
**ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

УДК 533.6.07

**ОСЛАБЛЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ В КОНИЧЕСКОЙ
УДАРНОЙ ТРУБЕ**

© 2022 г. С. В. Хомик^{1*}, А. Н. Иванцов¹, С. П. Медведев¹, Э. К. Андержанов¹, И. В. Гук²,
А. И. Михайлин^{1,2}, М. В. Сильников^{1,2}, С. Н. Васильева², А. М. Тереза¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук,
Москва, Россия

²АО “НПО Спецматериалов”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: sergei.khomik@gmail.com

Поступила в редакцию 23.09.2021;

после доработки 25.10.2021;

принята в печать 22.11.2021

Экспериментально определены избыточное давление и импульс фазы сжатия за перфорированными перегородками, расположенными поперек конической ударной трубы при распространении в ней сферической ударной волны. В экспериментах использованы перегородки с различной проницаемостью. Варьировалась интенсивность падающей на перегородку ударной волны. Полученная степень ослабления избыточного давления и импульса фазы сжатия ударной волны растет с уменьшением проницаемости перегородки и увеличением интенсивности волны, оставаясь практически постоянной по длине конической ударной трубы.

Ключевые слова: ударная труба, коническая ударная труба, сферическая ударная волна, перфорированная перегородка.

DOI: 10.31857/S0207401X22080040

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] сделан вывод о том, что коническая ударная труба (КУТ) является эффективным средством для воспроизведения динамических нагрузок при сферическом взрыве. Это позволяет использовать КУТ для исследования ослабления сферических ударных волн (УВ) при их взаимодействии с различными взрывозащитными покрытиями и экранами. Как правило, покрытия представляют собой пористую среду, сформированную насыпными дисперсными материалами (песок, гранулы искусственного происхождения), различные виды пены (водно-механические или с полимерным каркасом) и материалы на основе тканей (в том числе используемые для защиты от пуль и осколков) [2, 3]. Экраны, иногда называемые завесами, состоят из взвеси капель, порошков, газонаполненных шариков, нанесенной на каркас пены, а также пластин с отверстиями (перфорированные перегородки (ПП)), слоев сетки и различных проницаемых каркасов. Преимущество экранов из ПП заключается в том, что такой экран может многократно использоваться без ущерба для его работоспособности. Основной характеристикой ПП является проницаемость перегородки (ν) – отноше-

ние суммы площадей всех отверстий перегородки к площади канала, перекрываемого перегородкой.

Прохождение ударных волн с постоянными параметрами за фронтом через ПП достаточно подробно исследовано в работах [4–11]. Уменьшение интенсивности УВ при прохождении через перегородку удобно характеризовать такими безразмерными параметрами, как δ_m – коэффициент ослабления амплитуды взрывной нагрузки, равный

$$\delta_m = \Delta p_{\text{с ПП}} / \Delta p_{\text{без ПП}},$$

и η – коэффициент изменения импульса фазы сжатия, равный

$$\eta = I_{\text{с ПП}} / I_{\text{без ПП}},$$

где Δp – избыточное давление на фронте УВ, а I – импульс фазы сжатия УВ. Определение коэффициента η важно для сферических взрывов, при которых формируются ударные волны конечной длительности со спадающим давлением за фронтом. Поражающее действие таких волн зависит не только от избыточного давления на фронте Δp , но и от импульса фазы сжатия I :

$$I = \int_0^{\tau} \Delta p(t) dt,$$

где τ – время действия фазы сжатия, $\Delta p(t)$ – изменение избыточного давления за фронтом волны со временем. Следует отметить, что результаты работ [4–11] не позволяют, вследствие постоянства параметров за фронтом УВ, сделать выводы о действии сферического взрыва.

Имеются отдельные данные по ослаблению УВ цилиндрической и сферической симметрии с помощью ПП. Так, в экспериментах по ослаблению УВ [12], образующейся при разрушении цилиндрической оболочки, наполненной газом при повышенном давлении, показано, что длительность фазы сжатия УВ при прохождении через ПП не изменяется. В работах [13, 14] исследовалось ослабление решетками и ПП взрывных волн, образующихся при детонации зарядов конденсированных ВВ. В работе [13] приведены данные по значениям импульса волны за преградой. В этих экспериментах преграды конечных размеров размещались в открытом пространстве и поэтому могли иметь место двухмерные эффекты при их обтекании. Вследствие этого сравнение данных из [13] с результатами, полученными в одномерной постановке в трубах, не может считаться правомерным.

В работе [15] найдены закономерности взаимодействия плоских (образующихся в ударной трубе) УВ конечной длительности с ПП различной проницаемости, установленными в одном из сечений трубы. Регистрировались параметры падающей на перегородку и прошедшей ударной волны. Показано, что для значений проницаемости в диапазоне $0.009 < v < 0.3$ справедливо эмпирическое соотношение $\delta_m = 1.14v^{0.62}$.

В работе [16] представлен пример разработки применимого на практике способа использования перфорированного экрана конечных размеров для ослабления нагрузки на здание при внешнем взрыве объема газовой горючей смеси. В проведенных опытах взрывная волна генерировалась дефлаграционным сгоранием облака стехиометрической смеси пропан–кислород. Разбавление смеси азотом позволяло варьировать скорость горения при взрыве и, соответственно, интенсивность волны. Генерируемые волны имели как крутой фронт – ударные волны, так и пологий – волны сжатия. Показано, что наиболее эффективно преграда снижает нагрузку в областях, расположенных близко к взрывающемуся объему.

Цель работы – анализ данных по ослаблению сферической ударной волны перфорированной перегородкой, полученных в экспериментах в конической ударной трубе. В опытах варьировались интенсивность падающей УВ и проницаемость ПП. Измерения проведены на различном расстоянии от ПП.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили в горизонтально расположенной конической ударной трубе – КУТ-14, состоящей из камеры высокого давления (КВД) и открытой конической камеры низкого давления с углом раствора 14° и длиной до 3 м. Камеры разделялись разрывными мембранами из алюминиевой или медной фольги с различным давлением разрыва. Камера высокого давления представляет собой цилиндр длиной 100 мм и диаметром 54 мм. Общий вид и описание КУТ-14, оснащенной расположенными до и после перегородки датчиками давления, приведены в работах [2, 3]. Перфорированная перегородка в виде стальной пластины с отверстиями располагалась на расстоянии 764 мм от мембраны. Диаметр равномерно расположенных отверстий составлял 10 мм, а толщина пластины – 8 мм. Проницаемость перегородки менялась в диапазоне $0.21 < v < 0.41$. В качестве толкающего газа в КВД использовалась смесь гелия с воздухом при различном начальном давлении, определяемом давлением разрыва мембраны. Использование мембран различной толщины и материала позволяло варьировать интенсивность УВ. При отсутствии перегородки на расстоянии 380 мм вниз по течению от сечения ее установки получены величины избыточного давления УВ Δp_0 в диапазоне от 0.15 до 0.74 бар со следующими промежуточными значениями: 0.21 и 0.48 бар. Во всех опытах коническая камера низкого давления была заполнена воздухом при нормальных условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении экспериментов проводили сравнение амплитуды и профиля давления сферических УВ, регистрируемых на стенке трубы в отсутствие ПП и при ее наличии. Пример такого сравнения приведен на рис. 1, где представлены записи давления датчиком, расположенным на расстоянии 380 мм вниз по течению от ПП для перегородок с различной проницаемостью, в том числе для $v = 0$. Избыточное давление на фронте сферической УВ в отсутствие ПП составляло $\Delta p_0 = 0.74$ бар. Как видно, по мере увеличения перекрытия сечения избыточное давление на стенке уменьшается, и при 80%-ном перекрытии ($v = 0.21$) давление на фронте уменьшается почти в 2 раза: с $\Delta p_0 = 0.74$ бар до $\Delta p = 0.39$ бар. Одновременно с этим происходит увеличение задержки между моментом прихода ударной волны на датчик при отсутствии перегородки и на этот же датчик при ее наличии.

При анализе полученных экспериментальных зависимостей определялись коэффициенты δ_m и η . Оба импульса, входящие в выражение для η , на-

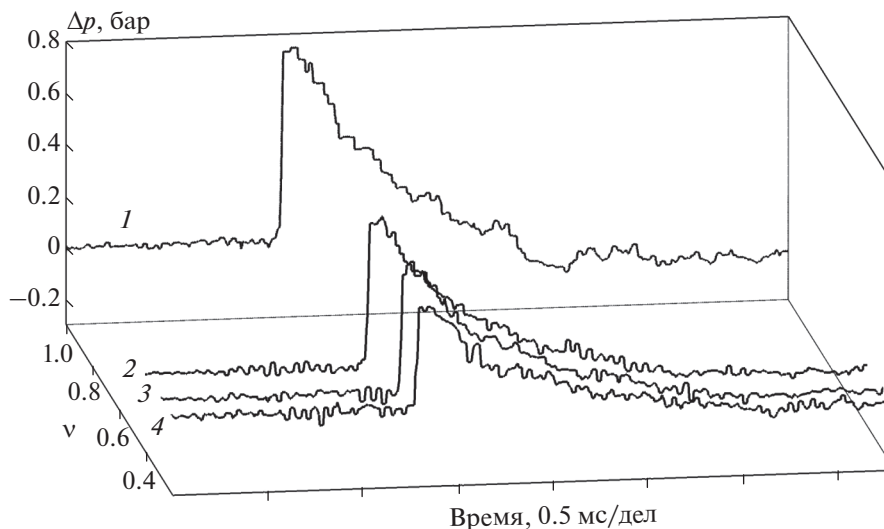


Рис. 1. Профили давления на стенке конической ударной трубы при различной проницаемости ν перфорированной перегородки на расстоянии от нее 380 мм при интенсивности падающей волны $\Delta p_0 = 0.74$ бар: 1 – без перегородки, 2 – $\nu = 0.41$, 3 – $\nu = 0.29$, 4 – $\nu = 0.21$.

ходили путем расчета площади под графиком профиля давления соответствующего датчика. На рис. 2 показана зависимость параметра δ_m от расстояния до перегородки при различной интенсивности падающей сферической УВ. Проницаемость ν при этом сохраняется постоянной и равной $\nu = 0.41$. Данные, представленные на рис. 2, показывают, что коэффициент δ_m практически не изменяется при расстоянии от перегородки более 380 мм независимо от интенсивности УВ. На расстоянии от ПП, меньшем 200 мм, при слабых УВ, соответствующих избыточному давлению в УВ, равному $\Delta p_0 = 0.15$ и 0.21 бар, наблюдаются несколько меньшие значения δ_m . Это может быть связано с тем, что поскольку каждое отверстие перегородки является источником сферической УВ, то формирование результирующей сферической УВ за перегородкой происходит не мгновенно, а за счет серии столкновений множества отдельных сферических волн. Потери, неизбежные при этом, будут приводить к меньшему среднему давлению, чем в сформировавшейся сферической УВ с треугольным профилем давления за фронтом на большем расстоянии от ПП. Это может быть вызвано и тем, что датчик регистрирует усредненный по его диаметру (равному 10 мм) сигнал, являющийся суперпозицией проходящих и поперечных волн.

Более подробно формирование сферической УВ из отдельных сферических волн за ПП рассмотрено и численно смоделировано в работе [17]. В пользу предложенного объяснения свидетельствуют и данные, приведенные на рис. 3, где показано изменение коэффициента η в зависимости от расстояния до перегородки при различной

интенсивности УВ и фиксированном значении проницаемости $\nu = 0.41$. На ближайшем к перегородке датчике регистрируется такое же значение η , как и далее. Таким образом, как и в случае с δ_m , расстояние до ПП несущественно влияет на безразмерный параметр, характеризующий импульс фазы сжатия сферической УВ после перегородки. Отметим, что зарегистрированное на расстоянии 891 мм от ПП меньшее значение η может быть

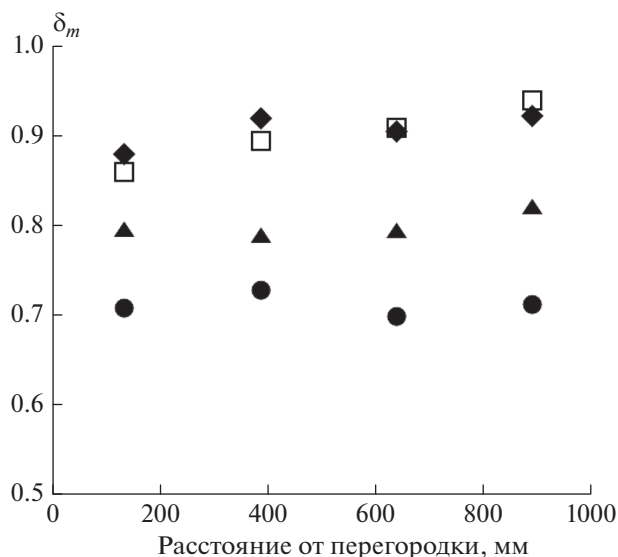


Рис. 2. Зависимость коэффициента ослабления амплитуды взрывной нагрузки, δ_m , от расстояния до ПП с $\nu = 0.41$ при различных величинах Δp_0 : \square – 0.15 бар, \blacklozenge – 0.21 бар, \blacktriangle – 0.48 бар, \bullet – 0.74 бар.

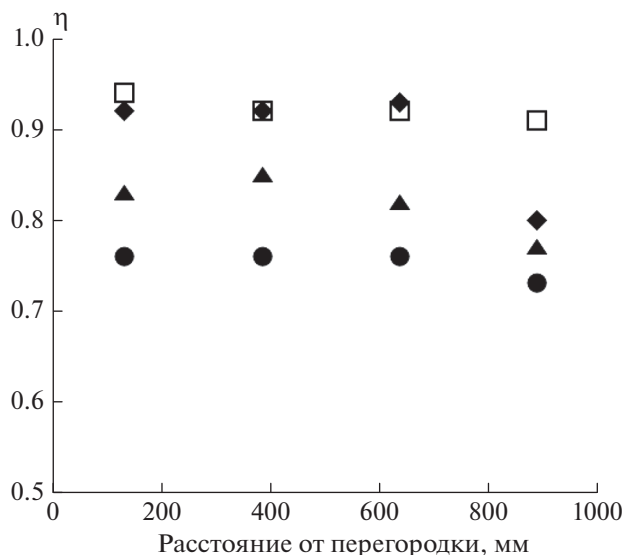


Рис. 3. Зависимость коэффициента изменения импульса фазы сжатия, η , от расстояния до ПП с $v = 0.41$ при различных величинах Δp_0 : \square – 0.15 бар, \blacklozenge – 0.21 бар, \blacktriangle – 0.48 бар, \bullet – 0.74 бар.

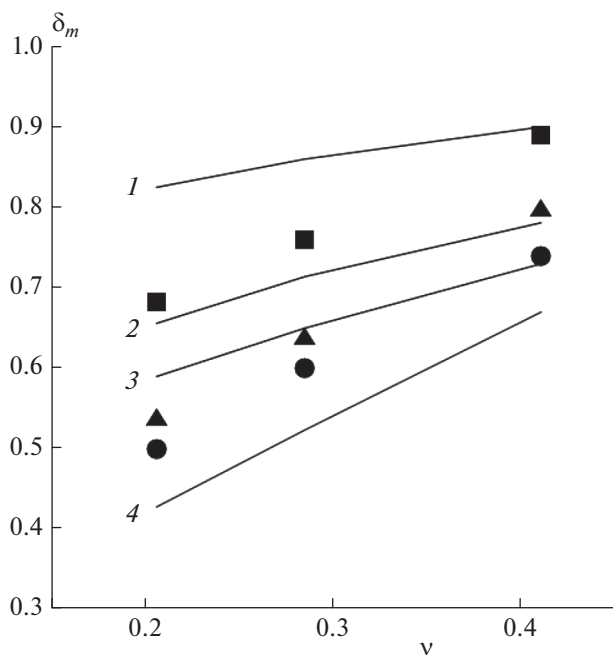


Рис. 4. Зависимость коэффициента ослабления амплитуды взрывной нагрузки, δ_m , от проницаемости ПП. Точки – эксперименты при различных величинах Δp_0 на расстоянии 380 мм от ПП: \blacksquare – 0.15 бар, \blacktriangle – 0.48 бар, \bullet – 0.74 бар. Кривые 1, 2 и 3 для экспериментов при соответствующих значениях Δp_0 рассчитаны по соотношениям из работы [18]. Прямая 4 соответствует корреляции δ_m и v [15].

обусловлено влиянием волны разрежения, распространяющейся от открытого торца КУТ.

На рис. 4 представлены зависимости коэффициента ослабления амплитуды взрывной нагруз-

ки (δ_m) от проницаемости ПП (v). Видно, что увеличение параметра v приводит к уменьшению δ_m . Важно отметить, что увеличение интенсивности взаимодействующей с перегородкой УВ приводит к более сильному ослаблению. Этот вывод совпадает с результатами натуральных экспериментов [16] по взрывам топливовоздушных облаков. Как уже ранее указывалось, в работе [16] показано, что наиболее эффективно преграда снижает нагрузку в областях, расположенных близко к взрывающемуся объему, т.е. там, где сферическая УВ сильнее. Данный факт имеет большое практическое значение и должен учитываться при оценке взрывобезопасности различных объектов.

Корреляция между коэффициентом δ_m и v , представленная в работе [15], показана на рис. 4 в виде прямой 4. Эта прямая располагается ниже, чем значения коэффициента δ_m , даже при максимальной использованной в опытах интенсивности УВ. Отличие эксперимента от расчета по корреляционной формуле из работы [15] не превышает 10% и постоянно во всем диапазоне использованных проницаемостей. Однако это относится только к сравнительно сильным УВ (в нашем случае $\Delta p_0 = 0.74$ бар). При уменьшении интенсивности УВ разница становится больше. Одной из причин отмеченной разницы может быть то, что в работе [15] исследовались более интенсивные плоские УВ, в отличие от сферических УВ, рассматриваемых в настоящей работе.

В работе [18] предложены полуэмпирические соотношения для расчета изменения интенсивности УВ после взаимодействия с ПП, основанные на модели, описывающей ослабление УВ в шероховатых каналах [19] и слоях гранулированных материалов [20]. Результаты расчета коэффициента δ_m по соотношениям из [18] для условий проведенных экспериментов представлены на рис. 4 кривыми 1, 2 и 3 для интенсивностей волны 0.15, 0.48 и 0.74 бар соответственно. Отметим, что расчеты по модели из работы [18] отражают наблюдаемую в экспериментах зависимость степени ослабления УВ от ее интенсивности – чем выше интенсивность, тем больше ослабление. Кроме того, видно, что наилучшее соответствие с экспериментом получается для больших значений проницаемости ПП. При $v \approx 0.2$ разница может достигать 10–15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием конической ударной трубы разработана и обоснована методика исследования закономерностей ослабления ударно-волновой нагрузки при взаимодействии сферической ударной волны с перфорированной перегородкой. Эксперименты показали, что давление и импульс, передаваемые через ПП, зависят от интен-

сивности сферической УВ и проницаемости перегородки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00554.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев С.П., Иванцов А.Н., Михайлин А.И. и др.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 3.
2. *Медведев С.П., Андержанов Э.К., Гук И.В. и др.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 24.
3. *Хомик С.В., Гук И.В., Иванцов А.Н. и др.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 63.
4. *Bowman J.E., Nibblat G.V.F.* // Proc. Soc. Sec. B. 1955. V. 68. Pt. 12. № 432. P. 1008.
5. *Бондаренко А.В., Ибрагим М.А.* // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 3. С.115.
6. *Dain C.G., Hodson J.P.* // Aeronaut Quart. 1974. V. 25. № 2. P. 101.
7. *Косточко Ю.П.* // Тр. НИИ прикл. математики и механики при Томском ун-те. 1974. Т. 5. С. 106.
8. *Mori Y., Hijikata K., Shimizu T.* // Proc. 10th Intern. Shock Tube Sympos. Kyoto: Kyoto Univ., 1975. P. 400.
9. *Tong K.O., Knihgt C.J., Srivastava B.N.* // AIAA J. 1980. V. 18. P. 1298.
10. *Шевцов Б.Л.* // Взаимодействие ударных волн с проницаемыми преградами. М.: 1982. 20 с. Деп. в ВИНТИ 16.03.82, № 1192-82.
11. *Гринь В.Т., Крайко А.Н., Миллер Л.Г.* // ЖПМТФ. 1981. № 3. С. 95.
12. *Иванов А.Н., Борисовская В.Л.* // Тр. ЦАГИ. 1977. Вып. 1834. С. 26.
13. *Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S. et al.* Explosion hazards and evaluation. Amsterdam—N.Y.—Oxford: Elsevier, 1983.
14. *Mineev V.N., Klapovsky V.E., Matseevich B.F. et al.* // Proc. 5th Sympos. Explos Work. Metals. Gottwaldow: Dum. Techniky CSVTS Pardubice, 1982. P. 357.
15. *Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н.* // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 6. С. 74.
16. *Горев В.А., Тюрин Н.В.* // Пожаровзрывобезопасность. 2005. № 2 С. 33.
17. *Медведев С.П., Хомик С.В., Гельфанд Б.Е.* // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 12. С. 52.
18. *Гельфанд Б.Е., Фролов С.М.* // ЖПМТФ. 1990. № 4. С. 42.
19. *Гельфанд Б.Е., Фролов С.М., Медведев С.П.* // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26. № 3. С. 91.
20. *Медведев С.П., Фролов С.М., Гельфанд Б.Е.* // Инж.-физ. журн. 1990. Т. 58. № 6. С. 924.