОВСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

Козлов Григорий Александрович (postmaster@ifv.vniief.ru), Богданов Евгений Николаевич, Малышев Андрей Николаевич, Становов Александр Александрович, Козлов Денис Вячеславович, Шаврин Михаил Евгеньевич, Киришанов Сергей Иванович

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

Представлены результаты экспериментальных исследований ударно-волновой сжимаемости атмосферного воздуха при начальном давлении $P_0 = 748 \div 758$ мм. рт. ст., температуре $T_0 = 12-25$ °С и плотности $\rho_0 = 1,13 \div 1,32$ мг/см³. С использованием методов непрерывной доплеровской диагностики (гетеродин-интерферометр PDV и радиоинтерферометр) проведена регистрация динамических параметров ударно-сжатого воздуха в диапазоне массовых скоростей от 3,5 до 5,7 км/с. Полученные в экспериментах данные согласуются с результатами расчетов Н. М. Кузнецова.

Ключевые слова: атмосферный воздух, ударная волна, гетеродин-интерферометр, радиоинтерферометр.

DETERMINATION OF THE SHOCK ADIABATE OF AIR USING DOPPLER DIAGNOSTIC METHODS

Kozlov Grigory Alexandrovich (postmaster@ifv.vniief.ru), Bogdanov Evgeny Nikolaevich, Malyshev Andrey Nikolaevich, Stanovov Alexander Alexandrovich, Kozlov Denis Vyacheslavovich, Shavrin Mikhail Evgenievich, Kirshanov Sergey Ivanovich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper presents results of experimental investigations of shock-wave compressibility of atmospheric air at the initial pressure $P_0 = 748 \div 758$ mm Hg, temperature $T_0 = -12 \div 25$ °C and density $\rho_0 = 1,13 \div 1,32$ mg/cm³. Using the methods of continuous Doppler diagnostics (heterodyne-interferometer PDV and radio interferometer), the dynamic parameters of shock-compressed air were recorded in the range of mass velocities from 3,5 to 5,7 km/s. The data obtained in the experiments agree with the results of calculations by N. M. Kuznetsov.

Keywords: atmospheric air, shock wave, heterodyne-interferometer PDV, radio interferometer.

Введение

Для верификации уравнений состояний (УРС) продуктов взрыва (ПВ) большую ценность имеют результаты экспериментов, в которых реализуются высокие степени расширения ПВ $\rho_{CJ}/\rho \sim 10$. Наиболее простые редакции подобных экспериментов основаны на расширении ПВ в атмосферный воздух и регистрации скорости движения ударной волны в нем с использованием метода микроволновой диагностики.

В связи с современными требованиями к точности данных по изэнтропическому расширению ПВ существует необходимость уточнения ударных адиабат газов, используемых в опытах в качестве эталонных материалов. Поэтому цель настоящей работы состоит в тестировании редакции экспериментов по определению параметров ударно-волнового сжатия газов на примере атмосферного воздуха, как хорошо изученного газа.

В работе протестированы редакции экспериментов, основанные на генерации ударных волн в иссле-

двух газов с помощью плоскороволновых нагружающих устройств. Регистрация скорости движения свободной поверхности экрана, которая принимается равной массовой скорости за фронтом ударной волны, осуществляется гетеродин-интерферометром PDV, для регистрации движения ударных волн (УВ) применяется радиоинтерферометр (РИФ). Результаты проведенных исследований позволили выявить границу применимости методов регистрации (PDV и РИФ) по определению динамических характеристик ударно-сжатого атмосферного воздуха.

Постановка экспериментов

На рис. 1 и рис. 2 представлены эскизы экспериментальных сборок с различным типом нагружающих устройств, предназначенных для уточнения данных по ударно-волновой сжимаемости атмосферного воздуха.

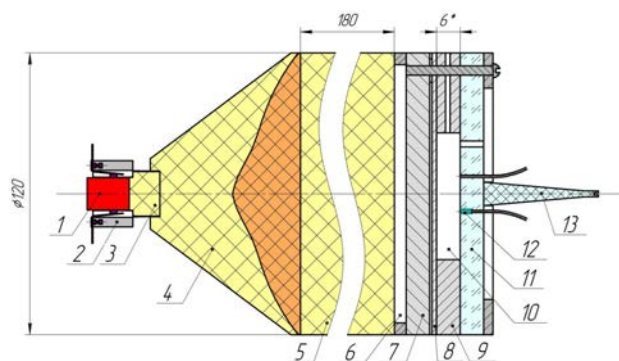


Рис. 1. Эскиз экспериментальной сборки № 1: 1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – промежуточный детонатор; 4 – плоскороволновой генератор; 5 – заряд ВВ; 6 – воздушный зазор 5 мм; 7 – ударник, алюминий; 8 – экран, алюминий; 9 – корпус; 10 – исследуемый газ (атмосферный воздух); 11 – окно из полиметилметакрилата (ПММА); 12 – оптическое волокно методики PDV; 13 – излучатель радиоинтерферометра

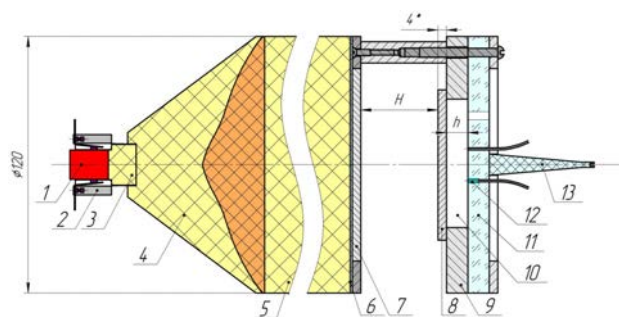


Рис. 2. Эскиз экспериментальной сборки № 2: 1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – промежуточный детонатор; 4 – плоскороволновой генератор; 5 – заряд ВВ; 6 – диск ПММА 1 мм; 7 – ударник, алюминий; 8 – экран, алюминий; 9 – корпус; 10 – исследуемый газ (атмосферный воздух); 11 – окно ПММА; 12 – оптическое волокно методики PDV; 13 – излучатель радиоинтерферометра

Иницирование детонации в активном заряде взрывчатого вещества (ВВ) осуществлялось с использованием взрывного плоскороволнового генератора. В устройствах первого типа (см. рис. 1) УВ генерировалась 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 Н продуктами детонации активного заряда. Определенная область давления ударного сжатия достигалась за счет варьирования толщины ударника и заряда ВВ.

Тип нагружающего устройства, толщина ударника и экрана, размер и состав активного заряда взрывчатого вещества, база полета ударника и база движения УВ в воздухе для каждого опыта представлены в табл. 1. В экспериментах использовались алюминиевые экраны, полученные после токарной обработки, некоторые дополнительно шлифовались с использованием Эльборовой пасты. Всего проведено пять взрывных экспериментов.

В табл. 2 представлены значения начальных давлений P_0 , температур T_0 , относительных влажностей φ и начальных плотностей ρ_0 атмосферного воздуха рассчитанных по данным [1] для каждого эксперимента.

Регистрация движения свободной поверхности алюминиевого ударника осуществлялась с помощью 4-х канального комплекса гетеродин-интерферометра [2]. Оптические датчики располагались на диаметре 12 мм относительно оси симметрии экспериментальной сборки. Метод PDV основан на регистрации оптического сигнала с длиной волны $\lambda = 1550$ нм, несущего информацию о доплеровском сдвиге частоты зондирующего излучения при его отражении от движущейся поверхности. После выполнения обработки экспериментального сигнала по алгоритму оконного преобразования Фурье с помощью полученных спектрограмм определялись скорости движения свободной поверхности экрана.

Для регистрации скорости движения УВ в воздухе в экспериментах применялся РИФ РИ-03 с длиной волны радиоизлучения 3,2 мм, предназначенный для измерения перемещения и скорости объектов [2]. Излучатель радиоинтерферометра располагался на оси экспериментальной сборки. РИФ регистрирует сигнал с частотой, равной разности частот принимаемых и излучаемых радиоволн – интерферограмму. После обработки интерферограммы вычисляется ее текущая фаза и частота. 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, полученные в первом эксперименте при регистрации скорости

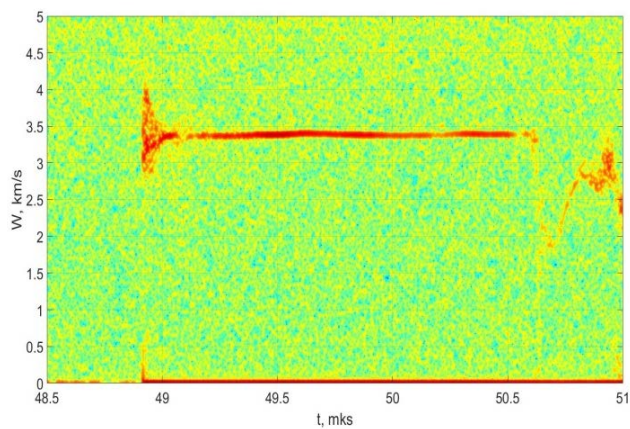
Характеристики нагружающих устройств

Эксперимент	Номер эксп. сборки	Заряд ВВ и его размер, мм	Толщина ударника, мм	База полета ударника Н, мм	Толщина экрана, мм	База движения УВ в воздухе h, мм	Метод обработки поверхности экрана
1	№ 1	ВВ на основе октогена $\varnothing 120 \times 180$	-	-	2	6,74	не обрабатывалась
2	№ 2	ВВ на основе гексогена $\varnothing 120 \times 60$	6	36	4	6,94	шлифование
3	№ 2	ВВ на основе октогена $\varnothing 120 \times 90$	6	36	4	6,74	шлифование
4	№ 2	ВВ на основе гексогена $\varnothing 120 \times 180$	4	38	4	3,91	не обрабатывалась
5	№ 2	ВВ на основе октогена $\varnothing 120 \times 180$	4	38	4	3,81	не обрабатывалась

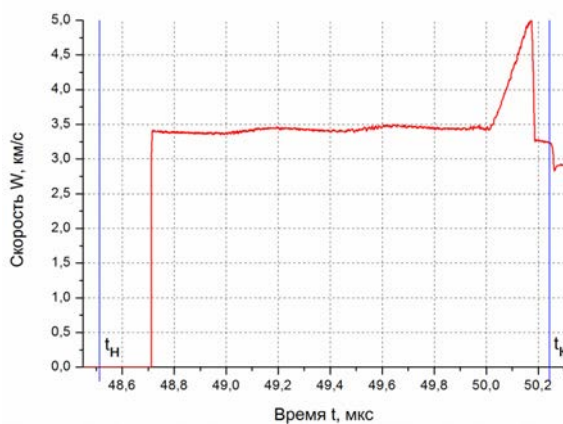
Таблица 2

Начальные параметры воздуха

Опыт	P_0 , мм. рт. ст	T_0 , °C	ϕ , %	ρ_0 , мг/см ³
1	751	26	29	1,13
2	751	24	26	1,13
3	751	26	26	1,13
4	758	-1	80	1,27
5	748	-12	77	1,32



а



б

Рис. 3. Зависимость скорости свободной поверхности экрана от времени, полученные с помощью: а – гетеродин-интерферометра PDV, б – радиointерферометра; t_n – начало движения УВ, t_k – соударение УВ с окном из ПММА

свободной поверхности алюминиевого экрана, с помощью гетеродин-интерферометра PDV (рис. 3, а) и радиointерферометра (рис. 3, б).

Значения средней скорости свободной поверхности экрана в эксперименте № 1 составляет $W = 3,46 \pm 0,02$ км/с по данным PDV и $W = 3,43 \pm 0,05$ км/с по данным РИФ.

Из анализа зависимостей рис. 3 следует, что в эксперименте не достигнут порог ионизации в ударно-сжатом атмосферном воздухе: отражение радиоизлучения происходит от свободной поверхности экрана, а не от фронта ударной волны. В работе [3] было показано, что регистрация УВ в воздухе радиointерферометром осуществляется со значений мас-

совых скоростей превышающих 3,5 км/с, что в настоящем эксперименте достигнуто не было.

Однако среднюю скорость ударной волны D удалось определить по характерным изменениям интерферограммы, используя отметки времени начала и конца движения УВ в воздухе. На рис. 4 представлена интерферограмма РИФ, ее годограф и указаны характерные моменты времени.

Из рис. 4 видно, что при сопоставлении интерферометрических данных в декартовых и полярных координатах (годограф) можно с высокой точностью ($\Delta t = 20$ нс) определить время t_2 , когда происходит излом годографа движения, связанный со столкновением УВ с окном из ПММА. Среднее значение ско-

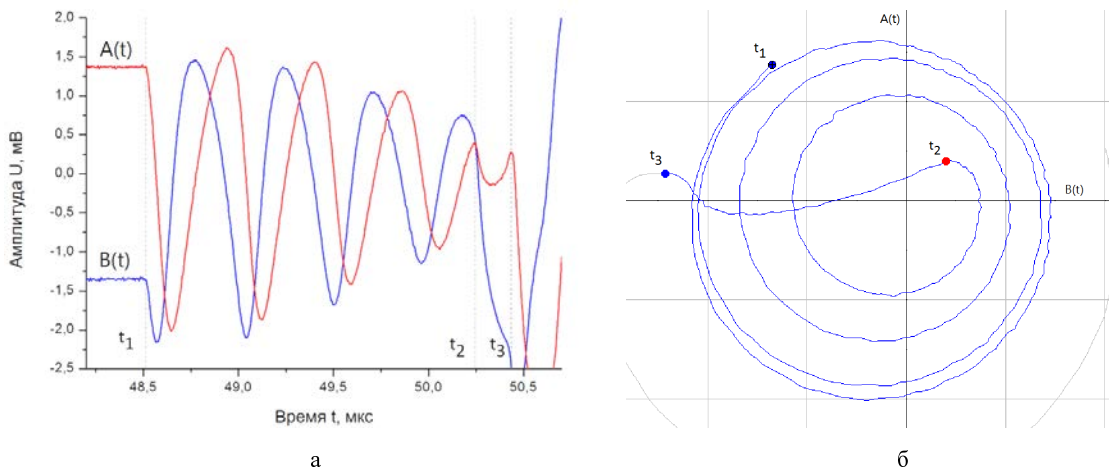


Рис. 4. РИФ: а – интерферограмма, б – годограф движения; $A(t)$, $B(t)$ – квадратурные сигналы интерферограммы, t_1 – начало движения алюминиевого экрана и УВ, t_2 – соударение УВ с окном из ПММА, t_3 – соударение алюминиевого экрана с окном из ПММА

рости УВ в воздухе в эксперименте № 1 составляет $D = h / (t_2 - t_1) = 3,90 \pm 0,05$ км/с.

Аналогичную процедуру с использованием гетеродин-интерферометра PDV выполнить не удалось, так как помощью него не зарегистрирован момент входа УВ в окно из ПММА (см. спектрограмму на рис. 3).

На рис. 5 представлены типичные результаты регистрации гетеродин-интерферометром PDV скорости свободной поверхности алюминиевого экрана, рис. 5, а, в, д, ж, и скорости ударной волны, рис. 5, б, г, е, з, в воздухе с помощью радиоинтерферометра для экспериментов № 2–5.

В экспериментах № 2 и № 3 на спектрограммах наблюдается выброс пылевого потока при выходе УВ из алюминиевого экрана. По-видимому, при шлифовании в поверхность образца внедряются частицы пасты, которые при выходе УВ на свободную поверхность выбрасываются в виде пылевого потока и частично перекрывают лазерное излучение, что не позволяет полноценно регистрировать движение свободной поверхности алюминиевого экрана. Влияние выброса пылевого потока, также наблюдается и при регистрации радиоинтерферометром: формируется нестационарная зависимость скорости движения УВ в воздухе в начальный интервал времени $t = 0,5$ мкс. Поэтому скорость УВ в воздухе определялась по стационарному участку в конечный интервал времени $t = 0,4$ мкс, когда происходит компактирование пыли на поверхности экрана. Полученное значение средней скорости УВ, согласуется со значением скорости, определенной по отметкам времени начала и конца движения УВ в воздухе по базе движения h .

В эксперименте № 5 в алюминии реализуются высокие давления $P \approx 70$ ГПа во фронте ударной волны. В работе [4] показано, что при разгрузке алюминия в воздух из состояния $P = 69$ ГПа, алюми-

ний находится в жидкой фазе. Это наблюдается на спектрограмме эксперимента № 5, где регистрируется движение свободной поверхности экрана только в начале процесса $t = 0,2$ мкс, а затем зондирующее излучение рассеивается плотным потоком расплавленных частиц.

В табл. 3 представлены результаты определения характеристик ударного сжатия атмосферного воздуха с помощью гетеродин-интерферометра и радиоинтерферометра. С использованием закона сохранения массы и импульса, определялись давление и плотность ударно-сжатого атмосферного воздуха с начальной плотностью $\rho_0 = 1,13$ мг/см³.

На рис. 6 и рис. 7 в $D-U$ и $P-\rho$ -координатах соответственно, представлены полученные в настоящей работе точки на ударной адиабате атмосферного воздуха и результаты расчета Н. М. Кузнецова для атмосферного воздуха с начальной температурой $T_0 = 15$ °С и плотностью $\rho_0 = 1,22$ мг/см³ [5].

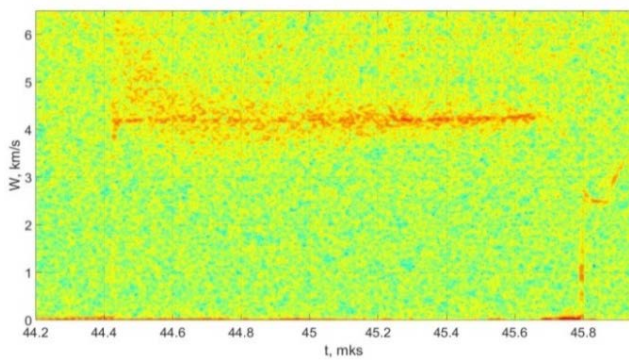
Учитывая, что на каждую точку на ударной адиабате проводился всего один эксперимент, наблюдается хорошее согласие в пределах погрешности измерений экспериментальных данных с результатом расчетов Н. М. Кузнецова [5].

Из рис. 7 видно, что экспериментальные точки на ударной адиабате воздуха для экспериментов № 4 и № 5 находятся в стороне от расчетной ударной адиабаты [5], что связано с большей начальной плотностью воздуха.

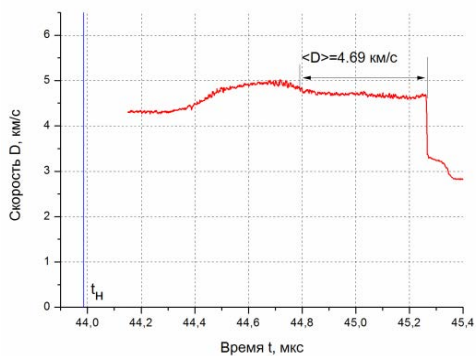
Выводы

В работе представлены результаты экспериментальных исследований ударно-волновой сжимаемости атмосферного воздуха при начальном давлении $P_0 = 748 \div 758$ мм. рт. ст., температуры $T_0 = -12 \div 25$ °С и плотности $\rho_0 = 1,13 \div 1,32$ мг/см³ в диапазоне массовых скоростей от 3,5 до 5,7 км/с с погрешностью

№ 2

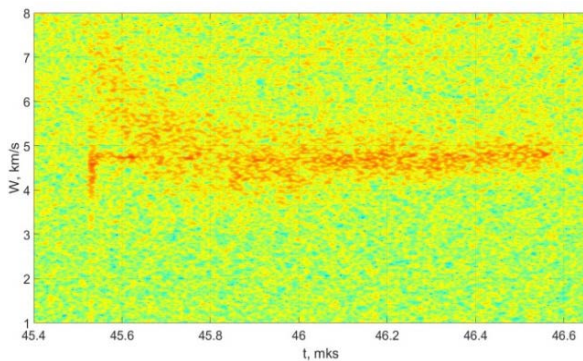


а

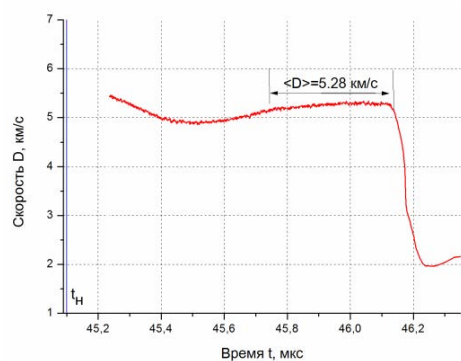


б

№ 3

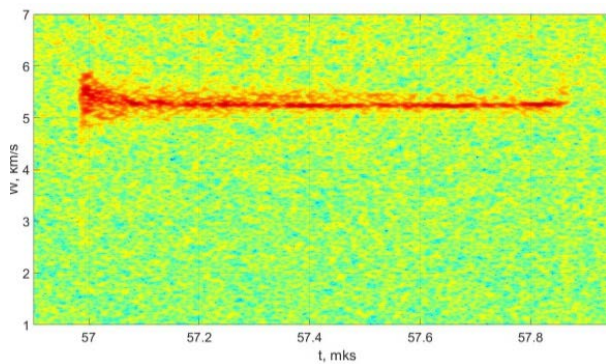


в

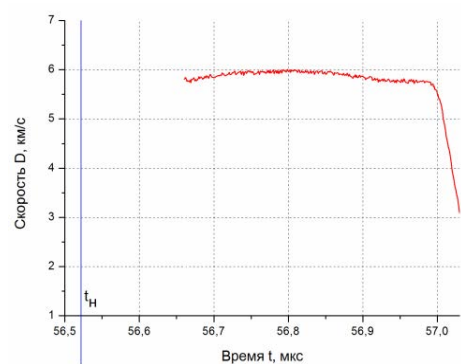


г

№ 4

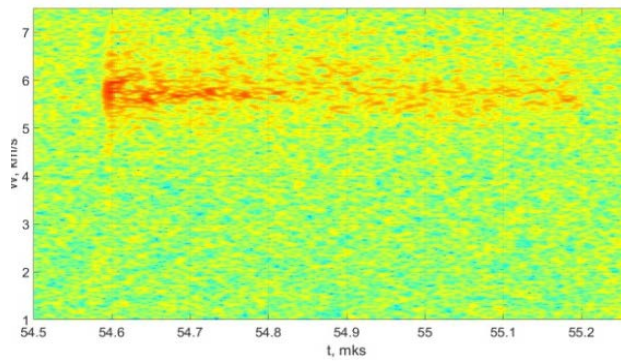


д

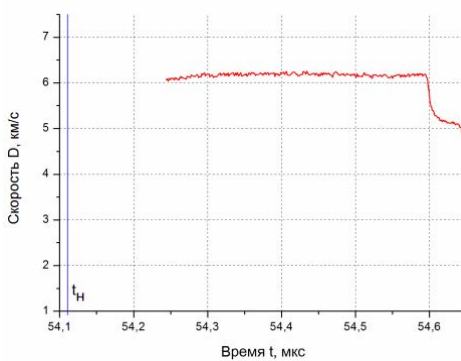


е

№ 5



ж



з

Рис. 5. Зависимость скорости от времени для экспериментов № 2–5: а, в, д, ж – свободной поверхности экрана; б, г, е, з – УВ в воздухе

Результаты экспериментов

Эксперимент	U , км/с (PDV)	D , км/с (РИФ)	P , ГПа	ρ , г/см ³
№ 1	3,46±0,02	3,90±0,05	0,0152±0,0004	0,0100±0,0011
№ 2	4,22±0,07	4,69±0,10	0,0223±0,0008	0,0114±0,0028
№ 3	4,78±0,07	5,28±0,08	0,0285±0,0009	0,0120±0,0024
№ 4	5,26±0,09	5,78±0,10	0,0345±0,0014	0,0126±0,0036
№ 5	5,68±0,10	6,23±0,10	0,0399±0,0016	0,0128±0,0037

Примечание – Расшифровка физических величин: D – среднее значение волновой скорости; U – среднее значение массовой скорости; P – среднее значение давления ударно-сжатого атмосферного воздуха; ρ – среднее значение плотности ударно-сжатого атмосферного воздуха

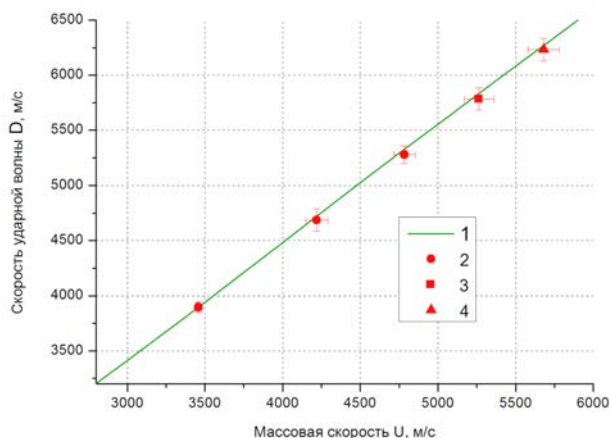


Рис. 6. Ударная адиабата в D - U координатах: 1 – расчет [5], $T_0 = 15$ °С, $\rho_0 = 1,22$ мг/см³; 2 – эксперимент, $T_0 = 25$ °С, $\rho_0 = 1,13$ мг/см³; 3 – эксперимент, $T_0 = -1$ °С, $\rho_0 = 1,27$ мг/см³; 4 – эксперимент, $T_0 = -12$ °С, $\rho_0 = 1,32$ мг/см³

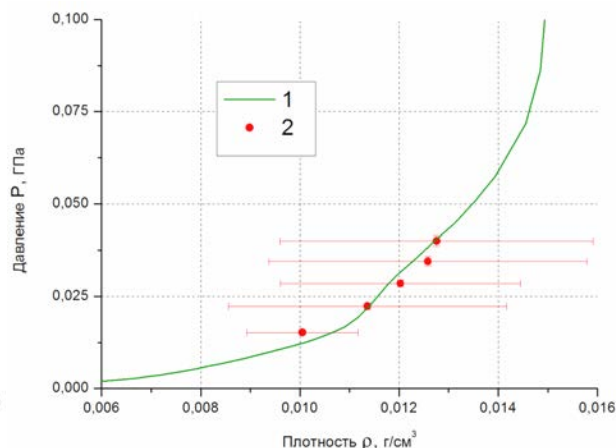


Рис. 7. Ударная адиабата в P - ρ координатах: 1 – расчет [5], $T_0 = 15$ °С, $\rho_0 = 1,22$ мг/см³; 2 – эксперимент, для $\rho_0 = 1,13$ мг/см³

определения не более 2 %. Экспериментальные данные по ударно-волновой сжимаемости атмосферного воздуха согласуются с результатами расчетов Н. М. Кузнецова.

Список литературы

1. Picard A., Davis R. S., Glaser M., Fujii K. Revised formula for the density of moistair (CIPM-2007) // Metrologia 45. 2008. С. 149–155.

2. Невозмущающие методы диагностики быстротекущих процессов / под ред. доктора техн. наук Михайлова А. Л. // Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 322.

3. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Пешков В. В., Богданов Е. Н., Родионов А. В., Седов А. А., Федоров А. В., Назаров Д. В., Финюшин С. А., Дудолодов В. И., Ерунов С. В., Бликов А. О. О влиянии проводимости ударно-сжатого газа на регистрацию параметров движения лайнера с помощью интерферометрических методов // ЖЭТФ. 2012. Т. 141, № 1. С. 182–188.

4. Медведев А. Б. Модель уравнения состояния с учетом испарения, ионизации и плавления // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1992. Вып. 1. С. 12–19.

5. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965.