

03

## Взаимодействие ударной волны с перегородкой из кварцевого песка

© С.В. Головастов, Г.Д. Рублев, Г.Ю. Бивол, А.Н. Паршиков, В.В. Голуб

Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412 Москва, Россия  
e-mail: golovastov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 19 августа 2024 г.

В окончательной редакции 21 октября 2024 г.

Принято к публикации 26 ноября 2024 г.

Экспериментально и численно изучено взаимодействие ударной волны, распространяющейся в водородно-воздушной смеси, с гранулированной разрушаемой перегородкой. Эксперименты проведены с использованием ударной трубы. Поперечные размеры диагностической секции составляли  $40 \times 40$  мм. Начальное давление газовой смеси варьировалось от 10 до 50 кРА. Мольный избыток водорода варьировался от 0.3 до 0.5. Перегородка изготавливалась из кварцевого песка с малым добавлением связующего компонента на основе глины. Эксперименты проводились при числах Маха 2.09–2.88, при этом горение в водородно-воздушной смеси не рассматривалось. Численное моделирование разрушения песчаной перегородки проведено с использованием контактного метода сглаженных частиц типа Годунова. Приведены характерные осциллограммы давления и результаты высокоскоростной визуализации процессов взаимодействия с помощью теневого метода. Определены коэффициенты ослабления отраженной и проходящей ударных волн.

**Ключевые слова:** гранулированная перегородка, ударная волна, песок, коэффициент ослабления ударной волны, контактный метод сглаженных частиц.

DOI: 10.61011/JTF.2025.04.60002.257-24

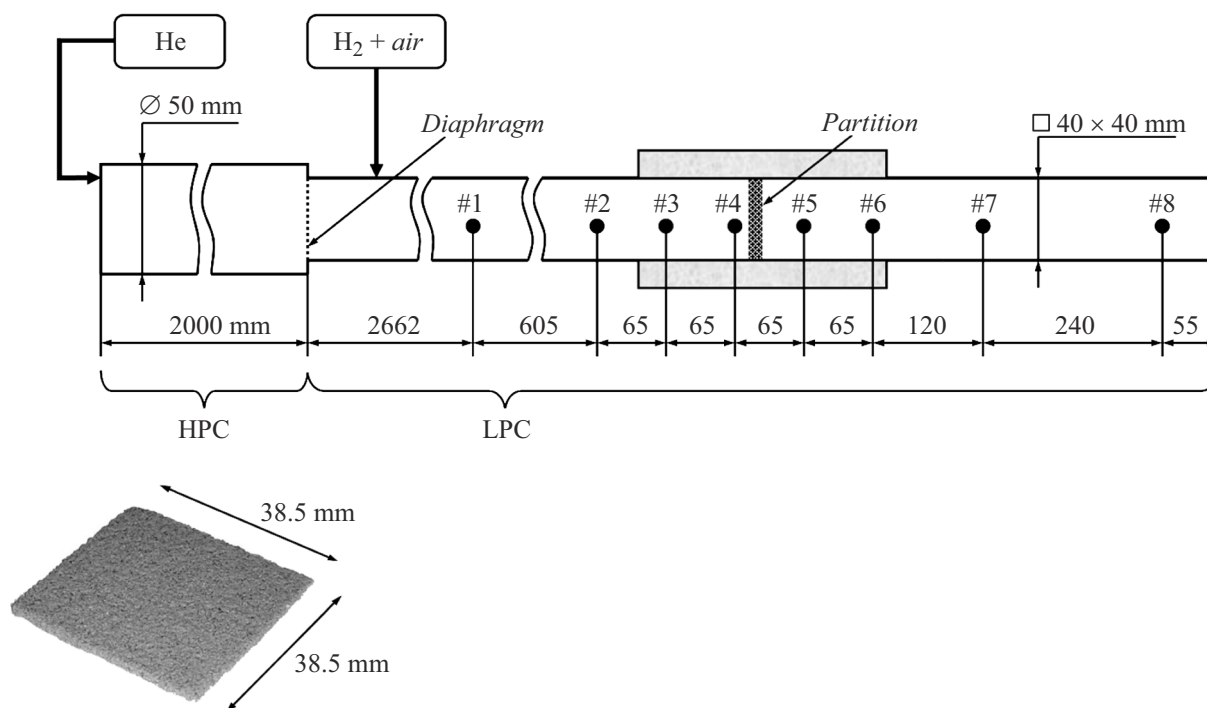
### Введение

Одной из актуальных задач взрывобезопасности является снижение последствий взрыва газовых смесей. При ударно-волновом сжатии горючей смеси одним из главных факторов является степень сжатия смеси и ее нагрев до температуры самовоспламенения. Наиболее существенно на процесс воспламенения влияет отраженная от стенок и преград ударная волна, приводя практически к двукратному увеличению температуры, что сокращает задержку воспламенения и повышает вероятность воспламенения в ограниченном пространстве.

В таком случае эффективным способом снижения температуры при ударно-волновом сжатии горючей смеси, а, следовательно, и предотвращения ее возгорания, может являться полное или частичное разрушение перегородки, от которой отражается ударная волна. Кроме того, внутренняя энергия ударно-сжатого газа за ударной волной частично передается на разрушение перегородки и в кинетическую энергию разлетающихся субмиллиметровых частиц, которые не представляют серьезной опасности [1]. Использование песка в качестве базовой основы разрушаемой перегородки не подразумевает использование его в качестве силовых конструкций, в том числе в качестве несущих опор сооружений. Однако использование песка с малым количеством связующего компонента может быть использовано для изготовления стен в каркасных зданиях, защитных и декоративных экранов.

К настоящему времени взаимодействию ударной волны с песком уделяется пристальное внимание. Воздействие ударной волны на песок изучалось в работах [2–4], динамический отклик и волна разгрузки изучалась в работах [5–8], распространение ударной волны в песке и уравнения состояния представлены в работах [9,10]. В частности, в работе [11] изучалось взаимодействие ударной волны с песчаной горкой, а в работах [12,13] изучалось тангенциальное взаимодействие ударной волны с поверхностью песка или пыли. Деформация песчаного грунта и распространение взрывной волны в сухом песке, подвергшемся заглубленному взрыву, изучалось в работе [14]. Динамика проникновения ударника в песчаный грунт изучалась в работе [15]. Отдельно стоит отметить некоторые работы по взаимодействию и ослаблению ударной волны гранулированными преградами [16,17]. Цикл работ по ослаблению ударной волны с ниспадающим взрывным профилем проводился экспериментально и численно в ОИВТ РАН [18,19]. При этом определены коэффициенты ослабления ударной волны в зависимости от толщины разрушаемого экрана и его положения относительно закрытого конца ударной трубы.

Наряду с разрушаемой преградой, эффективность в ослаблении интенсивности ударной волны показали перфорированные пластины [20–27], в том числе и пакеты перфорированных пластин [28]. Проволочные сетки или плетеные материалы также могут быть эффективными для ослабления ударной волны [29–31]. В работе [30] показано, что при взаимодействии с перфорированной



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда и фотография песчаной перегородки. #1 – #8 — датчики давления; НРС — камера высокого давления; LPC — камера низкого давления.

перегородкой амплитуда отраженной ударной волны может снижаться в 2–5 раз. В работе [32] рассматривалось взаимодействие ударной волны с каплями пузырьковой жидкости. Ослабление отраженной ударной волны может быть достигнуто применением полиуретана [33] или применением многослойных перегородок с зернистым наполнением [34]. Применение ударной трубы [35] для изучения воздействия ударных волн с постоянным профилем давления является удобным инструментом для изучения процессов ослабления интенсивности ударных волн.

Анализируя приведенный обзор, можно сделать заключение о том, что большинство работ посвящены ослаблению проходящей ударной волны, а не отраженной, как это показано в обзоре [36]. Однако распространение ударной волны непосредственно в горючей смеси и ее отражение от средств защиты как раз может привести к локальному многократному повышению температуры. Как показано в работе [37], при отражении ударной волны от разрушаемой перегородки возможно самовоспламенение горючей смеси.

В настоящей работе рассматривалось взаимодействие ударной волны с разрушаемой песчаной перегородкой для чисел Маха, при которых самовоспламенение в водородно-воздушной смеси не возникало. Это позволяло исключить влияние дополнительного повышения давления, которое могло вносить нерасчетные поправки в результаты измерений. Цель настоящей работы заключалась в получении значений коэффициентов

ослабления отраженной и проходящей ударных волн, которые определяются как отношения давления на их фронте к давлению на фронте ударной волны, взаимодействующей с разрушаемой песчаной перегородкой.

## 1. Методика исследования

### 1.1. Экспериментальная установка

В настоящей работе использовалась ударная труба. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Камера высокого давления длиной 2000 мм и внутренним диаметром 50 мм наполнялась гелием. Камера низкого давления общей длиной 3942 мм и прямоугольным внутренним сечением 40 × 40 мм наполнялась исследуемой водородно-воздушной смесью. Камеры разделялись алюминиевой или медной диафрагмой различной толщины: 80, 100, 150  $\mu\text{m}$  для алюминиевых диафрагм и 100, 120  $\mu\text{m}$  для медных. При разрыве диафрагмы с насечками в камере низкого давления происходило формирование ударной волны.

Песчаная перегородка изготавливалась из кварцевого песка со связующим компонентом на основе синей глины в массовом соотношении песок:глина:вода = 15:1:2. Использовался песок с размером гранул 0,1–0,4 мм. На рис. 1 приведена фотография песчаной перегородки. Поперечные размеры перегородки составляли в среднем 38,5 × 38,5 мм. Таким образом, между стенками камеры низкого давления

и гранями песчаной перегородки были зазоры. Зазоры обеспечивали беспрепятственное течение водородно-воздушной смеси или воздуха при наполнении камеры или при ее откачке. Песчаная перегородка ставилась вертикально на нижнюю стенку диагностической секции камеры низкого давления. Толщина перегородки в среднем составляла 2.6 мм, масса — 4.5 г. Во избежание падения перегородки при вакуумировании и наполнении она фиксировалась в верхней части проволоочной скобой толщиной 700 мкм и длиной 2 мм, которая отлетала вместе с перегородкой при взаимодействии с ударной волной. Перегородка размещалась в камере низкого давления на расстоянии 8 мм от датчика давления #4 и на расстоянии 537 мм от закрытого конца камеры низкого давления. Такая длина позволяла пренебрегать влиянием ударных волн, отраженных от закрытого конца, на динамику разрушения перегородки.

Распространение падающей, отраженной и проходящих ударных волн регистрировалось пьезоэлектрическими датчиками давления РСВ 111А и 113В. Датчики давления #1 – #4 регистрировали падающую ударную волну и отраженную от песчаной перегородки ударную волну. Датчики давления #5 – #8 регистрировали прошедшую через перегородку ударную волну. Погрешность определения числа Маха не превышала 3%.

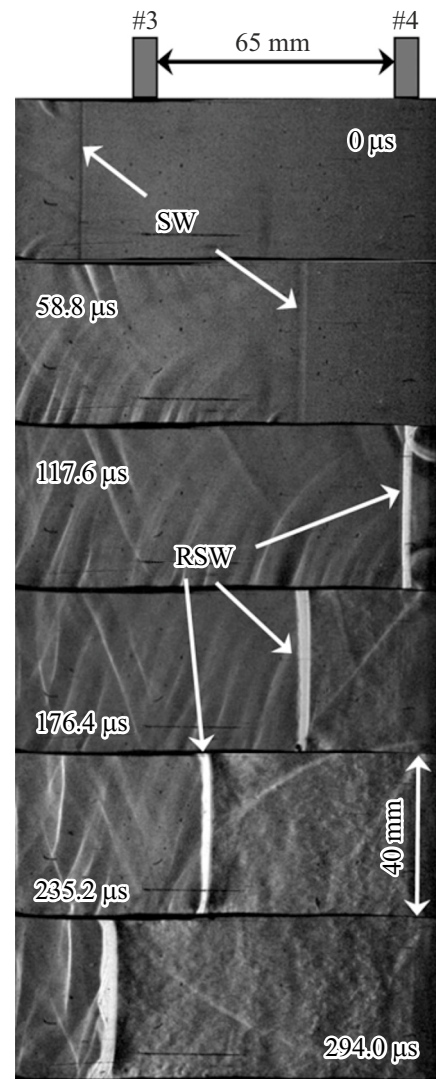
Высокоскоростная цифровая камера Phantom Veo 710 и теневой прибор ИАБ-451 использовались для регистрации ударных, отраженных и проходящих ударных волн и динамики перегородки. Использовался нож Фуко. Частота регистрации составляла 68 000–90 000 fps (frames per second) при разрешении 512 × 128 и времени экспозиции 1 мкс. Непрерывная подсветка осуществлялась ксеноновой лампой мощностью 35 W. Использовались стекла из полиметилметакрилата, отличающиеся стойкостью и возможностью восстановления после воздействия гранул песчаной перегородки.

Водородно-воздушная смесь предварительноготавливалась в отдельном сосуде объемом 31 по парциальным давлениям и перемешивалась вентилятором бесщеточного типа. Максимальное давление в сосуде смешения составляло 0.6 МПа. Использовались три смеси с мольным избытком водорода  $\varphi = 0.3, 0.4$  и  $0.5$ . Начальное давление водородно-воздушной смеси в камере низкого давления варьировалось от 10 до 50 кПа. В табл. 1 представлены параметры используемых газовых смесей.

**Таблица 1.** Параметры водородно-воздушных смесей в зависимости от мольного избытка водорода  $\varphi$

$\varphi$	Мольный состав	$\mu$ , g/mol	$c$ , m/s
0.3	$0.3\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 + 1.88\text{N}_2$	26	365
0.4	$0.4\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 + 1.88\text{N}_2$	25	372
0.5	$0.5\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 + 1.88\text{N}_2$	24	380

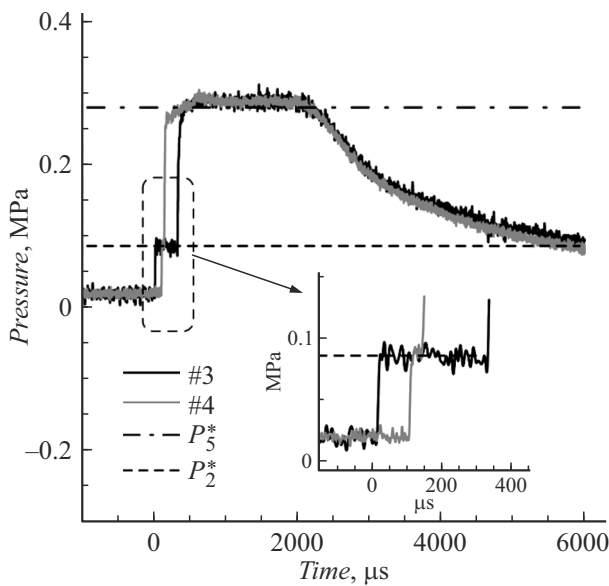
Примечание:  $\mu$  — молярная масса;  $c$  — скорость звука.



**Рис. 2.** Теневые фотографии взаимодействия ударной волны с неподвижным алюминиевым блоком. Состав  $\varphi = 0.3$ ; начальное давление 20 кПа; число Маха  $M_1 = 2.10$ . SW — ударная волна; RSW — отраженная ударная волна.

Для определения временного интервала, при котором давление за отраженной ударной волной не изменяется, проводились предварительные эксперименты, в которых ударная волна взаимодействовала с неподвижным алюминиевым блоком. Блок устанавливался так, чтобы его передняя стенка располагалась в том же положении, что и песчаная перегородка. На рис. 2 приведены типичные теневые фотографии взаимодействия ударной волны с металлической неподвижной стенкой. Ударная волна (SW) распространялась слева направо ( $0 \mu\text{s}; 58.8 \mu\text{s}$ ). На кадрах  $117.6 \mu\text{s}$  и дальше представлено распространение отраженной ударной волны (RSW) справа налево.

На рис. 3 представлены соответствующие осциллограммы давления, полученные в том же эксперименте. Также на рисунке показаны значения давления за падающей ударной волной ( $P_2^*$ ) и за отраженной ударной



**Рис. 3.** Осциллограммы давления при взаимодействии ударной волны с неподвижным алюминиевым блоком. Состав  $\varphi = 0.3$ ; начальное давление 20 кПа; число Маха  $M_1 = 2.10$ ; датчики давления #3 и #4.

волной ( $P_5^*$ ), рассчитанные в одномерном приближении по уравнениям газодинамики:

$$\frac{P_2^*}{P_1} = \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \quad (1)$$

$$\frac{P_5^*}{P_1} = \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \times \frac{(3\gamma - 1)M_1^2 - 2(\gamma - 1)}{(\gamma - 1)M_1^2 + 2}. \quad (2)$$

Здесь  $\gamma = 1.4$  — показатель адиабаты для смеси двухатомных газов,  $M_1$  — число Маха ударной волны. Как видно из рис. 3, период, при котором давление за отраженной ударной волной, регистрируемое датчиками давления #3 и #4, не изменяется, составляет 2 мс. Давление за отраженной и падающей ударными волнами соответствует расчетному значению по уравнениям (1) и (2).

## 1.2. Численное моделирование

Численное моделирование разрушения песчаной перегородки ударной волной проводилось методом гидродинамики сглаженных частиц. Для моделирования использовался контактный метод сглаженных частиц типа Годунова, так называемый Smoothed Particle Hydrodynamics Using Interparticle Contact Algorithms (сокращенно CSPH). Детали метода приведены в работе [38]. Начальный размер SPH-частиц равнялся  $70.7 \mu\text{m}$ . Общее число SPH-частиц в расчетной области составляло 4.16 миллионов.

Моделирование выполнялось в двумерной постановке. Размеры расчетной области составляли 2.5 м по горизонтальной оси  $x$  и 8 мм по вертикальной оси  $y$ . По

**Таблица 2.** Параметры уравнения состояния кварцевого песка и глины в численном моделировании

Компонент	$\rho_0$ , kg/m <sup>3</sup>	$c_0$ , m/s
Песок	2300	5500
Глина	1200	1000

Примечание:  $c_0$  — объемная скорость звука;  $\rho_0$  — начальная плотность.

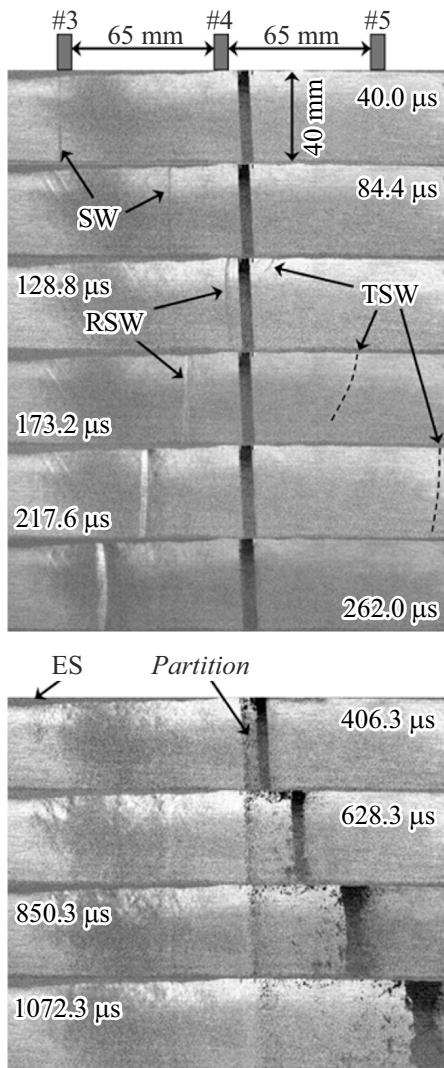
оси  $y$  задавалось периодическое граничное условие. Граничное условие на правой границе расчетной области — неподвижная жесткая стенка. Песчаная перегородка изначально располагалась на расстоянии 0.4 м от правой границы расчетной области. Граничное условие на левой границе области расчета — поршень, движущийся со скоростью, соответствующей скорости за фронтом ударной волны. Состояние газа слева от перегородки соответствует состоянию за фронтом ударной волны с соответствующим числом Маха. Газ считается идеальным с показателем адиабаты  $\gamma = 1.4$ .

Песок задавался случайно упакованными круглыми песчинками с диаметром 0.3 мм. Глина задавалась как случайные вкрапления. Перегородка задавалась таким образом, чтобы ее средняя плотность с учетом пористости была равна  $1170 \text{ kg/m}^3$ . Песок и глина моделировались без использования модели прочности. Считалось, что песчинки взаимодействуют друг с другом без трения.

Для моделирования песка и глины использовалось линейное уравнение состояния  $P = c_0^2(\rho - \rho_0)$ , где  $P$  — давление,  $c_0$  — объемная скорость звука,  $\rho_0$  — начальная плотность,  $\rho$  — текущая плотность. Параметры для уравнения состояния кварцевого песка и глины, используемые в численном моделировании, приведены в табл. 2.

## 2. Результаты экспериментов

В качестве примера на рис. 4 представлены результаты взаимодействия ударной волны (SW) с песчаной перегородкой. Результаты приведены для смеси  $\varphi = 0.3$  при начальном давлении 20 кПа и при числе Маха падающей ударной волны, равном 2.29. После взаимодействия ударной волны с перегородкой формируется отраженная ударная волна (RSW), причем фронт у верхней грани незначительно отстает от фронта на нижней грани ( $128.8 \mu\text{s}$ ). Незначительное искривление фронта ударной волны обусловлено зазором между перегородкой и верхней гранью диагностической секции. Одновременно с отражением ударной волны регистрируется ударная волна (TSW), проходящая через данный зазор между перегородкой и верхней стенкой ( $128.8 \mu\text{s}$ ). Как видно, в момент времени  $217.6 \mu\text{s}$  фронт проходящей ударной волны становится более плоским. На кадрах



**Рис. 4.** Теневые фотографии взаимодействия ударной волны с песчаной перегородкой. Состав  $\varphi = 0.3$ ; начальное давление 20 кПа; число Маха  $M_1 = 2.29$ . SW — ударная волна; RSW — отраженная от перегородки ударная волна; TSW — проходящая ударная волна; ES — тень внешнего уплотнителя.

406.3–1072.3  $\mu\text{s}$  представлен процесс разрушения перегородки на фрагменты.

На рис. 5, *a* представлены соответствующие осциллограммы давления при взаимодействии ударной волны с песчаной перегородкой. Датчики давления #2, #3 и #4 регистрировали падающую и отраженную ударные волны, датчики давления #5, #6 и #7 регистрировали проходящую ударную волну. Вертикальные интервалы между осциллограммами соответствуют расстоянию между датчиками давления. Также на рис. 5 приведено начальное расположение песчаной перегородки и траектория разрушающейся перегородки относительно датчиков давления. На рис. 5, *a* пунктирными линиями представлены траектории движения падающей, отраженной и проходящей ударных волн.

На рис. 5, *b* представлены те же осциллограммы с увеличенным временным масштабом. Стрелками указаны расчетные значения давлений  $P_5^*$  при отражении от неподвижной металлической стенки, рассчитанные по уравнению (2). Как видно из рис. 5, *b*, давление за отраженной ударной волной ниже этого расчетного давления в положении датчиков давления #2, #3 и #4, причем при отдалении от перегородки амплитуда отраженной ударной волны снижается. Амплитуда проходящей ударной волны в несколько раз ниже амплитуды падающей ударной волны. При этом профиль давления имеет переменную величину, что обуславливается переходными процессами при формировании ударной волны при переходе через зазор.

Как видно из рис. 5, траектория перегородки в пределах области регистрации аппроксимируется параболической функцией, что, в общем, соответствует равноускоренному движению. Для рассматриваемого случая параболическое уравнение движения перегородки имеет вид

$$x = 0.54 \cdot 10^5 t^2, \quad (3)$$

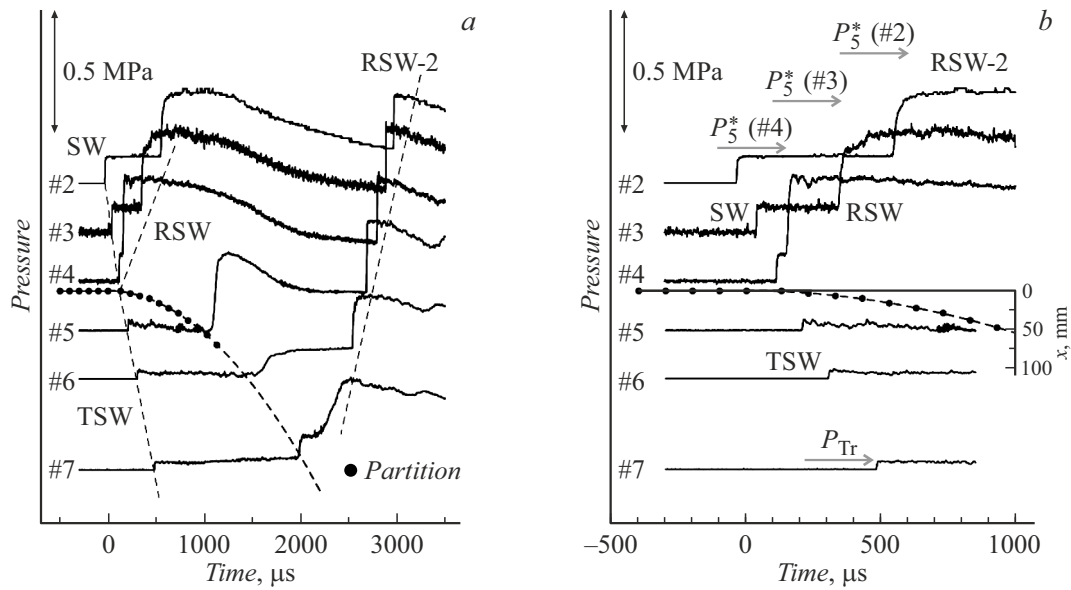
где смещение  $x$  относительного первоначального положения определяется в метрах, а время — в секундах (рис. 5, *b*). Таким образом, ускорение перегородки, определяемое по траектории движения, равно  $1.08 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2$ . При смещении перегородки и в моменты ее прохождения через датчики давления #5, #6 и #7 регистрируется вторичное повышение давления за фронтом проходящей ударной волны. Моменты повышения давления соответствуют предполагаемой параболической аппроксимации (3) движения перегородки.

С другой стороны, ускорение перегородки можно оценить по силе, действующей на перегородку со стороны ударно сжатого газа:

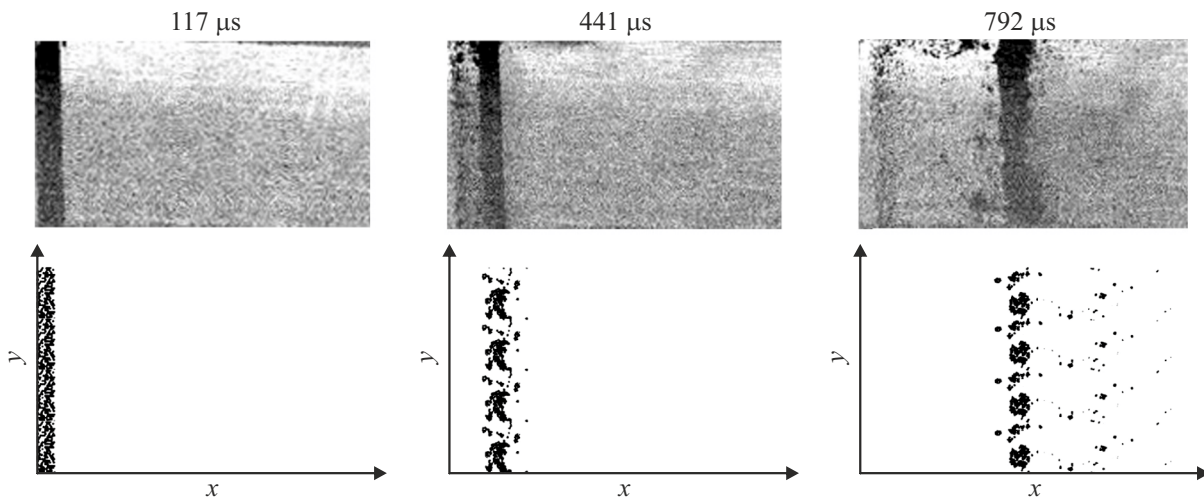
$$a = (P_5 - P_{Tr})S/m, \quad (4)$$

где  $P_5$  — давление за отраженной ударной волной,  $P_{Tr}$  — давление за проходящей ударной волной,  $S$  — площадь перегородки,  $m$  — масса перегородки. Так как скорость газа за отраженной ударной волной считается равной нулю, действием импульса со стороны ударно сжатого газа пренебрегалось. Определение амплитуды давления  $P_{Tr}$  представлено на рис. 5, *b*. Используя данные, представленные на рис. 5, можно определить ускорение по уравнению (4). Оно составило  $a = 1.25 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2$ , что незначительно превышает измеренное значение. Эта разница объясняется тем, что при смещении перегородки и при наличии зазоров между перегородкой и стенками камеры происходит расширение ударно-сжатого газа и соответственно снижение давления. Поэтому давление за отраженной от перегородки ударной волной имеет ниспадающий профиль, и через 2 ms после сжатия давление снижается почти в два раза (рис. 5, *a*).

В интервале 2500–3000  $\mu\text{s}$  (рис. 5, *a*) датчики давления регистрируют отраженную от жесткой стенки ударной трубы ударную волну. Эта отраженная ударная



**Рис. 5.** Осциллограммы давления и траектории перегородки и ударных волн: падающей (SW), проходящей (TSW), отраженной от перегородки (RSW) и от торца ударной трубы (RSW-2). *a* — временной интервал  $-700 - 3500 \mu s$ ; *b* — временной интервал  $-500 - 1000 \mu s$ . Состав  $\varphi = 0.3$ ; начальное давление 20 кПа; число Маха  $M_1 = 2.29$ ;  $P_5^*$  — расчетное значение давления за отраженной ударной волной в положении датчиков давления #2, #3 и #4.



**Рис. 6.** Эволюция перегородки: эксперимент (сверху) и моделирование (снизу).

волна, которая также имеет ниспадающий профиль, приходит к первоначальному расположению перегородки через 2.5 ms после воздействия падающей ударной волны.

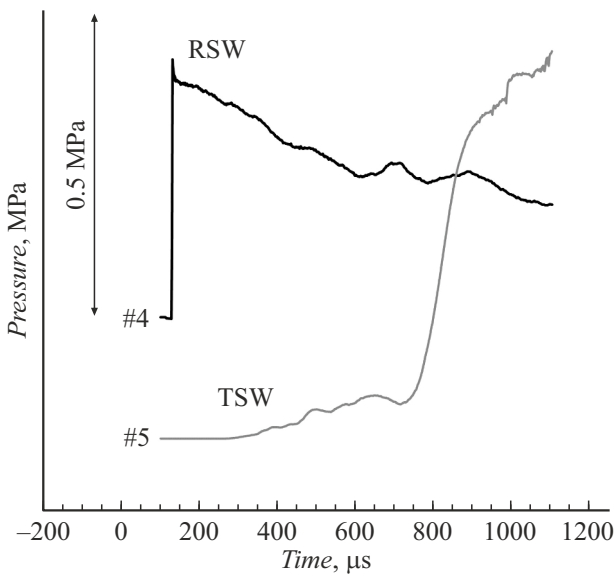
### 3. Результаты численного моделирования

Численное моделирование динамики разлета песчаной перегородки проведено при числе Маха ударной волны  $M_1 = 2.29$  в соответствии с заданными условиями для экспериментальных данных, представленных на рис. 4 и 5. На рис. 6 снизу показаны результаты численного

моделирования эволюции перегородки. Как видно из рис. 6, незначительная часть перегородки сносится потоком вперед вслед за проходящей через зазоры ударной волной. На рис. 6 сверху для сравнения представлены соответствующие теневые фотографии, полученные экспериментально. Видно, что моделирование хорошо воспроизводит скорость движения песчаной преграды и ее разрушение. По результатам моделирования приближенное параболическое уравнение движения перегородки имеет вид:

$$x = 0.5 \cdot 10^5 t^2, \tag{5}$$

где смещение  $x$  определяется также относительно первоначального положения в метрах, а время — в секундах



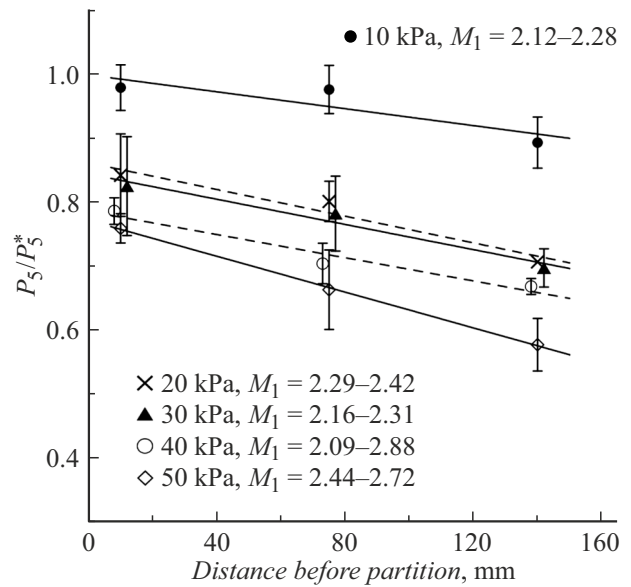
**Рис. 7.** Зависимости давления от времени на датчиках #4 (перед перегородкой) и #5 (за перегородкой), численное моделирование. RSW — отраженная от перегородки ударная волна; TSW — проходящая ударная волна.

от момента прихода ударной волны на перегородку. Таким образом, ускорение перегородки, определяемое при численном моделировании по траектории движения (5), равно  $10^5 \text{ m/s}^2$ , что сравнимо с измеренным экспериментально значением.

На рис. 7 показаны полученные в численном моделировании зависимости давления от времени на датчиках #4 (перед перегородкой) и #5 (за перегородкой). Видно, что результаты моделирования согласуются с экспериментальными наблюдениями, представленными на рис. 5 для тех же датчиков давления #4 и #5.

#### 4. Обобщающие данные

На рис. 8 приведены значения отношения давления на фронте отраженной от песчаной перегородки ударной волны  $P_5$  к расчетному значению  $P_5^*$  при отражении от твердой стенки в зависимости от удаления фронта отраженной ударной волны от перегородки. В качестве параметра выбрано начальное давление смеси в камере низкого давления. Результаты объединены для всех составов, потому что деление результатов по составам смеси не привело к существенному отличию в численных значениях. Диапазоны чисел Маха для каждого начального давления приведены в табл. 3. Как видно из рис. 8, максимальное ослабление отраженной ударной волны достигалось при более высоком начальном давлении. Так, например, на расстоянии 8 мм от перегородки ослабление отраженной ударной волны при начальном давлении 10 кПа практически не регистрировалось, в то время как при начальном давлении 50 кПа ослабление равнялось 0.75. При начальных давлениях 20–40 кПа



**Рис. 8.** Отношение давления на фронте отраженной от песчаной перегородки ударной волны  $P_5$  к расчетному значению  $P_5^*$  при отражении от твердой стенки.

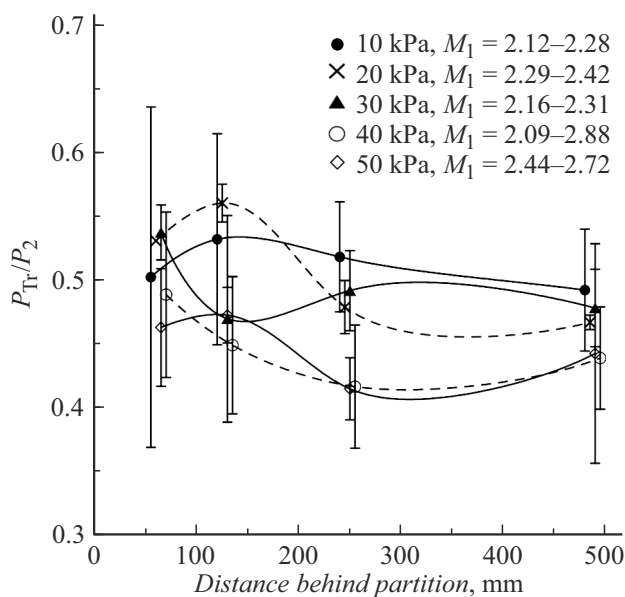
**Таблица 3.** Числа Маха ударной волны  $M_1$  и линейные зависимости отношения давления  $P_5/P_5^*$  за отраженной ударной волной от расстояния  $x$  до перегородки

Начальное давление	$M_1$	$P_5/P_5^*$
10 kPa (●)	2.12–2.28	$1.00 - 0.00066 \text{ mm}^{-1} \cdot x$
20 kPa (×)	2.29–2.42	$0.86 - 0.00104 \text{ mm}^{-1} \cdot x$
30 kPa (▲)	2.16–2.31	$0.84 - 0.00105 \text{ mm}^{-1} \cdot x$
40 kPa (○)	2.09–2.88	$0.80 - 0.00110 \text{ mm}^{-1} \cdot x$
50 kPa (◇)	2.44–2.72	$0.77 - 0.00140 \text{ mm}^{-1} \cdot x$

ослабление отраженной ударной волны варьировалось в диапазоне 0.90–0.75 соответственно.

При удалении на расстояние 73 мм от песчаной перегородки амплитуда давления на фронте отраженной ударной волны снижалась до 0.85–0.60 по отношению к расчетному значению при начальном давлении 20–50 кПа. При начальном давлении 10 кПа давление за отраженной ударной волной по-прежнему практически не изменялось. Снижение давления до 0.9 от расчетного значения регистрировалось только на расстоянии 138 мм от песчаной перегородки. Также на расстоянии 138 мм от перегородки снижение давления составляло уже 0.75–0.55 при начальных давлениях 20–50 кПа.

Как видно из рис. 8, полученные зависимости ослабления давления от расстояния до перегородки имеют линейный характер на дистанции до четырех калибров ударной трубы. В табл. 3 приведены линейные аппроксимации соответствующих отношений давления



**Рис. 9.** Отношение давления на фронте проходящей через перегородку ударной волны  $P_{Tr}$  к давлению  $P_2$  на фронте падающей ударной волны.

за отраженной ударной волной в зависимости от расстояния до перегородки. При этом коэффициент перед переменной  $x$ , который соответствует наклону прямой на рис. 8, тем больше, чем больше начальное давление:  $0.00066 \text{ mm}^{-1}$  при начальном давлении 10 кПа,  $0.00140 \text{ mm}^{-1}$  при начальном давлении 50 кПа.

Помимо частичного истечения ударно сжатого газа через зазоры между песчаной перегородкой и стенками камеры низкого давления, такое влияние начального давления на ослабление интенсивности отраженной ударной волны может обуславливаться смещением и разрушением песчаной перегородки. Это смещение определяется действием со стороны ударно сжатого газа, которое определяется как произведение давления на площадь перегородки, как это представлено в уравнении (4).

На рис. 9 приведены значения коэффициента ослабления проходящей ударной в зависимости от удаления ее фронта от перегородки. Диапазон чисел Маха  $M_1$  ударных волн также представлен в табл. 3. Как видно из рис. 9, давление на фронте проходящей ударной волны изменяется немонотонно. Такое изменение объясняется тем, что распространение проходящей ударной волны представляет собой многостадийный процесс. Сначала формируется сферическая ударная волна при истечении ударно-сжатого газа через зазоры между перегородкой и стенками камеры. Затем после многократных отражений от стенок камеры низкого давления сферическая ударная волна переходит в плоскую ударную волну. В зависимости от динамики разрушения перегородки, особенно по ее периметру, давление на фронте ударной волны может либо снижаться (сферическая ударная волна не успела перейти в плоскую ударную волну), либо увеличиваться

(фронт ударной волны принимает плоскую форму). Кроме того, согласно представленным на рис. 9 данным, на расстоянии 122–242 mm от перегородки проходящая ударная волна (0.45–0.62) при более низком начальном давлении 10–20 кПа ослабевает меньше ударной волны (0.37–0.50) при более высоком начальном давлении 40–50 кПа. Это различие в ослаблении проходящей ударной волны может быть обусловлено вязкими эффектами в зазорах между перегородкой и стенками камеры низкого давления на начальной стадии формирования проходящей ударной волны до момента частичного или полного разрушения песчаной перегородки. На расстоянии 482 mm за перегородкой различие в давлениях на фронте проходящей ударной волны становится минимальным, так что разброс средних значений равен 10%. В отличие от отраженной ударной волны, полученных данных недостаточно для приведения формулы ослабления проходящей ударной волны.

## Заключение

На основе приведенных экспериментальных результатов можно сделать вывод о том, что использование разрушаемой песчаной перегородки приводит к ослаблению как проходящей, так и отраженной ударной волны. В диапазоне чисел Маха  $M_1 = 2.09 - 2.72$  падающей ударной волны коэффициенты ослабления отраженной ударной волны варьировались от 0.75 до 1 в зависимости от начального давления. При удалении от перегородки ослабление составляло уже 0.6–0.9.

Действие разрушаемой перегородки с целью снижения давления на фронте отраженной ударной волны тем эффективнее, чем выше начальное давление газовой смеси. Если при начальном давлении 10 кПа отношение давления на фронте отраженной ударной волны к расчетному значению при отражении от жесткой стенки не было ниже 0.9, то при начальном давлении 50 кПа оно составляло уже 0.6. Это влияние начального давления связано с большей плотностью газа, воздействующего на перегородку и приводящего ее в движение. Это движение приводит к разгрузке ударно сжатого газа, а значит и к снижению давления со стороны падающей ударной волны.

Использование контактного метода сглаженных частиц позволяет с удовлетворительной точностью моделировать процесс разрушения песчаной перегородки под воздействием падающей на нее ударной волны. Как показали результаты расчетов, динамика перегородки совпадает с динамикой, определенной экспериментально теньвым методом.

Эксперименты показали, что формирование проходящей ударной волны имеет многостадийный характер, который объясняет немонотонность изменения вдоль оси канала давления на ее фронте, а среднее значение коэффициента ослабления давления при меньших



начальных давлениях 10–20 кПа выше, чем при более высоких начальных давлениях 40–50 кПа.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-21-00251 (<https://rscf.ru/project/23-21-00251/>).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A.G. John, K.D. Gardner, F.K. Lu, V.V. Volodin, S.V. Golovastov, V.V. Golub. In: Proc. 25th ISSW (Bangalore, India, 2005), [https://arc.uta.edu/publications/cp\\_files/10044.pdf](https://arc.uta.edu/publications/cp_files/10044.pdf)
- [2] X.M. Li, M. Wang, X. Guo, Y.J. Li, Y.C. Peng. Appl. Mech. Mater., **556**, 3187 (2014). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.556-562.3187
- [3] H. Lv, Z. Wang, J. Li. Int. J. Multiphase Flow., **89**, 255 (2017). DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.07.019
- [4] A.D. Resnyansky, N.K. Bourne. AIP Conf. Proc., **706** (1), 1474 (2004). DOI: 10.1063/1.1780517
- [5] M. Arlery, M. Gardou, J.M. Fleureau, C. Mariotti. Int. J. Impact Eng., **37** (1), 1 (2010). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.07.009
- [6] C.H. Braithwaite, J.I. Perry, N.E. Taylor, A.P. Jardine. Appl. Phys. Lett., **103** (15), 154103 (2013). DOI: 10.1063/1.4824764
- [7] S.K. Dwivedi, L. Pei, R. Teeter. J. Appl. Phys., **117** (8), 085902 (2015). DOI: 10.1063/1.4913479
- [8] J.W. LaJeunesse, M. Hankin, G.B. Kennedy, D.K. Spaulding, M.G. Schumaker, C.H. Neel, J.P. Borg, S.T. Stewart, N.N. Thadhani. J. Appl. Phys., **122** (1), 015901 (2017). DOI: 10.1063/1.4990625
- [9] D.J. Chapman, K. Tsembeles, W.G. Proud. AIP Conf. Proc., **845** (1), 1445 (2006). DOI: 10.1063/1.2263596
- [10] A.D. Resnyansky, S.A. Weckert. J. Phys.: Conf. Series, **500** (19), 192016 (2014). DOI: 10.1088/1742-6596/500/19/192016
- [11] Y. Sugiyama, M. Izumo, H. Ando, A. Matsuo. Shock Waves, **28**, 627 (2018). DOI: 10.1007/s00193-018-0813-5
- [12] B. Fletcher. J. Physics D: Appl. Phys., **9** (2), 197 (1976). DOI: 10.1088/0022-3727/9/2/009
- [13] R.T. Paton, B.W. Skews. In: Proc. 31st ISSW 2: Applications, **31**, 673 (2019). DOI: 10.1007/978-3-319-91017-8\_84
- [14] L. Guan, J. Zhang, J. Li, Y. Ding, Y. Wang, Q. Lu. Int. J. Impact Eng., **188**, 104935 (2024). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104935
- [15] С.И. Герасимов, Ю.Ф. Травов, А.Г. Иоилев, В.В. Писецкий, Н.Н. Травова, А.П. Калмыков, С.А. Капинос, Н.В. Лапичев, Ю.И. Файков. ЖТФ, **92** (3), 392 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52134.275-21 [S.I. Gerasimov, Yu.F. Travov, A.G. Ioilev, V.V. Pisetsky, N.N. Travova, A.P. Kalmykov, S.A. Kapinos, N.V. Lapichev, Yu.I. Faikov. Tech. Phys., **3**, 300 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.03.53261.275-21]
- [16] A. Britan, T. Elperin, O. Igra, J.P. Jiang. AIP Conf. Proc., **370** (1), 971 (1996). DOI: 10.1063/1.50571
- [17] A. Britan, G. Ben-Dor, O. Igra, H. Shapiro. Int. J. Multiphase Flow, **27** (4), 617 (2001). DOI: 10.1016/S0301-9322(00)00048-3
- [18] О.А. Мирова, А.Л. Котельников, В.В. Голуб, Т.В. Баженова, А.Н. Паршиков. ТВТ, **54** (5), 761 (2016). DOI: 10.7868/S0040364416050197. [O.A. Mirova, A.L. Kotelnikov, V.V. Golub, T.V. Bazhenova, A.N. Parshikov. High Temp., **54**, 716 (2016). DOI: 10.1134/S0018151X16050199]
- [19] О.А. Мирова, А.Л. Котельников, В.В. Голуб, Т.В. Баженова. ТВТ, **53** (1), 145 (2015). DOI: 10.7868/S0040364415010172. [O.A. Mirova, A.L. Kotelnikov, V.V. Golub, T.V. Bazhenova. High Temp., **53**, 155 (2015). DOI: 10.1134/S0018151X15010174]
- [20] I.I. Anik'ev, M.I. Mikhailova, E.A. Sushchenko. Int. Appl. Mech., **42**, 1307 (2006). DOI: 10.1007/s10778-006-0202-0
- [21] A. Britan, A.V. Karpov, E.I. Vasilev, O. Igra, G. Ben-Dor, E. Shapiro. J. Fluids Eng. **126** (3), 399 (2004). DOI: 10.1115/1.1758264
- [22] C.V.P. Kumar, C.H. Reddy, L.R. Sai, K.D. Kumar, S.R. Nagaraja. IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng., **225**, 012059 (2017). DOI: 10.1088/1757-899X/225/1/012059
- [23] G.S. Langdon, G.N. Nurick, N.J. Du. Plessis. Eng. Structur., **33** (12), 3537 (2011). DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.07.017
- [24] H. Onodera. Exp. Fluids, **24** (3), 238 (1998). DOI: 10.1007/s003480050170
- [25] T. Schunck, D. Eckenfels. SN Appl. Sci., **3**, 1 (2021). DOI: 10.1007/s42452-021-04720-3
- [26] O. Ram, G. Ben-Dor, O. Sadot. Exp. Therm. Fluid Sci., **92**, 211 (2018). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.11.014
- [27] B. Skews. Exp. Fluids, **39**, 875 (2005). DOI: 10.1007/s00348-005-0023-7
- [28] S. Golovastov, A. Mikushkin, A. Mikushkina, Y. Zhilin. Exp. Fluids, **63** (6), 97 (2022). DOI: 10.1007/s00348-022-03451-4
- [29] Y. Andreopoulos, S. Xanthos, K. Subramaniam. Shock Waves, **16**, 455 (2007). DOI: 10.1007/s00193-007-0082-1
- [30] T. Schunck, M. Bastide, D. Eckenfels, J.F. Legendre. Shock Waves, **31** (6), 511 (2021). DOI: 10.1007/s00193-021-01004-y
- [31] W. Xiao, M. Andrae, N. Gebbeken. Eng. Structur., **213**, 110574 (2020). DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110574
- [32] В.С. Суров. ЖТФ, **71** (6), 17 (2001). [V.S. Surov. Tech. Phys., **46** (6), 662 (2001). DOI: 10.1134/1.1379630.]
- [33] Г.Ю. Бивол, В.В. Володин, Ю.В. Жилин, В.М. Бочарников. ТВТ, **57** (1), 146 (2019). DOI: 10.1134/S0040364419010022 [G.Y. Bivol, V.V. Volodin, Yu.V. Zhilin, V.M. Bocharnikov. High Temp., **57** (1), 130 (2019). DOI: 10.1134/S0018151X19010024]
- [34] M. Rahmani, A.N. Oskouei, A.M. Petrudi. Defence Tech., **17** (5), 1660 (2021). DOI: 10.1016/j.dt.2020.09.004
- [35] И.А. Знаменская, Е.А. Карнозова. ЖТФ, **94** (6), 849 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58125.45-24 [I.A. Znamenskaya, E.A. Karnozova. Tech. Phys., **69** (6), 791 (2024). DOI: 10.61011/TP.2024.06.58820.45-24]
- [36] O. Igra, J. Falcovitz, L. Houas, G. Jourdan. Progr. Aerospace Sci., **58**, 1 (2013). DOI: 10.1016/j.paerosci.2012.08.003
- [37] С.В. Головастов, Г.Ю. Бивол, Ф.С. Кулешов, В.В. Голуб. Письма в ЖТФ, **50** (5), 43 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.05.57185.19763 [S.V. Golovastov, G.Yu. Bivol, F.S. Kuleshov, V.V. Golub. Tech. Phys. Lett., **50** (3), 41 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.05.57185.19763]
- [38] A.N. Parshikov, S.A. Medin. J. Comp. Phys., **180**, 1 (2002). DOI: 10.1006/jcph.2002.7099