

УДК 534.222.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ОТРАЖЕННЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

© 2019 г. Г. Ю. Бивол¹, *, В. В. Володин¹, Ю. В. Жилин¹, В. М. Бочарников¹¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: grigorij-bivol@yandex.ru

Поступило в редакцию 20.07.2017 г.

После доработки 19.06.2018 г.

Принято к печати 05.06.2018 г.

В работе изучалось нормальное отражение слабых ударных волн от дисперсных материалов нескольких типов: стальная шерсть, поролон с различной пористостью и их комбинации. Число Маха падающих ударных волн составляло 1.15. Были получены зависимости амплитуды и импульса отраженных ударных волн от таких параметров пористого материала, как толщина, пористость, наличие открытых пор. Выяснено, что пористые материалы, использованные в экспериментах, заметно ослабляют отраженную ударную волну (более 50%) и сглаживают ее фронт.

DOI: 10.1134/S0040364419010022

ВВЕДЕНИЕ

Ослабление ударных волн в замкнутых пространствах является важной задачей обеспечения безопасности. Во многих работах отмечена эффективность использования дисперсных материалов для ослабления ударных волн [1–5]. Большинство работ по изучению ударных волн, падающих на пористый материал, посвящено снижению перепада давления на стенке за слоем пористого материала. В [6] показано, что наличие или отсутствие воздушного промежутка между пористым экраном и жесткой стенкой заметно влияет на профиль и амплитуду ударной волны. Изучению волн, отраженных от пористых материалов, посвящено несколько работ. В [7] изучено отражение ударных волн от пористого материала, прикрепленного к жесткой стенке. Значение числа Маха падающих ударных волн было менее 1.4. В качестве пористого материала использовался полиэстер плотностью от 14 до 38 кг/м³. В работе обнаружено, что после основной отраженной волны наблюдается медленный рост давления, а суммарное давление превышает давление отраженной ударной волны в случае отражения от жесткой стенки. На основе результатов работы [7] в [8, 9] выполнены расчеты. Выяснено, что хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными наблюдалось при числе Маха падающей волны более 1.25, а заметно худшее – от 1.08 до 1.18 (слабые волны). В [10] изучено влияние параметров пористого материала на распространение и отражение ударной волны с числом Маха, равным 1.21–1.68. Обнаружено, что на характер отраженной ударной волны влияет

только плотность пористого материала и скорость падающей волны. Влияние жесткой алюминиевой пены на отражение ударной волны изучено в [11]. Получено, что пена с максимальной (90%) пористостью приводила к наименьшему усилению волны.

Целью данной работы является определение параметров ослабления слабых ударных волн в пористых материалах, а также выяснение влияния пористости материала на процесс ослабления ударных волн.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились в ударной трубе квадратного сечения со стороной 72 мм, которая состояла из камеры высокого давления и камеры низкого давления. Схема установки изображена на рис. 1. Длина камеры высокого давления составляла 1600 мм, низкого давления – 6000 мм. Измерительная секция находилась в камере низкого давления, которая изначально заполнялась

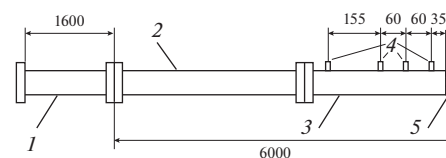


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – секция высокого давления, 2 – секция низкого давления, 3 – секция диагностики с прозрачными стенками, 4 – пьезоэлектрические датчики давления, 5 – пористый материал на торце ударной трубы.

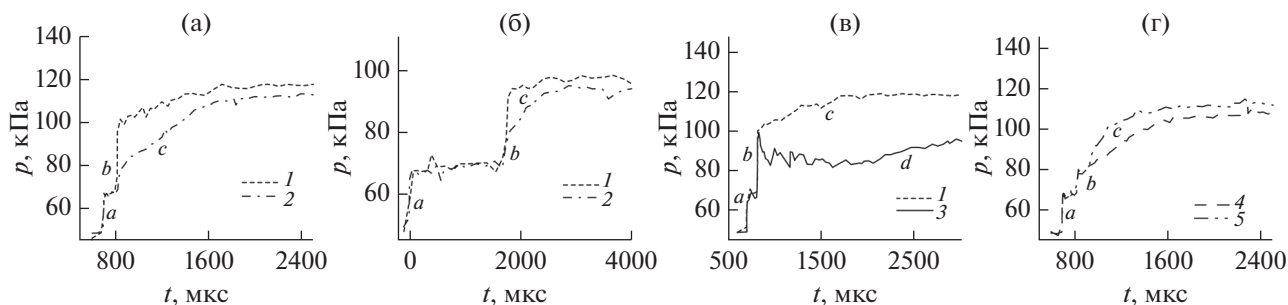


Рис. 2. Осциллограммы давления ударных волн, отраженных от различных материалов на торце: 1 – жесткая стенка, 2 – поролон-95 толщиной 40 мм, 3 – поролон-95 толщиной 40 мм с полиэтиленовым покрытием, 4 – поролон-98 толщиной 40 мм, 5 – поролон-98 толщиной 20 мм.

воздухом при давлении 50 кПа. Ударная волна генерировалась с помощью разрыва диафрагмы между камерами низкого и высокого давления. Камера высокого давления была достаточно длинной, чтобы создавать ударную волну с прямоугольным профилем без спада давления в течение 1 мс. Подобный профиль характерен для взрывной волны на большом расстоянии от эпицентра взрыва. На торце камеры низкого давления располагалось пористое покрытие из поролона либо стальной шерсти толщиной 20 и 40 мм. Пористость поролона составляла 95 и 98%, пористость стальной шерсти – 99%. В случае покрытий толщиной 20 мм за покрытием устанавливалась стальная пластина толщиной 20 мм для сохранения расстояния от поверхности пористого материала до датчиков давления. В отдельных экспериментах поверхность пористого материала покрывалась полиэтиленовой пленкой толщиной 50 мкм. Диагностика проводилась с помощью четырех пьезоэлектрических датчиков давления, расположенных в измерительной секции, теневого прибора ИАБ-451 и скоростной камеры “Ви-деоспринт”.

Датчики давления были установлены на расстояниях 35, 95, 155 и 310 мм от торца ударной трубы. С помощью датчиков давления измерялось давление падающей и отраженной ударных волн, а по времени прихода фронта волны измерялась ее скорость. В данной работе скорость падающей ударной волны соответствовала числу Маха 1.15. Погрешность измерения скорости волны составила 1%, погрешность давления – 2%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 изображены осциллограммы давления с датчиков, расположенных на расстоянии 310 мм (рис. 2б) и 35 мм (рис. 2а, 2в и 2г) от торца ударной трубы. Падающая ударная волна (участки а) имела прямоугольную форму без заметного спада давления за счет использования длинной камеры высокого давления. Из осциллограмм,

представленных на рис. 2а, видно, что амплитуда волны, отраженной от пористого материала (кривые 2), составила около 12 кПа относительно падающей волны, после чего наблюдается медленный рост давления (участок с). В случае жесткой стенки амплитуда отраженной волны составляла более 30 кПа. На рис. 2б приведено сравнение амплитуды отраженной ударной волны на расстоянии 310 мм от торца. Амплитуда отраженной волны относительно падающей составляла 10 кПа для поролона и 25 кПа для жесткой стенки. Для поролона толщиной 20 мм (рис. 2г) рост давления происходит в течение 400 мкс на датчике, расположенном на расстоянии 35 мм от торца ударной трубы. Для поролона толщиной 40 мм рост давления происходит в течение 750 мкс на том же датчике давления. Разница в амплитуде фронта и скорости нарастания давления проявляется благодаря фильтрации газа, сжатого ударной волной, в поры в случае, когда они открыты. При использовании пористых материалов с открытыми порами на стенке скорость нарастания давления во фронте отраженной волны оказывается ниже вследствие того, что падающая волна частично отражается от волокон пористого материала, расположенных на разной глубине. Последовательное частичное отражение волн сжатия при распространении волны в глубь пористого слоя приводит к отражению ударной волны (а) в виде набора последовательных волн сжатия (b–c). После фазы медленного роста (с) отраженной от пористой стенки волны результирующее давление оказывается на 5–10% ниже, чем у волны, отраженной от жесткой стенки.

Для определения роли открытых пор в ряде экспериментов поверхность пористого материала покрывалась полиэтиленовой пленкой. На рис. 2в показано сравнение осциллограмм давления в случае отражения ударной волны от жесткой стенки и от поролона, покрытого полиэтиленовой пленкой. Во втором случае амплитуда фронта отраженной ударной волны (b) оказывается равной амплитуде волны при использовании жест-

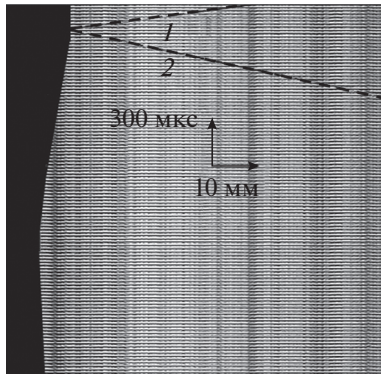


Рис. 3. Диаграмма движения падающей (1) и отраженной (2) ударных волн, а также движение пористого материала – поролон-95 толщиной 40 мм, покрытого полиэтиленовой пленкой.

кой стенки (1). Однако после прихода фронта отраженной ударной волны (b) наблюдается быстрый спад давления, в отличие от использования жесткой стенки или поролон без полиэтиленового покрытия.

Временная развертка движения поверхности поролон, полученная с помощью теневого прибора ИАБ-451 и скоростной камеры “Видеоспринт”, показана на рис. 3. Видно движение падающей отраженной волны 1 и отраженной ударной волны 2 (соответствуют участкам a и b на рис. 2). Движение поверхности пористого материала, покрытого полиэтиленовой пленкой, начинается через 60 мкс после отражения ударной волны от поверхности. На протяжении следующих 800 мкс наблюдается медленное сжатие пористого слоя. Далее поролон находится в покое 400 мкс, после чего начинает движение в обратном направлении, что соответствует моменту выхода из пористого материала слабых волн сжатия, отраженных от жесткой стенки позади пористого материала. Через такое же время на осциллограммах давления в случае поролон, покрытого по-

лиэтиленовой пленкой (рис. 2в), наблюдается начало медленного роста давления (d). Отсюда можно сделать вывод, что медленный рост давления после отраженной волны в случае использования полиэтиленового покрытия на поролоне соответствует слабым волнам сжатия, вызванным движением пористого материала.

Из рис. 2 видно, что амплитуда отраженной волны (b) относительно падающей (a) ниже при использовании пористых материалов на стенке. На основе осциллограмм давления рассчитаны значения импульса ударной волны от момента прихода отраженной волны (b) (таблица). Время интегрирования составило 1 мс: за это время во всех экспериментах медленный рост давления успел закончиться. Из таблицы видно, что использование пористого покрытия на стенке приводит к уменьшению импульса отраженной волны. В случае многослойного покрытия поролон–полиэтилен импульс отраженной ударной волны уменьшается на 20% по сравнению с твердой стенкой.

Использование стальной шерсти, обладающей высокой пористостью по сравнению с поролоном (99% против 98% и 95% у поролон) не привело к более эффективному ослаблению отраженных ударных волн. Отсюда можно сделать вывод о том, что для слабой ударной волны с числом Маха 1.15 такие параметры материала, как пористость, плотность и упругость, не оказывают заметного влияния на характер отраженной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально рассматривалось отражение слабых ударных волн от торца ударной трубы с дисперсным материалом на нем. Установлено, что интенсивность отраженной ударной волны может падать более чем на 50% при использовании дисперсных материалов по сравнению с отражением от жесткой стенки. В отличие от работ с более сильными ударными волнами, где импульс отраженной ударной волны за дис-

Параметры материалов и значения импульса давления на торце ударной трубы

Материал	Пористость, %	Плотность, кг/м ³	Толщина, мм	Импульс отраженной ударной волны, Па с
Поролон-95	95	19	20	104.6
			40	98.9
			40 + полиэтилен	87.2
Поролон-98	98	30	20	103
			40	96
Стальная шерсть	99	70	20	104.6
			40	102.6
Сталь	—	7800	—	111.2

персными материалами увеличивался, в данной работе импульс отраженной ударной волны за дисперсными материалами снижался на 6–20%. Также в случае использования дисперсного покрытия вместо резкого фронта отраженной ударной волны наблюдается медленный рост давления в течение 120–900 мкс. Обнаружено, что эффект ослабления отраженной волны растет с увеличением толщины дисперсного материала, а использование двухслойного покрытия из поролонa, закрытого полиэтиленовой пленкой, приводит к уменьшению импульса отраженной ударной волны на 20% по сравнению с твердой стенкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goel M.D., Altenhofer Ph., Matsagar V.A., Gupta A.K., Mundt Ch., Marburg S.* Interaction of a Shock Wave with a Closed Cell Aluminum Metal Foam // *Combust. Exp. Shock Waves*. 2015. V. 51. № 3. P. 373.
2. *Kitagawa K., Yasuhara M., Takayama K.* Attenuation of Shock Waves Propagating in Polyurethane Foams // *Shock Waves*. 2006. V. 15. № 6. P. 437.
3. *Мирова О.А., Котельников А.Л., Голуб В.В., Баженова Т.В.* Многократные отражения ударных волн при взрыве в замкнутом объеме с защищенными экранами стенками // *ТВТ*. 2017. Т. 55. № 2. С. 324.
4. *Мирова О.А., Котельников А.Л., Голуб В.В., Баженова Т.В.* Влияние защитного экрана на уменьшение давления при взаимодействии ударной волны со стенкой // *ТВТ*. 2016. Т. 54. № 6. С. 905.
5. *Petel O.E., Ouellet S., Higgins A.J., Frost D.L.* The Elastic-plastic Behaviour of Foam under Shock Loading // *Shock Waves*. 2013. V. 23. № 1. P. 55.
6. *Gel'Fand B.E., Gubanov A.V., Timofeev E.I.* Interaction of Shock Waves in Air with a Porous Screen // *Fluid Dynamics*. 1983. V. 18. № 4. P. 561.
7. *Skews B.W.* The Reflected Pressure Field in the Interaction of Weak Shock Waves with a Compressible Foam // *Shock Waves*. 1991. V. 1. № 3. P. 205.
8. *Baer M.R.* A Numerical Study of Shock Wave Reflections on Low Density Foam // *Shock Waves*. 1992. V. 2. № 2. V. P. 121.
9. *Olim M., van Dongen M.E.H., Kitamura T., Takayama K.* Numerical Simulation of the Propagation of Shock Waves in Compressible Open-cell Porous Foams // *Int. J. Multiphase Flow*. 1994. V. 20. № 3. P. 557.
10. *Seitz M.W., Skews B.W.* Effect of Compressible Foam Properties on Pressure Amplification During Shock Wave Impact // *Shock Waves*. 2006. V. 15. № 3. P. 177.
11. *Kazemi-Kamyab V., Subramaniam K., Andreopoulos Y.* Stress Transmission in Porous Materials Impacted by Shock Waves // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 109. № 1. P. 013523.