

УДК 534.2

СРАВНЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ВЗРЫВНОГО ДАВЛЕНИЯ КАУЧУКОВОЙ ПЕНОЙ В ГЕНЕРАТОРЕ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ И В УСЛОВИЯХ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ

I. S. Sandhu^{1,3}, A. Sharma¹, M. Thangadurai², M. B. Kala¹, P. S. Alegaonkar³,
M. Singh¹, D. R. Saroha¹

¹Баллистическая исследовательская лаборатория, 160030 Чандигарх, Индия, inderpal20@gmail.com

²Академия научных и инновационных исследований, Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, 713209 Дургапур, Индия

³Оборонный институт передовых технологий (Университет Димед), Гиринагар, 411025 Пуна, Индия

Исследовалась эффективность подавления взрывной волны пеной из натурального каучука с открытыми порами в лабораторных и полевых условиях. Ослабление взрывной волны оценивалось в терминах пикового избыточного давления и положительной фазы импульса. Для измерения падающего и передаваемого через пену давления использовались пьезоэлектрические датчики давления, устанавливаемые в полевых испытаниях заподлицо с верхней поверхностью опорной плиты из композитного материала, а в лабораторных тестах — на торцевой пластине генератора взрывной волны. В полевых испытаниях взрывная волна генерировалась при детонации взрывчатого вещества, в лабораторных испытаниях она создавалась при разрыве диафрагмы в генераторе взрывной волны. Из результатов испытаний следует, что передаваемое через пену давление и соответствующие импульсы зависят от формы волны нагрузки, а также от тестовой конфигурации, используемой в лабораторном методе. Таким образом, лабораторные тесты с использованием генератора взрывной волны показывают только тенденцию трансформации передаваемого давления и в лучшем случае могут использоваться для сравнительной оценки ослабления взрывной волны при прохождении через различные материалы. Фактические значения передаваемого давления и импульса могут быть получены только в полевых испытаниях при взрывных нагрузках, создаваемых взрывчатыми веществами.

Ключевые слова: взрывная волна, ослабление взрывной волны, вспененный натуральный каучук, ударная труба, генератор взрывной волны.

DOI 10.15372/FGV20200114

ВВЕДЕНИЕ

Самопроизвольная быстрая деформация, возникающая в результате распространения взрывной волны через среду, может привести к катастрофическим повреждениям конструкций и серьезным травмам людей. Хотя пиковое избыточное давление и импульс рассматриваются как одинаково важные факторы, приводящие к ущербу и травмам, тем не менее при маломасштабных взрывах за последствия в основном отвечает пиковое избыточное давление.

Снижение пикового давления и импульса

взрывной волны важно при многих практических применениях, например при разработке контейнеров для бомб, требующих материалов, которые могут смягчить взрывное воздействие, при разработке систем экранирования конструкций от разрушительного воздействия детонации взрывчатых веществ и самодельных взрывных устройств. На протяжении многих лет предлагались различные материалы и методы ослабления взрывных волн: перфорированные пластины [1], различные препятствия [2, 3], металлическая пена [4, 5], водная пена [6], гранулированные фильтры [7], углеродные нанотрубки [8], многослойные композиты [9], а также полиуретановая пена, достаточно хорошо исследованная как средство защиты от взрыва [10–19]. Преимуществами последней являются малая масса, низкая стоимость, доступность и превосходное качество ослабления зву-

© Sandhu I. S., Sharma A., Thangadurai M., Kala M. B., Alegaonkar P. S., Singh M., Saroha D. R., 2020.

¹Terminal Ballistics Research Laboratory, Sector 30, Chandigarh, India 160030. ²CSIR-Central Mechanical Engineering Research Institute (CMERI), Durgapur, 713209 India. ³Defence Institute of Advanced Technology (Deemed University) Girinagar, Pune, 411025 India.

ковой волны. Подробный обзор различных методов ослабления взрывной волны представлен в [20].

Помимо разработки материалов, предназначенных для уменьшения воздействия взрыва, при проектировании защитных систем важны также методы испытаний и схемы экспериментальных установок. Точное и быстрое тестирование дает ценные входные данные для повышения эффективности защитной системы и сокращает время разработки. Для изучения способности различных материалов к подавлению взрыва в полевых испытаниях традиционно создается взрывная волна с использованием взрывчатых веществ (ВВ). Полевые испытания требуют много ресурсов — материалов, рабочей силы, времени. Поэтому всегда существует потребность в альтернативных лабораторных методах для создания взрывных волн, подобных тем, которые генерируются ВВ в полевых испытаниях. Одним из таких устройств является ударная труба, работающая на сжатом газе. Ударная волна с конечной продолжительностью пикового давления, т. е. с профилем давления прямоугольной формы, создается, как правило, в обычной ударной трубе с длинной секцией высокого давления [21]. Однако падающая волна давления с профилем Фридлиндера в заданной координате может быть получена с помощью короткой секции высокого давления [22]. Такая модифицированная ударная труба называется генератором взрывных волн. Формирование взрывной волны зависит от таких параметров, как давление в секции высокого давления, диаметр трубы, природа газов в секциях высокого и низкого давления [23, 24]. Взрывная волна с профилем избыточного давления, подобным генерируемому взрывчатым веществом в полевых испытаниях, может быть получена также в лаборатории при использовании взрывной ударной трубы [25–27].

Большинство опубликованных исследований по ослаблению взрывных волн проводилось в лабораторных ударных установках. При изучении ослабления ударной волны в эластичной пене было замечено, что передаваемое взрывное давление усиливается, если пена находится в контакте с торцевой пластиной ударной трубы. Причем усиление давления возрастает с увеличением толщины пены [10, 12, 28]. Объяснялось это передачей импульса пене из-за ударно-волновой нагрузки [14, 15]. Положение

пены в ударной трубе также влияет на ослабление или усиление волны давления. Так, в [11] наблюдали ослабление давления с увеличением расстояния от слоя пены до торцевой пластины ударной трубы. Ослабление давления, передаваемого через пену, контактирующую с опорной пластиной, обнаружено также в полевых испытаниях [15–19].

В доступной литературе практически отсутствуют исследования по сравнению характеристик материалов, ослабляющих взрывную волну в ударной трубе и при полевых испытаниях. Сообщается об исследованиях либо только в полевых условиях, либо только в ударной трубе. Отметим лишь работу [15], в которой ослабление взрывной волны пеной с закрытыми порами изучалось как в ударной трубе, так и в полевых испытаниях, однако образцы пены, расположенные на торцевой пластине ударной трубы, нагружались ударной волной прямоугольного профиля, а не экспоненциально затухающей взрывной волной.

В настоящем исследовании проведена сравнительная оценка образцов пены из натурального каучука, нагружаемых в лабораторных и полевых условиях. Для этого внутри генератора взрывной волны создавалась волна с пиковым избыточным давлением, почти равным амплитуде взрывной волны, генерируемой взрывчатым веществом.

1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДОЛОГИЯ

1.1. Испытуемый материал

Пена в основном используется для снижения акустического и вибрационного шума. Однако она обладает большим потенциалом для подавления взрывных волн. Каучуковая пена характеризуется более высокой упругостью и большей долговечностью, чем пенополиуретан. В настоящем исследовании использовалась пена компании «Puag Lal Group», Мирут, Индия. Пена представляет собой двухслойную структуру толщиной 100 мм. Одна сторона листа имеет отверстия диаметром примерно 6 мм и глубиной 65 мм в виде сетки с межосевым расстоянием 23 мм, как показано на рис. 1. Плотность этого слоя 110 кг/м^3 . Оставшаяся часть толщиной 35 мм имеет плотность 120 кг/м^3 .



Рис. 1. Фотография пены из натурального каучука плотностью 110 кг/м^3

1.2. Генератор взрывной волны

В настоящем исследовании ударная труба преобразована в генератор взрывной волны (ГВВ) путем уменьшения длины секции высокого давления, так что внутри ударной трубы может быть получена взрывная волна с профилем Фридлиндера [22]. Длина секции высокого давления равна 0.3 м , а секции низкого давления — 6.4 м . Труба ГВВ изготовлена из нержавеющей стали, ее внутренний диаметр 100 мм . Для разделения газов секций высокого и низкого давления и создания пиковых давлений, эквивалентных генерируемым при взрывных испытаниях, использовались алюминиевые диафрагмы различной толщины с V-образной канавкой. Для увеличения интенсивности взрыв-

ной волны применялись газы с более низкой молекулярной массой в секции высокого давления. Из соображений безопасности в секции высокого давления использовался гелий. Окружающая среда в полевых испытаниях моделировалась путем поддержания воздуха при атмосферном давлении в секции низкого давления. Каучуковая пена была проверена на эффективность ослабления давления взрыва в двух разных конфигурациях опытов. В конфигурации 1 (рис. 2, *a*) образцы пенопласта были нарезаны в форме цилиндра диаметром, приблизительно равным внутреннему диаметру трубы. Образец пены удерживался внутри ГВВ таким образом, чтобы его задняя поверхность просто касалась торцевой пластины трубы, как показано на рис. 2, *a*. Боковые поверхности образцов пены касались внутренней поверхности трубы (сжатие пены составляло менее 1%). При такой схеме опыта боковая разгрузка образца пены отсутствовала. Для увеличения толщины образца к слою пены пристыковывался еще один слой пены.

В тестовой конфигурации 2 (рис. 2, *б*) образцы пены располагались на выходе трубы между последним фланцем и торцевой пластиной. Передняя поверхность пены касалась последнего фланца ГВВ, а задняя сторона — торцевой пластины, тогда как боковые поверхности образцов пены оставались открытыми. Такая конфигурация позволяет воспроизводить полевые испытания, в которых взрывная волна расширяется в азимутальном направлении и давление снижается при распространении взрывной волны.

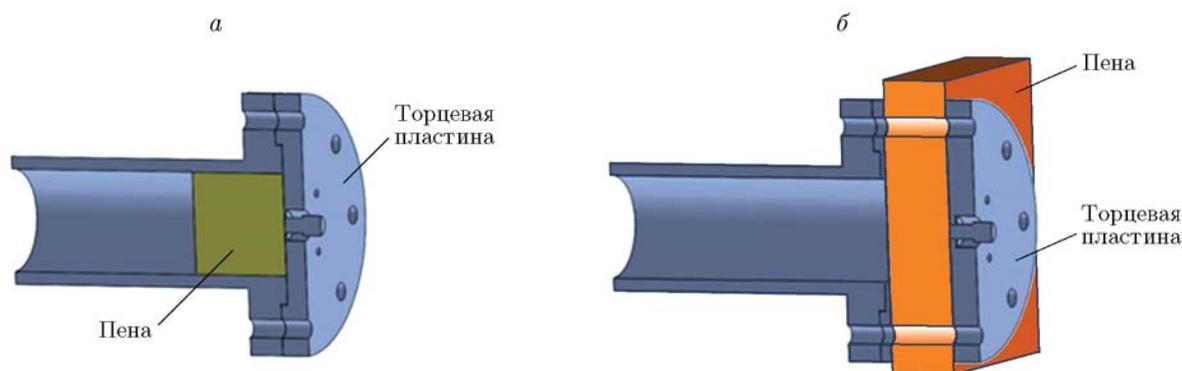


Рис. 2. Схемы лабораторных экспериментов с генератором взрывной волны конфигурации 1 (*a*) и конфигурации 2 (*б*)

1.3. Схема полевых испытаний

В полевых испытаниях слои пены толщиной 0.1 м и размером 0.9×0.9 м размещались на опорной плите из композиционного материала размером более 1.0×1.0 м, которая жестко монтировалась на швеллерной раме из низкоуглеродистой стали с помощью болтов с гайками. Толщина опорной пластины 25 мм. Для формирования жесткой конструкции швеллерная рама была приварена к рамам из уголкового железа, которые были закреплены на четырех бетонных блоках массой около 1000 кг каждый. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Давление взрывной волны, эквивалентное давлению в тестах с ГВВ, было получено при детонации 0.25 и 0.55 кг пластиковой взрывчатки Кирки, установленной на высоте 1.5 м от опорной плиты. Основным компонентом этой взрывчатки является тетрил (85 %), его тротиловый эквивалент составляет 1.17 [29, 30]. Испытания проводились в трех конфигурациях: без пены, с одним и с двумя слоями пены — для изучения затухания давления взрыва как функции толщины пены.

1.4. Датчики и оборудование

Мгновенное давление внутри генератора взрывной волны и на торцевой пластине измерялось с помощью РСВ-пьезоэлектрических датчиков давления 113В24 (чувствительность 0.725 мВ/кПа) на печатной плате. Для записи падающего давления датчики устанавливались

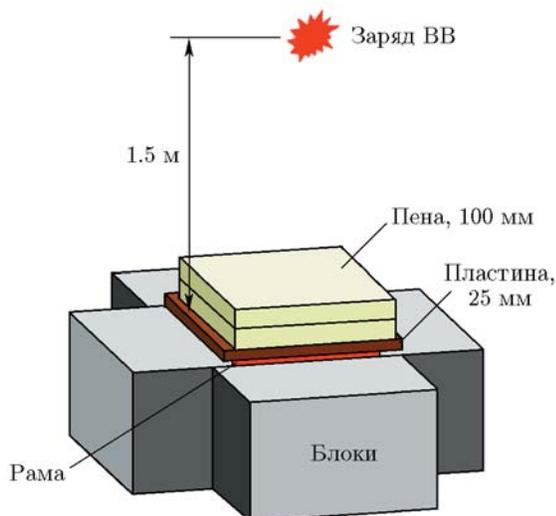


Рис. 3. Схема установки для полевых испытаний

заподлицо с внутренней поверхностью трубы, а для записи отраженной волны — на торцевой пластине. Сигналы с датчиков регистрировались цифроаналоговыми осциллографами Tektronix (полоса пропускания 1 ГГц, частота дискретизации 5 Гс/с). Данные записывались в течение 100 мс с частотой дискретизации 10 МГц.

Для измерения давления, передаваемого через образцы пены в полевых взрывных испытаниях, применялся пьезоэлектрический датчик давления РСВ[®]113В21 (чувствительность 3.6 мВ/кПа), размещенный заподлицо с верхней поверхностью опорной плиты. Соединение верхней поверхности датчика с нижней поверхностью пены с помощью тонкого слоя силиконовой смазки обеспечило их идеальный контакт, что позволило избежать какого-либо дополнительного контакта воздух — пена.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Полевые испытания

На рис. 4,а показан профиль взрывного давления, прошедшего через одинарный и двойной слой пены, при взрыве ВВ массой 0.25 кг. Для сравнения приведен профиль взрывной нагрузки на неизолированной композитной плите. Для преобразования электрического сигнала в давление, синхронизации времени прихода, построения профилей давления и расчета пикового давления использовалась программа Matlab[®]. Для лучшего сопоставления данных о передаваемом давлении в зависимости от толщины пены была проведена синхронизация времени прибытия взрывной волны. Из рисунка видно, что нагрузка взрывным давлением ≈ 485 кПа на открытой базовой плите была снижена до 92 и 82 кПа при использовании соответственно одного и двух слоев каучуковой пены, т. е. взрывное давление уменьшилось на 81 и 83 %. При этом увеличилось время достижения пикового давления. Снижение давления, передаваемого через каучуковую пену, определялось [18] как отношение снижения избыточного давления через пену к исходному избыточному давлению, умноженное на 100 %. Зарегистрированные профили давления взрыва 0.55 кг ВВ показаны на рис. 4,б. В этом случае нагрузка на открытую плиту 1128 кПа была уменьшена примерно до 192 кПа при одном слое пены и до 113 кПа при двух слоях, т. е.

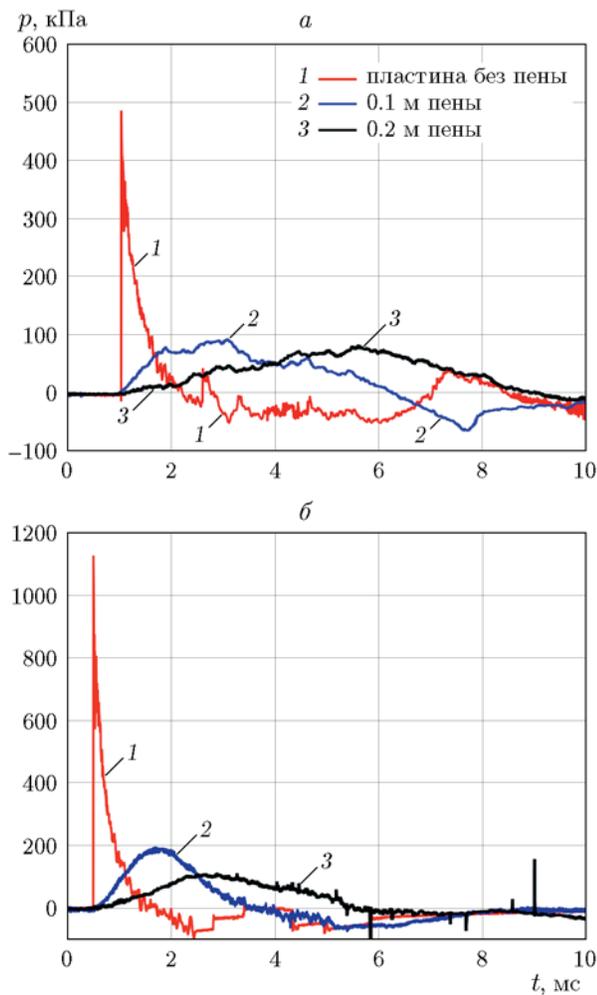


Рис. 4. Профили давления при прохождении взрывной волны через каучковую пену. Полевые испытания:

a — масса ВВ 0.25 кг, *б* — 0.55 кг

снижение составило около 83 и 90 %. Тем не менее увеличение импульса наблюдалось в испытаниях как с одним, так и с двумя слоями пены. В опытах с двухслойной пеной увеличение импульса составило около 120 % для 0.25 кг ВВ и 10 % для 0.55 кг ВВ. Меньшее приращение импульса в последнем случае можно объяснить более сильным затуханием давления в пене из-за ее сжатия при более высокой нагрузке.

2.2. Тесты с генератором взрывной волны конфигурации 1

Зарегистрированное давление взрыва на торцевой пластине ГВВ с пеной и без нее показано на рис. 5. Давление нагрузки ≈ 500 кПа

соответствует давлению, которое в полевых испытаниях создается зарядом ВВ 0.25 кг. В опытах передаваемое давление усиливается до 1250 кПа при добавлении одного слоя пены. Это происходит из-за воздуха, захваченного материалом пены между порами, и поэтому на торцевую плиту передается больший импульс [14, 15]. Усиление давления в пике уменьшается с увеличением толщины пены, и при двойном слое пены передаваемое давление равно ≈ 860 кПа. Усиление давления уменьшается примерно от 152 % при использовании однослойной пены до 74 % при двухслойной пене вследствие того, что волна разгрузки проходит большее расстояние и сильнее ослабляет пиковое давление во втором случае. Наблюдаемое уменьшение скорости проходящей взрывной волны и увеличение времени нарастания подтверждают превращение взрывной волны в волну сжатия. Настоящие результаты, показывающие ослабление взрывной волны с ростом толщины пены, противоположны результатам [12]. В [18] такое поведение объяснялось различной формой волны нагрузки, поскольку затухание волны происходит за счет догоняющей волны разрежения [15]. В такой конфигурации опытов значения импульсов увеличиваются с добавлением пены. Так, при использовании двойного слоя пены импульс увеличился примерно на 27 %. Поскольку в этой конфигурации наблюдалось усиление избыточного дав-

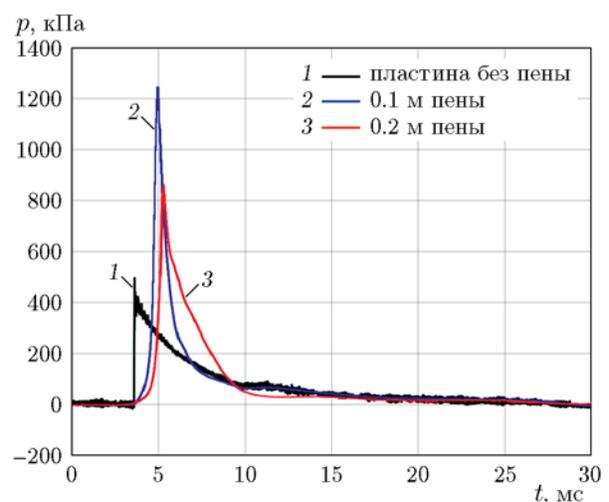


Рис. 5. Профили взрывного давления, прошедшего через каучковую пену. Генератор взрывной волны конфигурации 1:

давление нагрузки соответствует массе ВВ 0.25 кг в полевых испытаниях

ления через пену, испытания при более высоких давлениях (эквивалент 0.55 кг ВВ) не проводились.

2.3. Тесты с генератором взрывной волны конфигурации 2

Профили избыточного давления, прошедшего через один и два слоя пены, показаны на рис. 6. Слои пены располагались на конце трубы таким образом, чтобы границы пены могли свободно выпускать захваченный воздух, аналогично тому, как это происходит в полевых испытаниях. В этом случае падающее на пену давление не повышается и давление взрыва ослабляется при прохождении че-

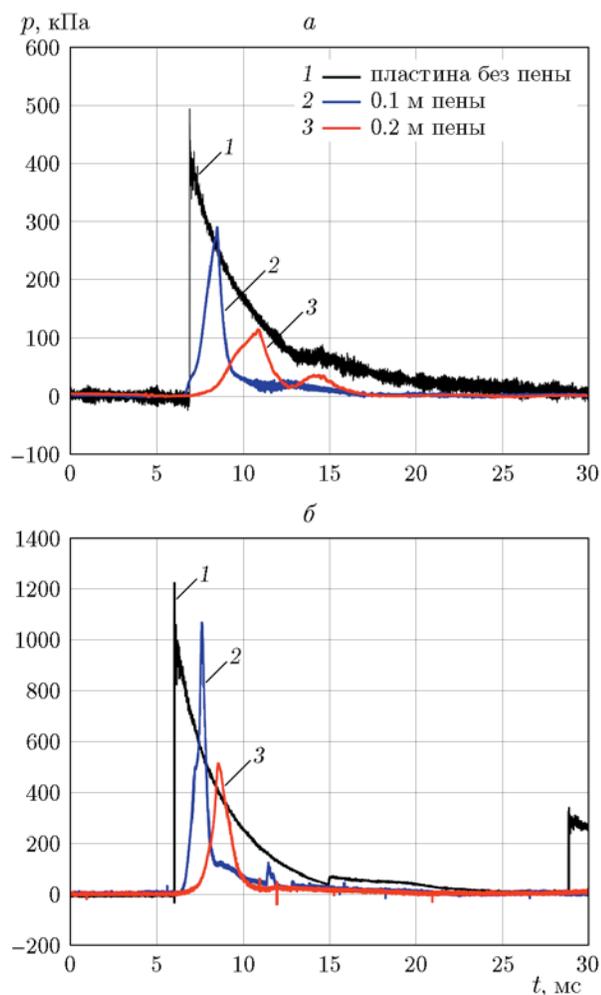


Рис. 6. Профили взрывного давления, прошедшего через каучуковую пену. Генератор взрывной волны конфигурации 2:

a — давление нагрузки соответствует массе ВВ 0.25 кг в полевых испытаниях, b — 0.55 кг

рез один или два слоя пены. Снижение передаваемого давления можно объяснить сжатием пены вследствие выпуска захваченного воздуха с открытых сторон. При давлении в падающей волне 500 кПа снижение давления при прохождении через одинарный и двойной слой пены соответствует приблизительно 42 и 77 %. Наблюдаемый эффект противоположен результатам, полученным в тестах конфигурации 1, где образцы пены удерживались внутри трубы и давление усиливалось. В тестовой конфигурации 2 импульс также уменьшается с увеличением толщины пены. При двойном слое пены наблюдалось максимальное уменьшение импульса на 77 % по сравнению с импульсом в случае открытой опорной пластины. Однако наблюдаемое значение импульса при двойном слое пены в этой конфигурации остается несколько выше, чем в полевых испытаниях. Аналогичные результаты по ослаблению давления взрыва получены при пиковой нагрузке 1227 кПа в конфигурации 2, что приблизительно эквивалентно 0.55 кг ВВ в полевых испытаниях. Зарегистрированные профили передаваемого давления взрыва показаны на рис. 6, b , снижение давления составило 13 и 58 % для одинарного и двойного слоев пены соответственно.

Снижение или усиление взрывного давления может быть выражено через коэффициент пропускания, определяемый как отношение избыточного давления прошедшей взрывной волны в опыте с пеной к избыточному давлению в случае отсутствия каучуковой пены [16, 19]. Значения коэффициента пропускания меньше единицы соответствуют уменьшению избыточного давления взрыва, а значения больше единицы — его усилению при прохождении через пену. Значения коэффициента пропускания в опытах разных конфигураций и при различных амплитудах волны нагрузки приведены в таблице.

Из таблицы видно, что хотя в тестовой конфигурации 2 достигнуто снижение давления взрыва, но оно меньше по сравнению с испытаниями на открытом воздухе. Чтобы изучить влияние других параметров взрывной волны, на рис. 7 сравниваются профили волны, полученные в ГВВ и в полевых испытаниях. Хорошо видно, что спад во времени взрывной волны, созданной ГВВ, отличается от экспоненциального спада в полевых испытаниях. Это вызвано тем, что в тестах с ГВВ импульс волны

Коэффициенты пропускания
в тестах различных конфигураций

| Конфигурация теста | Толщина пены, м | Коэффициент пропускания при интенсивности волны нагрузки (кПа) | |
|------------------------|-----------------|--|--------|
| | | ≈500 | ≈1 200 |
| Полевое испытание с ВВ | 0.1 | 0.19 | 0.17 |
| | 0.2 | 0.17 | 0.10 |
| ГВВ, конфигурация 1 | 0.1 | 2.52 | * |
| | 0.2 | 1.74 | * |
| ГВВ, конфигурация 2 | 0.1 | 0.59 | 0.87 |
| | 0.2 | 0.23 | 0.42 |

*Тестирование не проводилось.

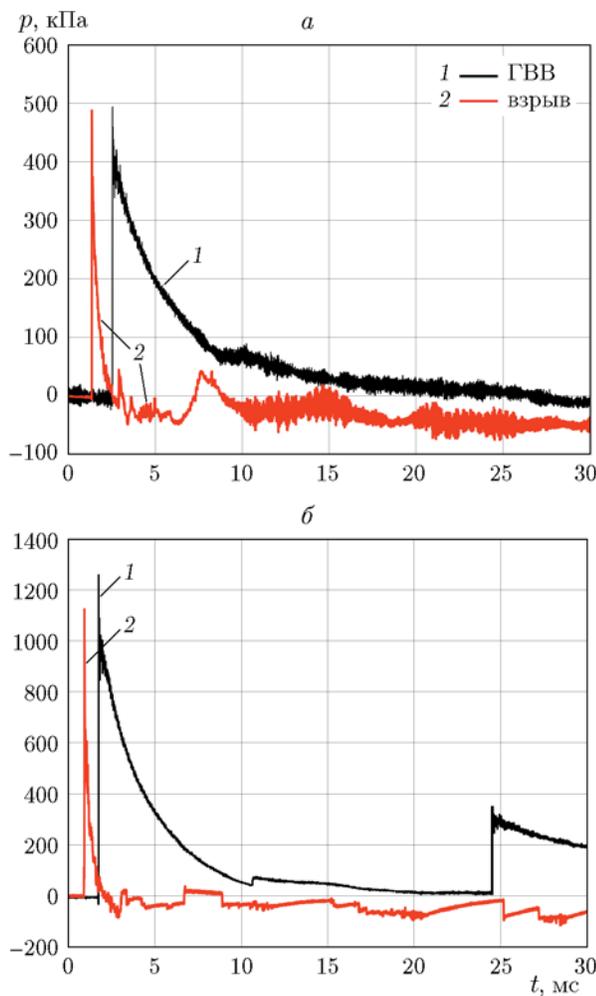


Рис. 7. Профили давления в генераторе взрывной волны и в полевых испытаниях с массой ВВ 0.25 (а) и 0.55 кг (б)

значительно больше, чем в полевых испытаниях. Это также может быть причиной меньшего ослабления давления взрыва и немного более высоких импульсов в экспериментах с ГВВ в конфигурации 2 по сравнению с полевыми испытаниями.

Пиковые значения давления, передаваемого через один и два слоя пены в ГВВ конфигураций 1 и 2, а также в полевых испытаниях с ВВ массой 0.25 кг, показаны на рис. 8. Видно, что передаваемое давление усиливается, если образец пены удерживается внутри трубы, и, наоборот, давление ослабевает, если образец расположен вне трубы, т. е. имитирует конфигурацию полевых испытаний. Кроме того, передаваемое давление уменьшается с увеличением толщины пены, такой же тенденции следует импульс. Исследование показало, что на передаваемое взрывное давление влияют как граничные условия испытываемого образца в ГВВ, так и форма взрывной волны нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовалось изменение давления и импульса взрыва в образцах пены из натураль-

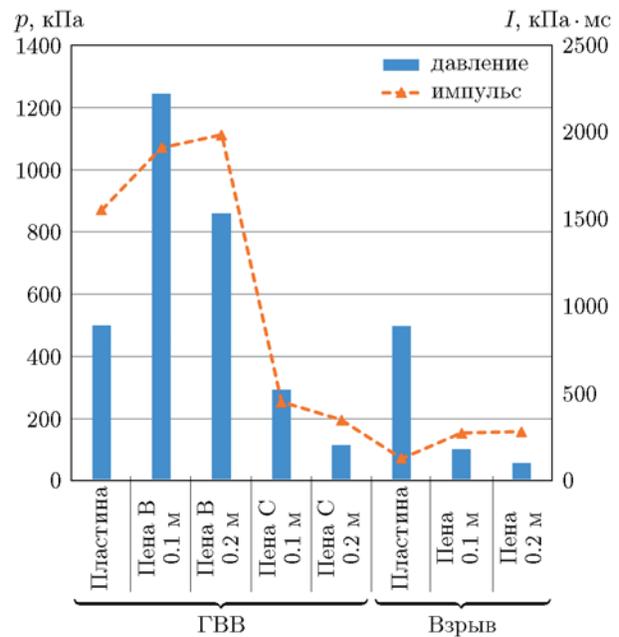


Рис. 8. Давление и импульсы, прошедшие через пену, в зависимости от ее положения внутри (В) и снаружи (С) генератора взрывных волн в сравнении с результатами полевых испытаний

ного каучука в генераторе взрывных волн и в полевых испытаниях. При размещении образца пены внутри генератора взрывной волны наблюдалось усиление передаваемого давления, но с увеличением толщины пены усиление ослабевало. Эффект усиления давления в пене совпадает с наблюдениями других исследователей, однако снижение давления с увеличением толщины пены противоположно тому, о чем сообщалось ранее. Это явление может быть связано с отличием профиля нагружающего импульса в нашем случае от временной зависимости давления в других работах, что приводит к иному механизму ослабления волны.

Изменение конфигурации генератора взрывной волны путем размещения образца пены вне трубы позволило создать условие открытой границы, аналогичное взрыву на открытом воздухе. В этой конфигурации не происходило начального усиления давления и ослабление давления взрыва наблюдалось как с одним, так и с двумя слоями пены. Меньшее ослабление давления взрыва, чем в полевых испытаниях, может быть связано с более высоким импульсом взрывной волны нагрузки. Однако значения импульса через двойной слой пены сопоставимы с полученными в полевых испытаниях. Результаты экспериментов с использованием генератора взрывных волн показали, что передаваемое через пену давление зависит от положения материала в генераторе, причем в случае конфигурации 2 результаты имеют больше сходства с полученными в полевых испытаниях и могут быть использованы для исследования ослабления воздействий взрыва. Тем не менее полевые испытания необходимы, поскольку они позволяют наблюдать за истинным уменьшением давления и изменением импульса, которые также зависят от профиля волны нагрузки.

Авторы выражают искреннюю благодарность доктору Манджиту Сингху, директору Баллистической исследовательской лаборатории, Чандигарх, за его поддержку и любезное разрешение опубликовать эту работу. Авторы также благодарны сотрудникам Отдела исследований взрывов и повреждений и Баллистической исследовательской лаборатории за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Langdon G. S., Rossiter I. B., Balden V. H., Nurick G. N.** Performance of mild steel perforated plates as a blast wave mitigation technique: Experimental and numerical investigation // *Int. J. Impact Eng.* — 2010. — V. 37, N 10. — P. 1021–1036.
2. **Berger S., Sadot O., Ben-Dor G.** Experimental investigation on the shock-wave load attenuation by geometrical means // *Shock Waves.* — 2010. — V. 20. — P. 29–40.
3. **Britan A., Igra O., Ben-Dor G., Shapiro H.** Shock wave attenuation by grids and orifice plates // *Shock Waves.* — 2006. — V. 16. — P. 1–15.
4. **Гоел М. Д., Альтенхофер Ф., Матсагар В. А., Гупта А. К., Мундт К., Марбург Ш.** Взаимодействие ударной волны с металлической алюминиевой пеной с закрытой пористостью // *Физика горения и взрыва.* — 2015. — Т. 51, № 3. — С. 98–105.
5. **Kazemi-Kamyab V., Subramaniam K., Andreopoulos Y.** Stress transmission in porous materials impacted by shock waves // *J. Appl. Phys.* — 2011. — V. 109. — 013523. — P. 1–18.
6. **Larsen M. E.** Aqueous foam mitigation of confined blasts // *Int. J. Mech. Sci.* — 1992. — V. 34, N 6. — P. 409–418.
7. **Bakken J., Slungaard T., Engebretsen T., Christensen S. O.** Attenuation of shock waves by granular filters // *Shock Waves.* — 2003. — V. 13. — P. 33–40.
8. **Daraio C., Nesterenko V. F., Jin S., Wang W., Rao A. M.** Impact response by a foamlike forest of coiled carbon nanotubes // *J. Appl. Phys.* — 2006. — V. 100, N 6. — P. 1–4.
9. **Petel O. E., Jette F. X., Goroshin S., Frost D. L., Ouellet S.** Blast wave attenuation through a composite of varying layer distribution // *Shock Waves.* — 2011. — V. 21. — P. 215–224.
10. **Ben-Dor G., Mazor G., Cederbaum G., Igra O., Sorek S.** The enhancement of shock wave loads by means of porous media // *Proc. 18th Int. Symp. on Shock Waves.* — 1991. — P. 279–182.
11. **Kitagawa K., Takayama K., Yasuhara M.** Attenuation of shock waves propagating in polyurethane foams // *Shock Waves.* — 2006. — V. 15. — P. 437–445.
12. **Seitz M. W., Skews B. W.** Effect of compressible foam properties on pressure amplification during shock wave impact // *Shock Waves.* — 2006. — V. 15. — P. 177–197.
13. **Skews B. W.** The reflected pressure field in the interaction of weak shock waves with a compressible foam // *Shock Waves.* — 1991. — V. 1, N 3. — P. 205–211.

14. **Gvozdeva L. G., Faresov Yu. M., Fokeev V. P.** Interaction of air shock waves with porous compressible materials // J. Appl. Mech. Tech. Phys. — 1985. — V. 26, N 3. — P. 401–405.
15. **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. — P. 55–67.
16. **Gelfand B. E., Silnikov M. V., Chernyshov M. V.** Modification of air blast loading transmission by foams and high density materials // Proc. 26th Int. Symp. on Shock Waves. — 2007. — P. 103–108.
17. **Kleine H., Diaconescu G., Lee J.** Blast-wave propagation in foam // Proc. 20th Int. Symp. on Shock Waves. — 1996. — P. 1351–1356.
18. **Makris A., Frost D. L., Nerenberg J., Lee J. H. S.** Attenuation of blast wave with a cellular material // Proc. 20th Int. Symp. on Shock Waves. — 1996. — P. 1387–1392.
19. **Sandhu I. S., Kala M. B., Thangadurai M., Singh M., Alegaonkar P. S., Saroha D. R.** Experimental study of blast wave mitigation in open cell foams // Mater. Today: Proc. — 2018. — V. 5. — P. 28170–28179.
20. **Igra O., Falcovitz J., Houas L., Jourdan G.** Review of methods to attenuate shock / blast waves // Prog. Aerosp. Sci. — 2013. — V. 58. — P. 1–35.
21. **Kumar C. S., Takayama K., Reddy K. P. J.** Shock Waves Made Simple. — New Delhi: Wiley India Private Limited, 2014.
22. **Gelfand B. E., Bartenev A. M., Medvedev S. P., Polenov A. N., Khomik S. V., Lenartz M., Grönig H.** Specific features of incident and reflected blast waves // Shock Waves. — 1994. — V. 4, N 2. — P. 137–143.
23. **Sandhu I. S., Sharma A., Prince, Singh M. K., Kumari R., Alegaonkar P. S., Saroha D. R.** Study of blast wave pressure modification through rubber foam // Procedia Eng. — 2017. — V. 173. — P. 570–576.
24. **Chandra N., Ganpule S., Kleinschmit N. N., Feng R., Holmberg A. D., Sundaramurthy A., Selvan V., Alai A.** Evolution of blast wave profiles in simulated air blasts: experiment and computational modelling // Shock Waves. — 2012. — V. 22. — P. 403–415.
25. **Courtney A. C., Andrusiv L. P., Courtney M. W.** Oxy-acetylene driven laboratory scale shock tubes for studying blast wave effects // Rev. Sci. Instrum. — 2012. — V. 83, N 4. — 045111.
26. **Courtney M. W., Courtney A. C.** Note: A table-top blast driven shock tube // Rev. Sci. Instrum. — 2010. — V. 81, N 12. — 126103.
27. **Ram O., Sadot O.** Implementation of the exploding wire technique to study blast-wave-structure interaction // Exp. Fluids. — 2010. — V. 53. — P. 1335–1345.
28. **Skews B. W.** Shock wave impact on porous materials // Shock Waves @ Marseille III / R. Brun, L. Z. Dumitrescu (Eds). — Berlin; Heidelberg: Springer, 1995. — P. 11–20.
29. **Nandagopan O. R., Azeez S. A., Nandakumar C. G.** Response of dome-enclosed box-type structure to underwater explosion // Def. Sci. J. — 2013. — V. 63, N 4. — P. 381–385.
30. **Ramajeyathilagam K., Vendhan C. P., Rao V. B.** Experimental and numerical investigations on deformation of cylindrical shell panels to underwater explosion // Shock Vib. — 2001. — V. 8. — P. 253–270.

Поступила в редакцию 14.11.2018.

После доработки 30.01.2019.

Принята к публикации 20.02.2019.
