

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 533.6.07

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И КОНИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ТРУБАХ

© 2020 г. С. П. Медведев^{1*}, Э. К. Андержанов¹, И. В. Гук², А. Н. Иванцов¹, А. И. Михайлин²,
М. В. Сильников^{1,2}, В. С. Помазов², А. М. Тереза¹, С. В. Хомик¹

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

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

*E-mail: podwal_ac@yahoo.com

Поступила в редакцию 04.06.2020;

после доработки 18.06.2020;

принята в печать 22.06.2020

В экспериментах с использованием цилиндрической и конической ударных труб определены параметры ударно-волновой нагрузки, передаваемой жесткой стенке через слой нетканого покрытия из арамидных волокон. Продемонстрирован эффект усиления амплитуды волны давления в зависимости от толщины слоя. Разработанная методика экспериментального моделирования и полученные результаты показали, что коническая ударная труба является эффективным инструментом для исследования взаимодействия проходящих сферических ударных волн со слоями взрывозащитных покрытий.

Ключевые слова: ударная труба, коническая ударная труба, ударно-волновая нагрузка, текстильные материалы, сферическая ударная волна.

DOI: 10.31857/S0207401X20120110

ВВЕДЕНИЕ

Взрывозащитные покрытия (ВП) являются важным элементом систем обеспечения безопасности при террористических атаках и техногенных авариях. Конечная цель применения ВП — ослабление динамической нагрузки на объект при воздействии воздушной ударной волны. Таким свойством могут обладать разнообразные среды и материалы. Анализ литературных данных позволяет классифицировать наиболее распространенные виды взрывозащитных покрытий, к которым относятся:

- 1) пористые сжимаемые покрытия, такие как пенополиуретан;
- 2) слои насыпных материалов (например, песок и т.п.);
- 3) текстильные материалы.

Начиная с пионерской работы [1], для исследования ослабления ударных волн (УВ) с помощью ВП широко используются ударные трубы, в которых с определенными ограничениями можно моделировать профиль давления, характерный для сферического взрыва [2]. Работа [1] стала классической и широко цитируемой в мире, поскольку в ней впервые был описан эффект значительного кратковременного усиления амплитуды отражен-

ной ударной волны на жесткой стенке (торце ударной трубы) за блоком пенополиуретана с плотностью 20 кг/м³. Оказалось, что аналогичное явление наблюдается и в случае слоев гораздо более плотных насыпных материалов [3], а также текстиля [4, 5]. При проектировании систем взрывобезопасности необходимо исключить такие “нерасчетные” выбросы давления. Многочисленные литературные данные подтверждают, что эффект усиления взрывной нагрузки чувствителен ко многим факторам, включая тонкую структуру материала [1], размер частиц насыпной среды и степень ее предварительного уплотнения [3], а также форму профиля давления ударной волны [3]. Общим для всех ВП является то, что эффект усиления имеет выраженную зависимость от толщины покрытия h [3, 6]. Максимальное усиление достигается при относительно небольшой величине h . С ростом последней эффект исчезает и покрытие начинает выполнять свою взрывозащитную функцию, т.е. при наличии ВП амплитуда отраженной ударной волны на жесткой стенке становится меньше, чем в его отсутствие.

В течение последних десятилетий предпринимались многочисленные попытки теоретического описания эффекта усиления отраженной ударной волны при взаимодействии с пористыми

сжимаемыми материалами и гранулированными средами [7–13]. Несмотря на различие используемых моделей и математических подходов, все они основаны на учете вовлечения твердой фазы в движение под действием ударно-волновой нагрузки, как и предсказывалось в работе [1]. Наглядное представление процесса отклика пористой сжимаемой среды на ударно-волновую нагрузку дает предложенная в работе [14] упрощенная модель, в которой пористый сжимаемый материал представляется эквивалентной механической системой с одной степенью свободы.

При анализе эффективности взрывозащитного покрытия необходимо учитывать не только амплитуду взрывной нагрузки, но и профиль давления. В актуальном случае сферического взрыва заряда конденсированного взрывчатого вещества давление за фронтом УВ плавно снижается до начального — формируется так называемая волна треугольного профиля давления. Скорость снижения давления и связанная с ней величина длительности фазы сжатия в точке наблюдения определяются в основном массой и расстоянием до заряда. При идеальных взрывах, например при разрыве газонаполненного сосуда высокого давления или детонации топливовоздушного облака, реализуется более сложная картина течения, при которой за фазой сжатия следует фаза разрежения. В общем случае сжатие пористого материала при отражении УВ от его границы происходит относительно медленно. Если отраженная ударная волна имеет треугольный профиль давления, то процесс сжатия происходит в нестационарных условиях, что оказывает влияние на величину и профиль взрывной нагрузки, передаваемой жесткой подложке. Максимальное сжатие наблюдается в случае, когда ударная волна имеет ступенчатый (прямоугольный) профиль давления. Такие волны, как падающие, так и отраженные, генерируются в широко распространенных цилиндрических ударных трубах (постоянного сечения). На этих установках при использовании укороченной камеры с толкающим газом можно получить и УВ треугольного профиля давления [2, 15]. Исследование взрывной нагрузки, включающей фазу разрежения, удобно проводить в гораздо менее распространенных конических ударных трубах (КУТ). В работе [16] приведены результаты анализа течения в КУТ с углом раствора 38° и сделан вывод, что трубы такой геометрической формы являются эффективным инструментом для исследования воздействия сферических ударных волн на различные материалы и конструкции.

Среди перечисленных видов ВП наименее исследованными являются нетканые текстильные материалы. Между тем такие материалы широко используются в системах защиты от осколочного и фугасного действий взрыва. Типичным их представителем является пулеулавливающий материал

(ПУМ) — нетканое огнестойкое полотно толщиной 3 мм из высокомодульного арамидного волокна СВМ при объемной плотности 40 кг/м^3 [17]. В работе представлены результаты исследования взрывозащитных свойств ПУМ в установках различного типа — цилиндрической и конической ударных трубах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В стандартной постановке эксперимента в ударной трубе [1, 3, 6] исследуемое покрытие или материал размещаются в торце рабочей секции. Эксперименты со слоями нетканых текстильных материалов, к которым относится ПУМ, удобно проводить при вертикальной ориентации трубы. В опытах использовалась цилиндрическая ударная труба, камера высокого давления которой (длина — 0,5 м, диаметр — 50 мм) отделялась разрывной мембраной из алюминиевой фольги от камеры низкого давления (длина — 1 м, диаметр — 54 мм), заполненной воздухом при нормальных условиях. В качестве толкающего газа использовали смесь гелия с воздухом. Параметры падающей ударной волны измерялись с помощью пьезоэлектрических датчиков давления ЛХ-610, расположенных в трех сечениях на боковой стенке. В середине нижнего торца трубы размещался датчик давления Kistler 603B. Сигналы датчиков регистрировались встроенной в персональный компьютер системой сбора данных T512 (Imtec). В основной серии экспериментов избыточное давление за отраженной ударной волной в газе составляло $\Delta p_0 = 0.62\text{--}0.66 \text{ МПа}$. В экспериментах варьировали толщину h слоя ПУМ путем использования определенного количества образцов полотен, вырезанных под диаметр ударной трубы. Таким образом, значение h ратно 3 мм. На рис. 1а представлен общий вид сборки, состоящей из десяти слоев ПУМ, расположенных на торцевом фланце непосредственно перед помещением в ударную трубу.

Установка другого типа — коническая ударная труба КУТ-14 с углом раствора 14° и открытой конической камерой низкого давления длиной до 3 м. Камера высокого давления представляет собой цилиндр длиной 100 мм и радиусом 54 мм. Общий вид КУТ-14, оснащенной датчиками давления ЛХ-610, представлен на рис. 1б. Вдоль нижней образующей конуса напротив датчика 5 расположен дублирующий датчик 5' (не показанный на рис. 1б). Толкающий газ — смесь гелия с воздухом при давлении 3,5 МПа в момент разрыва мембраны из медной фольги. В экспериментах исследовалось распространение ударной волны вдоль слоев ПУМ, помещаемых в виде наборов листовых образцов, закрывающих чувствительный элемент датчика 5'. Таким образом, давление над и под слоем регистрировалось одновременно в двух сечениях. Расстояние от края разрывной мембраны

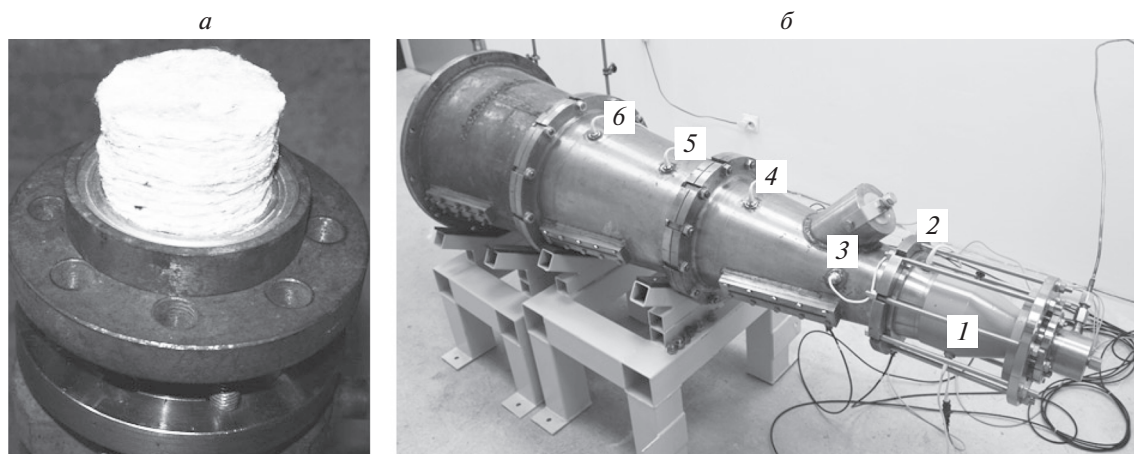


Рис. 1. Объект и средства исследования: *а* — сборка из десяти слоев ПУМ перед помещением в цилиндрическую ударную трубу; *б* — коническая ударная труба, оборудованная датчиками давления 1–6.

до центра посадочного отверстия датчика 5 составляет 0.89 м. В месте расположения датчика 5 избыточное давление за проходящей ударной волной в газе составляло (70 ± 2) кПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах, выполненных в цилиндрической ударной трубе, проводилось сравнение амплитуды и профиля давления отраженной ударной волны в отсутствие взрывозащитного покрытия ПУМ и при его наличии. Пример такого сопоставления показан на рис. 2*а*, где представлены зависимости давления от времени при $h = 0$ и 30 мм, записанные торцевым датчиком. Как видно, профиль давления в отраженной ударной волне в отсутствие покрытия (сплошная кривая на рис. 2*а*) характеризуется постоянными параметрами в течение 0.5 мс после отражения. Последующее уменьшение давления связано со взаимодействием отраженной УВ с контактной поверхностью и приходом волны разрежения. При наличии слоя ВП (штриховая кривая на рис. 2*а*) динамика передачи ударно-волновой нагрузки существенно изменяется. Давление растет относительно плавно (без ударного фронта) и достигает величины Δp_{max} , в 2 раза превышающей избыточное давление Δp_0 за отраженной УВ в газе. После достижения Δp_{max} давление под слоем уменьшается и далее меняется согласно динамике изменения давления в газе. Выявленные особенности процесса передачи ударно-волновой нагрузки через ВП аналогичны наблюдаемым в случае пористых сжимаемых материалов и насыпных сред.

Как отмечалось выше, реальной взрывной нагрузке часто отвечает треугольный профиль давления. В экспериментах с использованием цилиндри-

ческой ударной трубы такой профиль получали путем существенного уменьшения длины камеры высокого давления с 0.5 до 0.07 м. На рис. 2*б* приведен пример записи давления для этой конфигурации. Как видно, в отраженной ударной волне (сплошная кривая на рис. 2*б*) уменьшение давления начинается сразу за фронтом. При этом длительность фазы сжатия трудно оценить, поскольку фаза разрежения отсутствует. При наличии слоя ПУМ толщиной 30 мм (штриховая кривая на рис. 2*б*), как и в случае рис. 2*а*, наблюдается скачок давления. Как и для насыпной среды [3], для УВ треугольного профиля давления величина Δp_{max} меньше, чем для ступенчатой нагрузки такой же амплитуды.

На рис. 2*в* представлены записи давления в КУТ-14 в газе (сплошная кривая) и под слоем ПУМ толщиной 30 мм (штриховая кривая), сделанные датчиками 5 и 5', расположенными в одном сечении. В отличие от экспериментов, проведенных в цилиндрической ударной трубе, амплитуда на фронте УВ в газе, как и длительность фазы сжатия, значительно меньше. За фазой сжатия следует характерная для сферического взрыва выраженная фаза разрежения. Под слоем ПУМ максимальная величина Δp_{max} не превышает амплитуду избыточного давления на фронте проходящей волны в газе, которая в этом случае является аналогом параметра Δp_0 — избыточного давления за отраженной УВ в цилиндрической ударной трубе.

При анализе зависимости величины максимального давления, передаваемого подложке, от толщины слоя ВП будем использовать максимальный коэффициент относительной нагрузки $\delta_{max} = \Delta p_{max} / \Delta p_0$, введенный в работах [3, 14]. На рис. 3 представлено сопоставление полученных в работе экспериментальных зависимостей для ПУМ с имеющимися в литературе данными для

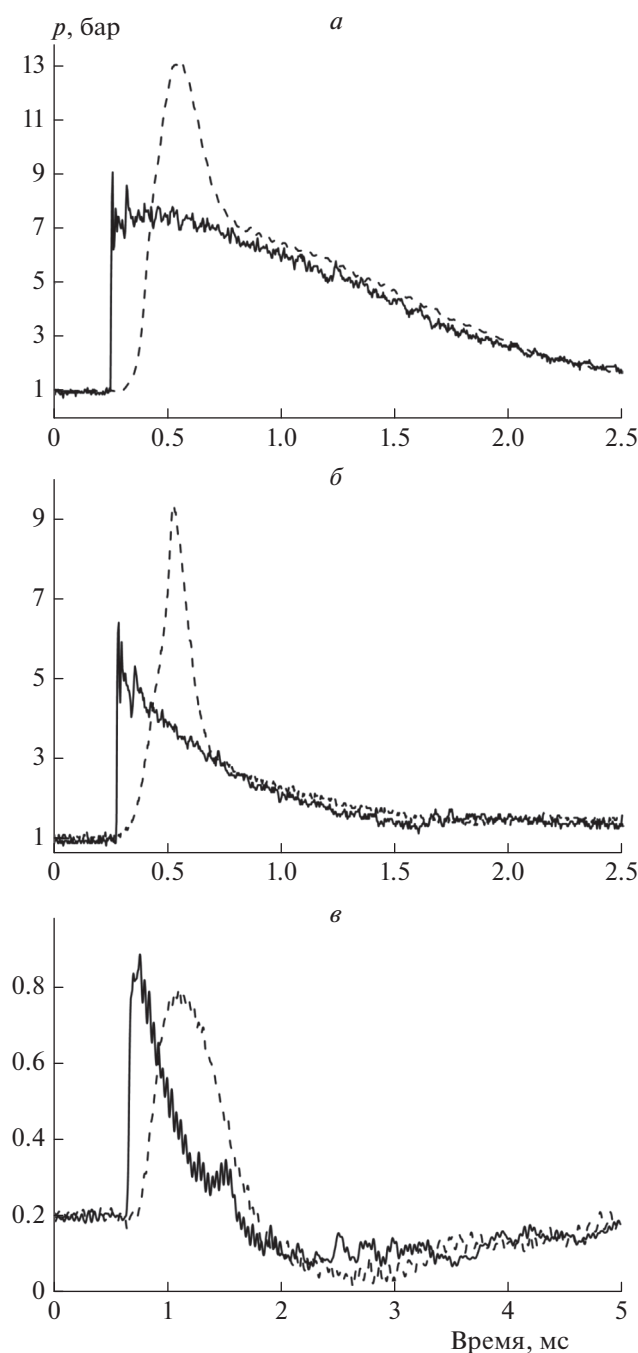


Рис. 2. Записи давления P в отсутствие (сплошные кривые) и при наличии (штриховые кривые) слоя ПУМ: a – ступенчатая нагрузка; $б$ – треугольный профиль давления; $в$ – сферическая УВ, смоделированная в КУТ.

слоев песка и пенополиуретана. Как видно, измеренная в цилиндрической ударной трубе величина $\delta_{\max}$ (кривая 1) достигает максимума, равного ≈ 2 при $h = 30\text{--}40$ мм. В конической ударной трубе (кривая 2) усиление ударно-волновой нагрузки не столь значительно и максимум $\delta_{\max} \approx 1.2$ на-

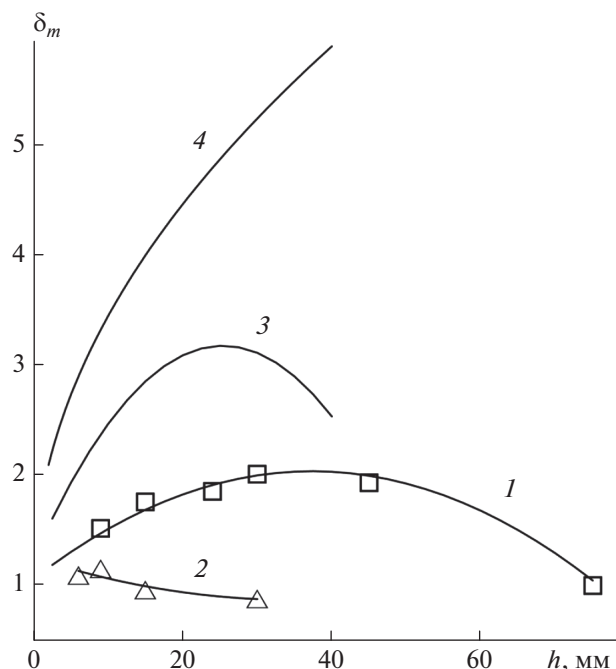


Рис. 3. Зависимость максимальной величины коэффициента относительной нагрузки от толщины слоя: 1 – ПУМ (цилиндрическая ударная труба); 2 – ПУМ (коническая ударная труба); 3 – песок [3]; 4 – пенополиуретан [6].

блюдается при $h = 9$ мм. Выявленное различие может быть интерпретировано с помощью модели механического эквивалента [14]. Успешное применение этой модели к описанию результатов экспериментов с пенополиуретаном [14] и сыпными средами [3] дает основание полагать, что и в случае текстильных материалов имеет место аналогичная феноменология процесса передачи ударно-волновой нагрузки.

Арамидные волокна в ПУМ образуют каркас, который при отражении ударной волны от поверхности слоя сжимается на начальном этапе практически без сопротивления. Материал движется с ускорением в направлении подложки. После уплотнения передаваемая подложке нагрузка определяется уже упругими свойствами самих волокон и начальным условием, задаваемым приобретенным импульсом. Сжатие без существенного сопротивления более эффективно при относительно большой амплитуде ударной волны, как это имеет место в экспериментах в цилиндрической ударной трубе. В конической ударной трубе избыточное давление на фронте скользящей УВ почти на порядок меньше. В таких условиях каркас сжимается в меньшей степени. Кроме того, в ударной волне взрывного (треугольного) профиля давление на поверхности сжимаемого слоя непостоянно и уменьшается в процессе сжатия за счет вол-

ны разрежения. Эти факторы приводят к различиям в величине $\delta_{\max}$ (кривые 1 и 2 на рис. 3).

Как видно из рис. 3, для песка со средним размером частиц 0.3 мм и УВ с $\Delta p_0 = 2.8$ бар (кривая 3) наблюдается рост величины $\delta_{\max}$ в 1.5 раза, по сравнению с ПУМ. Следует, однако, учитывать, что прямое сравнение в этом случае может быть некорректным вследствие существенного различия характеристик ПУМ и песка – материала с плотностью частиц 2450 кг/м³ и насыпной плотностью 1800 кг/м³. По этим параметрам гораздо ближе к ПУМ, в котором плотность составляет около 40 кг/м³, находится пенополиуретан [6, 14] с плотностью 33 кг/м³. Кривая 4 на рис. 3 представляет экспериментальные данные [6] при $\Delta p_0 = 2.2$ бар. Как видно, для пенополиуретана величина $\delta_{\max}$ в 2–2.5 раза выше, чем для ПУМ. Максимум (не показан на рис. 3) составляет $\delta_{\max} \approx 10$ при $h = 100$ мм. Таким образом, с точки зрения взрывозащиты и снижения импульсных нагрузок ПУМ является более эффективным материалом, чем пенополиуретан.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты в цилиндрической и конической ударных трубах показали, что параметры ударно-волновой нагрузки, передаваемой через слой нетканого материала из арамидного волокна, зависят от интенсивности воздушной ударной волны и ее профиля. Установлено, что аналогично другим пористым сжимаемым покрытиям при относительно небольшой толщине исследуемого материала в профиле давления на жесткой подложке присутствует импульсная составляющая, амплитуда которой может значительно превышать давление отражения ударной волны в отсутствие покрытия. Учет этого эффекта необходим при проектировании систем защиты от фугасного действия взрыва. Разработанная методика экспериментального моделирования и полученные результаты показали, что коническая ударная труба является достаточно эффективным инструмен-

том для исследования взаимодействия проходящих сферических ударных волн со слоями взрывозащитных покрытий.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Козарко С.М., Попов О.Е. // ЖПМТФ. 1975. № 6. С. 74.
2. Гельфанд Б.Е., Поленов А.Н., Фролов С.М., Цыганов С.А. // Хим. физика. 1986. Т. 5. № 1. С. 121.
3. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Borisov A.A. et al. // Arch. Combust. 1989. V. 9. № 1/4. P. 153.
4. Gibson P.W. // J. Text. Inst. 1995. V. 86. № 1. P. 119; <https://doi.org/10.1080/00405009508631315>
5. Hattingsh T.S., Skews B.W. // Shock Waves. 2001. V. 11. P. 115.
6. Гвоздева Л.Г., Фаресов Ю.М., Фокеев В.П. // ЖПМТФ. 1985. № 3. С. 111.
7. Гельфанд Б.Е., Губанов А.Б., Тимофеев Е.И. // Изв. АН СССР. МЖГ 1983. № 4. С. 54.
8. Гвоздева Л.Г., Ляхов В.Н., Раевский Д.К., Фаресов Ю.М. // Физика горения и взрыва. 1987. № 4. С. 125.
9. Кутушев А.Г., Рудаков Д.А. // ЖПМТФ. 1993. № 5. С. 25.
10. Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Урманчеев С.Ф. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 4. С. 87.
11. Fedorov A.V., Fedorchenko I.A., Leont'ev I.V. // Shock Waves. 2006. V.15. P. 453.
12. Уткин П.С. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 11. С. 61.
13. Сидоренко Д.А., Уткин П.С. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 9. С. 43.
14. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Фролов С.М. // ЖТФ. 1987. Т. 57. № 4. С. 831.
15. Gelfand B.E., Bartenev A.M., Medvedev S.P. et al. // Shock Waves. 1994. V. 4. № 2. P. 137.
16. Медведев С.П., Иванцов А.Н., Михайлин А.И., Сильников М.В., Тереза А.М., Хомик С.В. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 3.
17. Шульдешова П.М., Деев И.С., Железина Г.Ф. // Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. № 2 (38). С. 11; <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-2-11-11>