

Разработка модели защитного барьера для снижения взрывной нагрузки от ударной волны на здания и сооружения



Е.Е. Невская,
канд. техн. наук, ст. науч.
сотрудник,
e.nevskaya@safety.ru



Е.В. Глебова,
д-р техн. наук, проф., зав.
кафедрой



А.Т. Волохина,
д-р техн. наук, доцент,
зам. зав. кафедрой



Е.Е. Фомина,
канд. техн. наук, доцент,
зам. зав. кафедрой

АНО «Агентство исследований
промышленных рисков»,
Москва, Россия

ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина», Москва, Россия

Рассмотрен способ уменьшения величины взрывной нагрузки на здания и сооружения от падающей ударной волны при реализации сценариев аварийных взрывов на объектах нефтегазовой отрасли путем создания защитного барьера. Предложена конфигурация нового устройства защиты от взрыва в виде поочередно расположенных преград, представляющего собой несколько экранов, расположенных лабиринтным образом, усиленных слоем диссипативных вставок из легкого пористого материала. Экспериментально исследованы энергопоглощающие свойства различных пористых материалов. С помощью методов численного моделирования проведена оценка эффективности использования многослойных экранов из стальных листов в комбинации со слоем диссипативных вставок в качестве средства защиты от взрывных волн и локализации их действия в условиях существующей плотной застройки территории опасных производственных объектов.

Ключевые слова: авария, топливно-воздушная смесь, взрыв, избыточное давление, динамическая нагрузка, защитный барьер, attenuator ударной волны взрыва.

DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-57-65

Введение

В последние десятилетия на объектах нефтегазовой отрасли зафиксировано значительное число аварий, сопровождающихся взрывами топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах. Расположение зданий и сооружений в непосредственной близости от технологических линий, в которых обращаются опасные вещества, предопределяет необходимость обеспечения защиты персонала, постоянно находящегося в помещении, от воздействия ударной волны (УВ) при возможных аварийных взрывах на технологических объектах с учетом зон разрушения. Значительное число травм и человеческих жертв связано с частичным обрушением строительных конструкций или разрушением здания при воздействии избыточного давления, которым сопровождаются детонационные и дефлаграционные взрывы. Нагрузки на элементы сооружений возникают в результате взаимодействия с ними УВ.

При встрече УВ с жесткой преградой происходит ее отражение, и навстречу падающей волне начинает распространяться волна отраженная. Давление на преграду при этом увеличивается более чем вдвое, так как сверх давления сжатого в волне воздуха воздействует заторможенный поток воздуха за фронтом, создающий добавочный скоростной напор. Исходя из этого, в целях минимизации ущерба при аварийных взрывах необходимо обеспечить устойчивость основных строительных конструкций при воздействии на них взрывных нагрузок. Сохранение устойчивости зданий при взрыве в значительной мере гарантирует безопасность людей, находящихся в здании в момент взрыва.

Создание модели защитного барьера

Одно из эффективных средств защиты от воздействия взрыва — возведение на пути действия УВ защитной преграды. Установлено, что наибольшей эффективностью в снижении ударной нагрузки обла-

дают газопроницаемые преграды или экраны [1]. При прохождении УВ через слои газопроницаемого экрана уменьшается давление на ее фронте и изменяется профиль волны. При интенсивных взрывных воздействиях конструкция такого защитного экрана может испытывать деформации, в том числе необратимые. В работе [2] установлено: «...при действии ударно-волновой нагрузки на конструкцию с пористыми сжимаемыми покрытиями изменяется характер нагружения. В отсутствие пористого покрытия конструкция нагружается квазистатически, а наличие покрытия приводит к возникновению импульсной составляющей, которую необходимо учитывать в расчетах на прочность».

Размещение экранов из сильнопористых материалов на поверхности защищаемых конструкций при воздействии на них УВ может приводить как к уменьшению, так и увеличению максимального давления нагружения. Соответствующие экспериментальные данные приведены в таблице [3, 4]. Согласно результатам экспериментов установлено, что применение экранов из низкоплотного поролон толщиной до 70 мм приводит к увеличению амплитуды отраженной от преграды УВ. Для ослабления УВ необходимы экраны толщиной 100–150 мм.

Состав экрана	Толщина экрана, мм	Максимальное давление, МПа	Длительность фазы сжатия УВ, мкс	Коэффициент отражения УВ от пористого экрана
Экрана нет	0	5,80	225	1,00
Поролон, плотность 40 кг/м ³	30,0	13,00	128	2,24
	50,0	9,30	100	1,60
	60,0	8,60	240	1,48
	70,0	7,60	630	1,31
	100,0	1,92	1060	0,33
	150,0	1,12	1260	0,19
Древесная стружка, плотность 170 кг/м ³	60,0	1,14	—	0,20
Древесная стружка, плотность 183 кг/м ³	60,0	1,60	—	0,28
Древесная стружка, плотность 260 кг/м ³	60,0	0,90	—	0,16
Один слой: сталь (4 мм) + поролон (60 мм)	64,0	0,28	2160	0,05
Два слоя: сталь (2,5 мм) + поролон (60 мм)	65,0	0,58	5000	0,10
Три слоя: сталь (2,5 мм) + поролон (30 мм)	97,5	0,65	2690	0,11

В результате воздействия УВ пористый материал ускоряется и уплотняется. Приобретенную материалом экрана скорость u_1 для треугольного профиля давления падающей УВ в первом приближении можно оценить с помощью зависимости:

$$u_1 = k_{r1} P_+ \tau_+ / (2\rho_0 L), \quad (1)$$

где k_{r1} — коэффициент отражения УВ от пористого экрана; P_+ — амплитуда фазы сжатия, Па; τ_+ — длительность фазы сжатия УВ, с; ρ_0 — начальная плотность материала экрана, кг/м³; L — толщина пористого экрана, м.

Нагружение защищаемой конструкции происходит в результате торможения на ее поверхности

уплотненного экрана. Возникающее при этом максимальное давление P_{\max} в акустическом приближении можно определить из соотношения:

$$P_{\max} = \rho_1 u_1 c = \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{k_{r1} P_+ \tau_+ c}{2L}, \quad (2)$$

где ρ_1 — плотность уплотненного материала экрана, кг/м³; c — скорость звука в уплотненном материале экрана, м/с.

Сравнить давление P_{\max} с давлением P_r отраженной от поверхности конструкции УВ в отсутствие экрана можно с помощью коэффициента k :

$$k = \frac{P_{\max}}{P_r} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{k_{r1} \tau_+ c}{k_{r2} 2L}, \quad (3)$$

где k_{r2} — коэффициент отражения УВ от жесткой преграды, $k_{r2} = P_r/P_+$. В зависимости от параметров нагружающей УВ и характеристик экрана коэффициент k может быть как больше (усиление УВ), так и меньше единицы (ослабление УВ).

Критическую толщину экрана L_{cr} (начиная с которой экран ослабляет УВ) можно найти из предыдущего соотношения, приняв $k = 1$:

$$L_{cr} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{k_{r1} P_+ \tau_+ c}{k_{r2} 2}. \quad (4)$$

Согласно полученной зависимости критическая толщина экрана линейно зависит от длительности фазы сжатия УВ τ_+ . Этот вывод подтверждается экспериментальными данными, полученными в работах [1–3]: при увеличении значения τ_+ со 130 до 1300 мкс значение L_{cr} возрастает с 87 до 850 мм. Что касается зависимости критической толщины экрана от амплитуды УВ, то она оказывается нелинейной: при увеличении амплитуды УВ в 10 раз значение L_{cr} возрастает примерно в 6 раз.

Хорошими защитными свойствами обладают многослойные экраны из стального листа и слоя по-

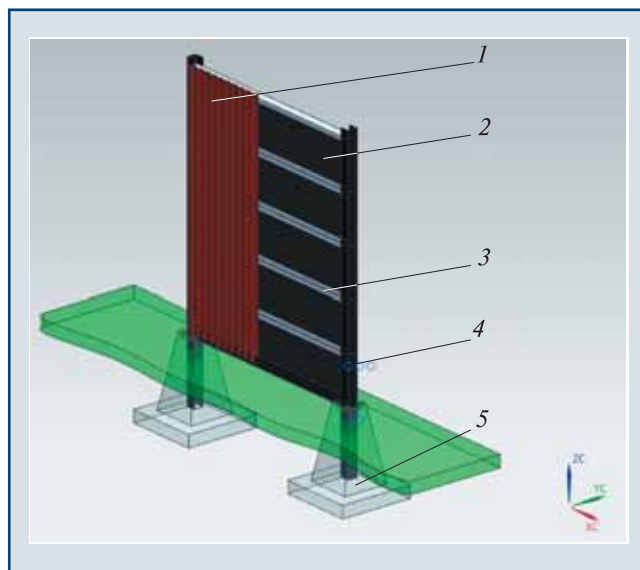
ролона (см. таблицу). Они существенно уменьшают максимальное давление нагружения и увеличивают длительность фазы сжатия УВ. Это обстоятельство позволяет в некоторых случаях трансформировать нагрузку на конструкцию из импульсной ($T \gg \tau_+$, где T — период собственных колебаний конструкции) в квазистатическую ($T < \tau_+$) и тем самым повысить взрывоустойчивость конструкции [4].

В работе [5] при решении задачи об отражении УВ в пористом упругопластическом материале обнаружены режимы, при которых не возникает отраженная УВ. В этом случае вся энергия падающей УВ переходит в тепловую энергию за счет диссипации при вязком затекании пор [6].

Ключевой стратегией уменьшения последствий взрыва при таком способе защиты будет создание защитного устройства в виде комбинированного гасителя: «Аттенюатор ударной волны взрыва» [7]. Главная функция аттенюатора — снижение взрывной нагрузки за счет поглощения им энергии УВ. Термин «устройство» в данном случае употреблен в значении конструкции с определенным расположением входящих в нее элементов, их соотношения.

Устройство аттенюатора ударной волны взрыва (АУВВ) представляет собой защитный барьер — стену вокруг сооружения, которая помогает рассеивать энергию, а также увеличивает дистанцию противостояния от взрывоопасной угрозы и таким образом либо полностью устраняет, либо снижает давление, вызванное взрывом. Конструкция защитного устройства — многослойная модель сварных стальных перегородок, состоящих из балочных профилей и стальных листов, покрытых слоем из диссипативных вставок, формирующих собой энергопоглощающий одиночный экран. Энергопоглощающий экран — гаситель из стального листа, усиленный слоем диссипативных вставок (легкие, пористые материалы), обеспечивающих при его прохождении снижение давления на неотраженной части фронта УВ. По своей конфигурации модель АУВВ представляет пространственную конструкцию с лабиринтным расположением одиночных энергопоглощающих экранов. Конструкция АУВВ представлена на рис. 1 (здесь 1 — профильный стальной лист; 2 — базальтовая вставка; 3 — стальной швеллер; 4 — каркасные ребра жесткости; 5 — поддерживающий бетонный блок основания).

За счет разрушения попеременно расположенных экранов происходит преобразование энергии взрывной волны в энергию упругопластического деформирования, и таким образом после прохождения взрывной волной защитной конструкции уменьшается давление на ее фронте. Иными словами, пластические деформации каждого экрана обеспечивают достаточную ударную вязкость для поглощения энергии взрыва. За счет демпфирующих свойств поглощающего материала в слое диссипативных вставок ослабляется амплитуда давления,



▲ Рис. 1. Конструкция АУВВ
▲ Fig. 1. Design of shock wave attenuator

ввиду чего значительно снижается ударное нагружение на конструкцию, по совокупности двух факторов обеспечивается устойчивость здания и, как следствие, безопасность персонала.

Опытом предыдущих исследований установлено, что при изучении звуковых волн, догоняющих ударную вместе с энтропийными и вихревыми возмущениями, наблюдается эффект усиления УВ за счет относительно слабых звуковых волн [8–11]. В работе [12] экспериментально установлено, что вблизи критического угла падения амплитуда колебаний УВ под действием акустических возмущений достигает максимальных значений. Вышеуказанные утверждения и известные положения об уменьшении амплитуды УВ на расстояниях и ее переходе в слабый (звуковой) сигнал [13] подчеркивают целесообразность применения на последующих стенках гасителя методов энергопоглощения, используемых в технической акустике. Далее подробнее рассмотрим энергопоглощающие свойства диссипативных вставок.

Исследования эффективности диссипативных вставок

При создании модели комбинированного глушителя шума энергетических установок [14] экспериментально исследованы свойства различных видов диссипативных вставок. Исследования проводились на экспериментальной установке, генерирующей искусственный (белый) шум в широком диапазоне частот. Схема стенда экспериментальной установки и его общий вид представлены на рис. 2 (здесь 1 — генератор белого шума; 2 — громкоговоритель; 3 — звукопоглощающая вставка; 4 — резонатор Гельмгольца; 5 — микрофон; 6 — усилитель микрофонный; 7 — третьоктавный фильтр).

Комбинированный глушитель шума содержит цилиндрический корпус большего диаметра, чем газозвдушный канал, ограничен торцевыми стен-

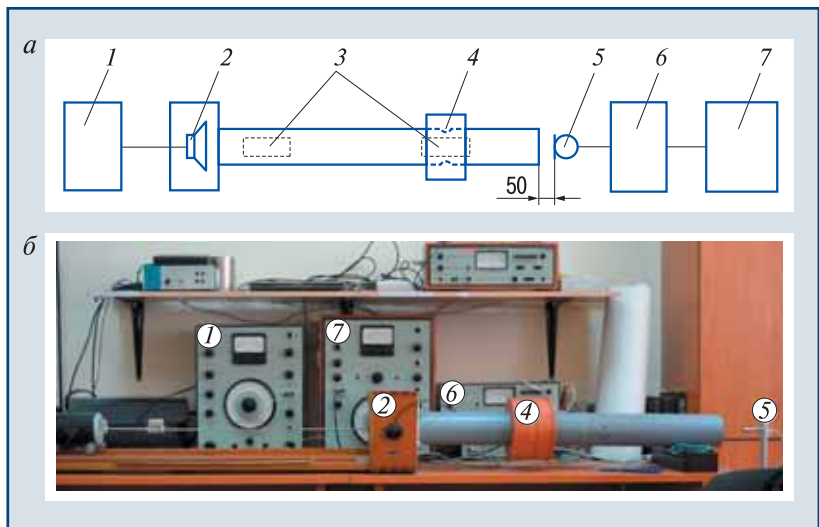
ками. Образовавшаяся полость разделена поперечными перегородками, и возникшие таким образом камеры (две и более) соединяются с пространством канала поясками отверстий, которые образуют последовательный ряд резонаторов Гельмгольца, и в сечении поясков отверстий каждого резонатора располагаются соосно в канале цилиндрические диссипативные вставки из листового перфорированного материала, заполненные звукопоглощающим материалом. В конструкции комбинированного глушителя шума для расширения частотного диапазона глушения предлагается располагать соосно в газовоздушном канале в сечении «горла резонатора» цилиндрические диссипативные вставки, выполненные из перфорированного листового материала (с коэффициентом перфорации больше 0,2) и заполненные звукопоглощающим материалом.

Экспериментально проверены вставки трех видов, отличающиеся по размерам и звукопоглощающему материалу. Звукопоглощающий материал выбран исходя из значений коэффициента звукопоглощения α . Эффективность звукопоглощения тем больше, чем ближе значение коэффициента звукопоглощения к единице [7].

В состав экспериментальной модели входит резонаторная камера. Резонатор был рассчитан на частоту f , равную 320 Гц, камера имела объем 0,0026 м³, горло резонатора содержало 10 отверстий диаметром 10 мм. Вставка, установленная около громкоговорителя из базальтового волокна, служит для снижения влияния отраженной звуковой волны от открытого конца на громкоговоритель. Результаты эксперимента по исследованию эффективности диссипативных вставок из поролона и базальтового волокна различных диаметров приведены на рис. 3. На графиках отображено изменение уровня звукового давления (УЗД) в широком диапазоне частот без вставок (желтый цвет, гладкая труба) и для вставок из базальтового волокна (синий цвет), из базальтового волокна меньшего размера (зеленый цвет), из поролона (красный цвет).

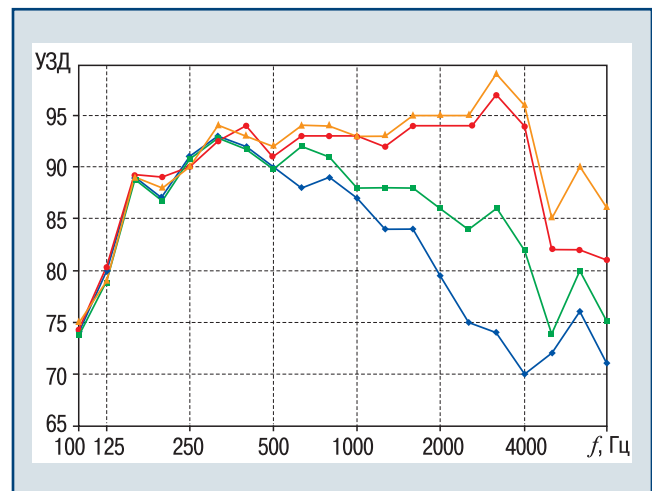
Результаты эксперимента показывают, что на низких и близких к средним частотам эффективность вставок из поролона и базальтового волокна практически одинакова. Однако на средних и высоких частотах диссипативная вставка из базальтового волокна большего размера обладает наибольшей эффективностью, а значит, наилучшими свойствами в диссипации энергии.

Кроме того, проведено численное моделирование процесса диссипации энергии при использовании вставок из базальтового волокна. Метод конечно-



▲ Рис. 2. Схема стенда экспериментальной установки (а) и его общий вид (б)

▲ Fig. 2. Scheme of the pilot unit bench (a) and its general view (b)



▲ Рис. 3. Кривые изменения звукового давления в широком диапазоне частот

▲ Fig. 3. The curves of changes of the sound pressure in the wide range of frequencies

элементного моделирования позволяет представить дискретное пространство в виде конечного числа элементарных объемов.

Исследования проводились с использованием двух программных комплексов ANSYS (Ansys inc.) и SYSNOISE (LMS). В первом из них создавалась геометрия модели, объем которой разбивался на элементы. Затем конечно-элементная модель импортировалась в программу SYSNOISE, где назначались граничные условия и проводился непосредственно расчет при заданной нагрузке распределения звукового давления в области диссипативных вставок. В результате расчета определены значения звукового давления в канале до и после камеры резонатора со вставками из звукопоглощающего материала, по которым вычислены значения потерь передачи звуковой энергии в канале во всем рассматриваемом

диапазоне частот. Цветовые схемы распределения звукового давления в сечении резонатора приведены на рис. 4.

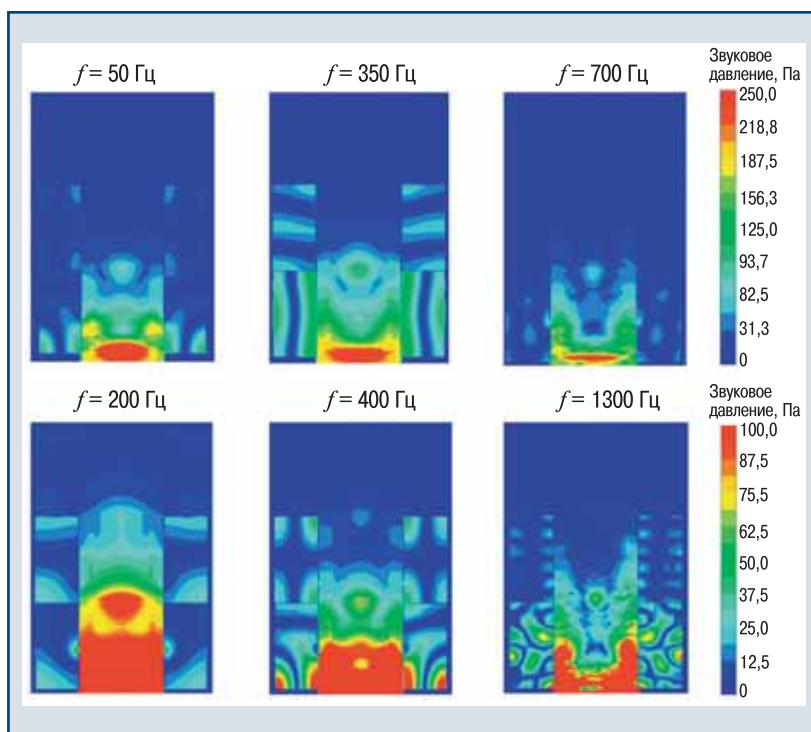
Таким образом, экспериментально и с помощью методов численного моделирования проведено исследование свойств диссипативных материалов, способных перевести энергию звуковой волны в тепловую энергию в результате трения частиц воздуха о поверхность пористого материала. Диссипативная вставка из базальтового волокна обладает наилучшими диссипирующими свойствами — относительно поролона на 22 %, коэффициент поглощения относительно поролона при этом составляет 0,77. Такие результаты подтверждают целесообразное применение в конструкции АУВВ вставки из базальтового волокна.

Оценка эффективности аттенюатора ударной волны взрыва

В целях оценки адекватности предложенной конфигурации взрывозащитного гасителя проведено численное моделирование взаимодействия ударной волны с АУВВ. С помощью программного комплекса FLACS (CMR Gexcon), предназначенного для 3D-моделирования последствий аварий с выбросом опасных веществ, рассчитан сценарий взрыва облака пропана в условиях сильного загромождения пространства.

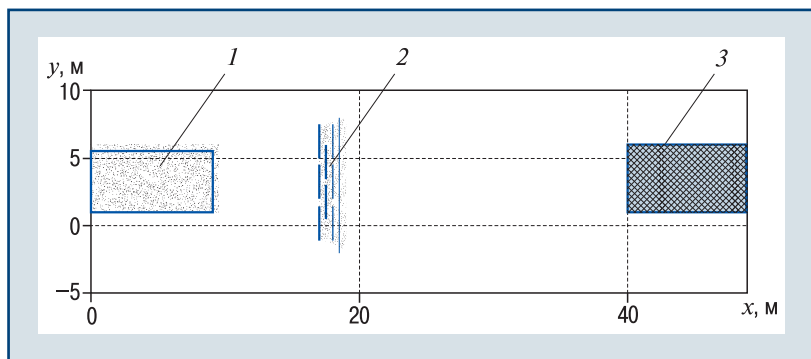
Сценарий взрыва облака моделировался в аварийном модуле с размерами в плане 9×4,5×4,5 м, который находится на открытом пространстве. В 40 м от взрывоопасного модуля располагается здание операторной, размеры которого 9×6×4,6 м. Схема расположения в координатах расчетной сетки взрывоопасного модуля, АУВВ (четыре слоя) и здания операторной представлена на рис. 5 (здесь 1 — аварийный модуль; 2 — АУВВ; 3 — здание операторной). Внутри модуля размещено 40 труб, моделирующих загроможденность пространства. Толщина стен модуля 0,02 м, на передней стороне модуля по центру имеется вентиляционное отверстие размером 3,18×3,18 м, через которое будет выходить волна давления. В препроцессоре расчетного модуля задаются условные датчики, фиксирующие значения избыточного давления, импульса и числа Маха в определенных пространственных точках на пути движения УВ.

Рассмотрим результаты численного моделирования воздействия УВ на здание операторной при ре-



▲ Рис. 4. Цветовые схемы распределения звукового давления в сечении резонатора

▲ Fig. 4. Color schemes of the distribution of sound pressure in the cross section of the resonator

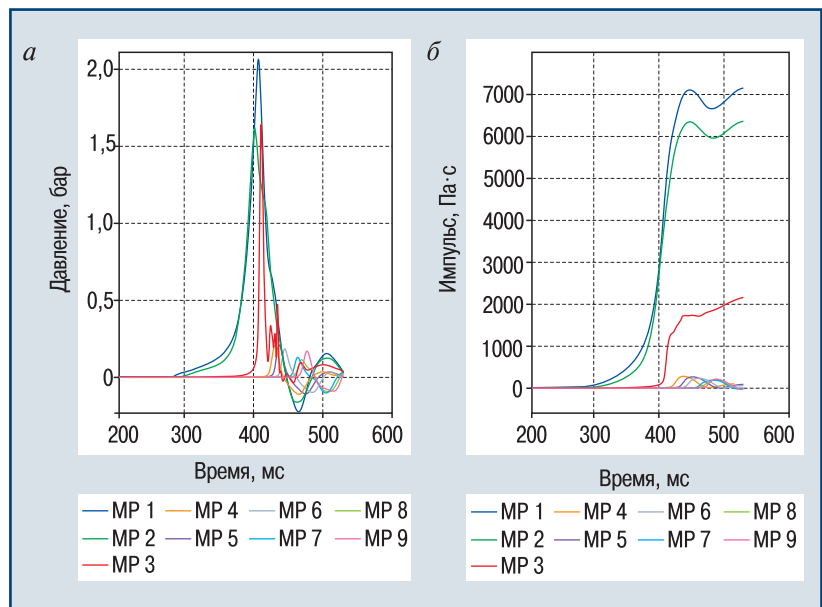


▲ Рис. 5. Схема расположения в координатах расчетной сетки взрывоопасного модуля, АУВВ (четыре слоя) и здания операторной

▲ Fig. 5. Layout in the coordinates of the blast module computational grid, shock wave attenuator (four layers) and the control building

ализации сценария взрыва облака пропана с учетом размещения защитного барьера — АУВВ — высотой 5 м на расстоянии 8 м от взрывоопасного модуля. Расстояние между экранами модуля принято 0,5 м. Рассматривается наихудший сценарий, когда концентрация взрывоопасного облака пропана равна стехиометрической, а само облако заполняет весь объем модуля. Моделирование проводилось для четырех и пяти слоев экранирующих барьеров, расположенных в лабиринтном порядке. На графиках (рис. 6) приведены результаты расчета параметров УВ (давление и импульс), полученные с помощью численного моделирования воздействия падающей УВ на фронтальную стену здания операторной при использовании АУВВ.

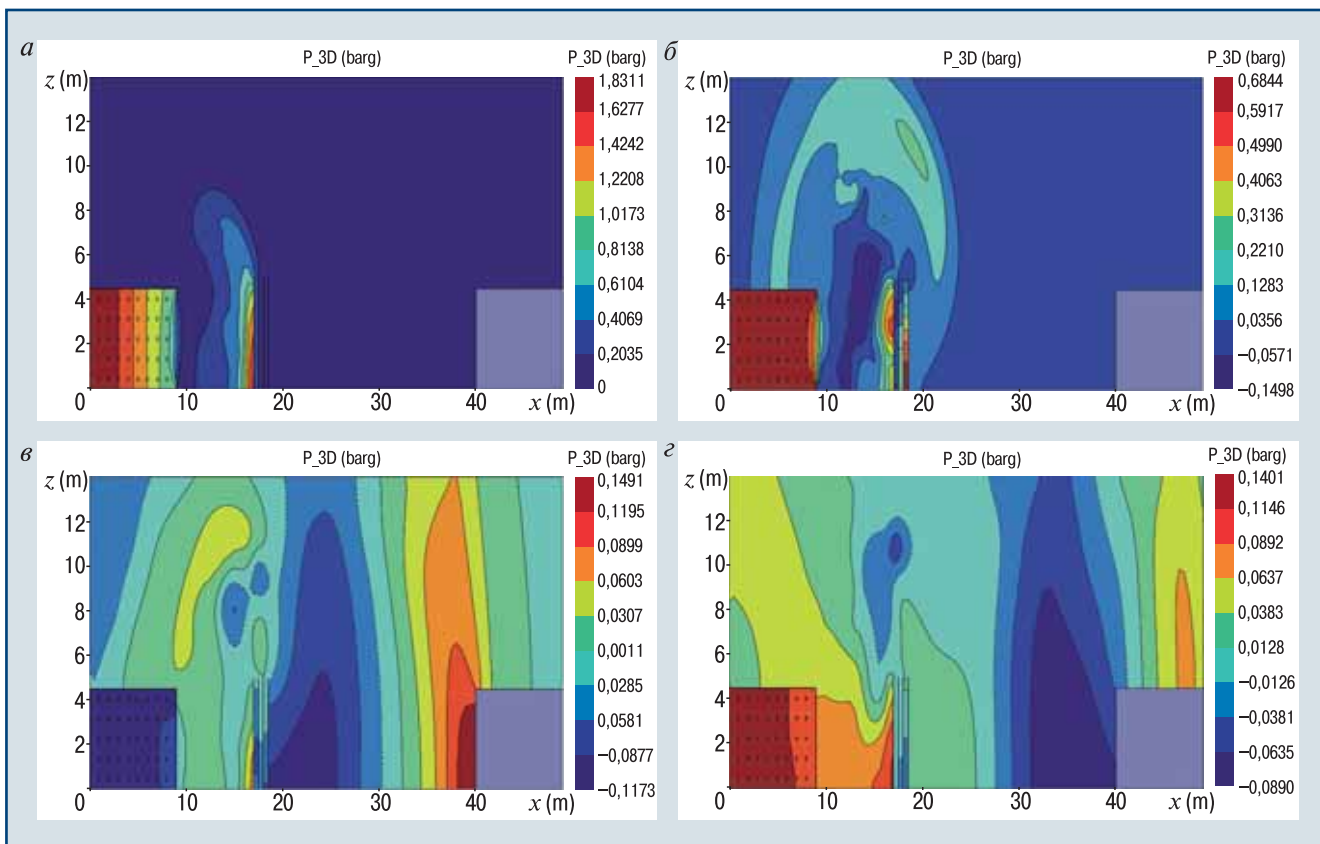
Цветовые схемы распределения максимального давления падающей УВ в зависимости от времени для четырехслойного АУВВ представлены на рис. 7 (здесь $a - 0,410$; $b - 0,425$; $c - 0,475$; $d - 0,499$ с). Так как задачи упругопластического деформирования и динамического поведения конструкции АУВВ под действием ударной нагрузки в данной задаче не рассматриваются, то степень повреждения операторной возможно оценить, используя доступный инструмент анализа, такой как « $P-I$ » «давление-импульс» диаграмма для оценки уровня разрушения промышленных зданий», как сделано в работе [7]. Давление и импульс как два параметра УВ могут использоваться в виде представления отклика конструкции на взрывное воздействие. $P-I$ -диаграмма обеспечивает надежный метод оценки отклика структурного элемента под разными продолжительностями взрывной нагрузки. В каждой области, образуемой из трех кривых $P-I$ -диаграммы, могут быть определены: импульсный, динамический и квазистатический режимы нагружения. Максимальный отклик или предел деформации структурного элемента



▲ Рис. 6. Визуализация результатов расчета давления (а) и импульса (б) в зависимости от времени при установке АУВВ

▲ Fig. 6. Visualization of the results of calculation of pressure (a) and impulse (b) as a function of time during installation of blast wave pilot unit

зависит от положения точки в одной из трех областей $P-I$ -диаграммы, в которую он попадает, исходя из значений своих параметров УВ. Импульсный режим характеризуется короткой продолжительностью на-



▲ Рис. 7. Цветовые схемы распределения избыточного давления

▲ Fig. 7. Color schemes of excessive pressure distribution

грузки, максимальный структурный отклик не достигается до истечения времени нагрузки. Динамический режим характеризуется максимальной реакцией отклика и достигается ближе к концу режима нагрузки. Квазистатический режим характеризуется достижением предельного состояния отклика структурного элемента до того, как приложенная нагрузка прекратит свое действие [15]. *P-I*-диаграмма содержит асимптоту импульса и асимптоту давления. Импульсная асимптота связана с короткой продолжительностью воздействия взрывной нагрузки относительно собственного периода колебаний элемента, в то время как асимптота давления связана с нагрузками, продолжительность которых больше, чем естественный период колебаний структурного элемента — этот вид нагружения принято считать квазистатическим. Импульсная асимптота представляет минимальный импульс, необходимый для достижения определенного уровня повреждений. Находясь в импульсной области, структурный элемент чувствителен только к действию импульса, а не к пиковому избыточному давлению. В квазистатической области отклик структурного элемента становится не чувствителен к импульсу, а, наоборот, чувствителен к избыточному давлению. Следовательно, горизонтальная асимптота отображает минимальный уровень пикового избыточного давления, достаточного для нарушения целостности структурного элемента [16]. Визуализация распределения максимального давления в зависимости от конкретного момента времени (0,450 и 0,475 с) представлена для пятислойного АУВВ на рис. 8.

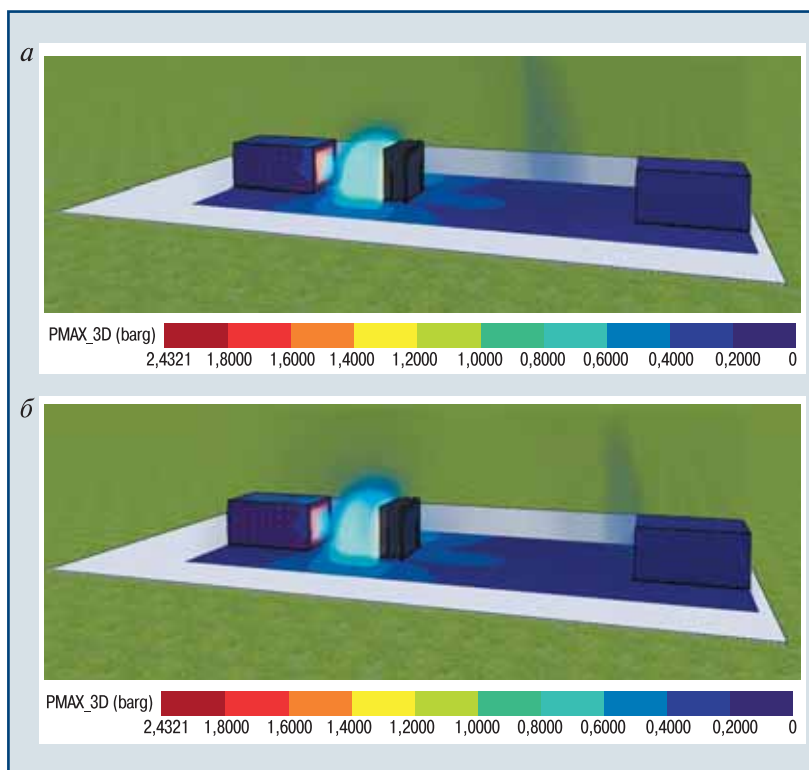
Из результатов расчетов количественных характеристик УВ, фиксируемых датчиком, который расположен на фронтальной стене операторной, видно, что при использовании АУВВ максимальное отраженное давление от фронтальной стены здания составляет 0,11 бар (11 кПа). Значение импульса волны давления составляет 218 Па·с (0,22 кПа·с). Значение избыточного давления во фронте УВ перед прохождением АУВВ также фиксируется датчиком и составляет 1,64 бар (164 кПа). Сразу после прохождения волной давления АУВВ датчиком зафиксировано избыточное давление во фронте 0,21 бар (21 кПа).

В рамках данного расчета численного моделирования воздействия УВ на здания операторной при использовании АУВВ не учитывалось влияние диссипативных вставок, входящих в конструкцию АУВВ, на параметры УВ, так как выбранный для расчета программный комплекс FLACS (CMR) не

учитывает проницаемость среды. Влияние диссипативных вставок шириной 100 мм, расположенных на каждом экране АУВВ, можно оценить, используя соотношения (1) и (2), а также учитывая коэффициент поглощения для базальтового волокна из экспериментальных данных. Таким образом, в процессе исследований установлено, что значение избыточного давления, зафиксированное на фронтальной стене здания операторной при использовании АУВВ, составит 0,018 бар (около 2 кПа). Согласно расчетам аналогичного сценария, проведенным в работе [7], максимальное отраженное давление от фронтальной стены здания без использования АУВВ составляет 0,4 бар (40 кПа).

Заключение

Рассмотрен способ уменьшения значений избыточного давления во фронте падающей ударной волны с помощью физических преград, которые представляют собой защитные экраны различной структуры. Такие защитные экраны должны быть расположены по пути действия ударной волны в непосредственной близости от источника взрыва. Показано, что многослойные экраны из стальных листов в комбинации со слоем пористого материала обладают наилучшими диссипирующими свойствами. Разработана конфигурация модели устройства по снижению интенсивности падающей ударной волны при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах в



▲ Рис. 8. 3D-визуализация распространения избыточного давления для пятислойного АУВВ на 0,475 с (а) и на 0,53 с (б)

▲ Fig. 8. 3D-visualization of excessive pressure distribution for blast wave attenuator (five-layer) at 0.475 s (a) and 0.53 s (b)

виде комбинированного гасителя — аттенюатора ударной волны взрыва. Главная функция аттенюатора — удерживать взрывную энергию от достижения ею объекта защиты. Модель аттенюатора представляет собой защитный барьер, расположенный между источником взрыва и защищаемым объектом, который служит препятствием на пути действия ударной волны и помогает рассеивать ее энергию. Конфигурация данного устройства представляет собой несколько экранов, расположенных лабиринтным образом, усиленных слоем легких энергопоглощающих материалов. Экспериментально установлено, что лучшими энергопоглощающими свойствами обладает пористый материал из базальтового волокна. С помощью численного моделирования проведена оценка эффективности разработанной конструкции аттенюатора, прогнозируемое уменьшение динамической нагрузки от действия падающей ударной волны составляет 95 %. Таким образом, мера защиты в виде аттенюатора позволяет максимально снизить величину взрывной нагрузки на здания и сооружения от действия ударной волны, вызванной внешним аварийным взрывом.

Список литературы

1. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасные эффекты взрывов. — СПб: ООО «Издательство «Полигон», 2002. — 272 с.
2. Турыгина И.А. Численное моделирование взаимодействия ударных волн с проницаемыми преградами: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Н. Новгород, 2016. — 131 с.
3. Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А. Взрывные технологии: учеб. для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. — 519 с.
4. Нестеренко В.Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. — Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1992. — 200 с.
5. Киселев С.П. Структура ударных волн сжатия в пористых упругопластических материалах// ПМТФ. — 1998. — Т. 39. — № 6. — С. 27–32.
6. Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Урманчиев С.Ф. Воздействие воздушных ударных волн на преграды, покрытые пористым слоем// Вычислительные технологии. — 2001. — Т. 6. — № 3. — С. 7–20.
7. Невская Е.Е. Повышение устойчивости зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на объектах нефтегазовой отрасли: дис. ... канд. техн. наук. — М.: РГУ (НИУ) нефти и газа им. И.М. Губкина, 2018. — 122 с.
8. Ландау Л.Д. Об ударных волнах на далеких расстояниях от места их возникновения// Прикладная математика и механика. — 1945. — Т. 9. — № 4. — С. 286–292.
9. Ландау Л.Д. Механика сплошных сред: гидродинамика и теория упругости. — М.—Л.: ОГИЗ: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1944. — 624 с.
10. Lighthill M.J. Viscosity effects in sound waves of finite amplitude// *Surveys in Mechanics*. — Cambridge: Cambridge University Press, 1956. — P. 250–351.
11. Султанов А.Ш. К акустической теории взаимодействия ударной волны с пористой средой: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Уфа, 2007. — 26 с.
12. McKenzie J.F., Westphal K.O. Interaction of linear waves with oblique shock waves// *Physics of Fluids*. — 1968. — Vol. 11. — P. 2350–2362.
13. Наугольных К.А. О переходе ударной волны в акустическую// *Акустический журнал*. — 1972. — Т. 18. — № 4. — С. 579–583.
14. Пат. 154807 Рос. Федерация. F01N 1/24 (2006.01). Комбинированный глушитель шума энергетических установок/ С.Г. Смирнов, А.С. Терехин, Е.Е. Невская, Н.С. Нестеров; заявл. 14.05.2015; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25.
15. Gebbeken N., Döge T. Explosion protection: architectural design, urban planning and landscape planning// *International Journal of Protective Structures*. — 2010. — 1 (1). — P. 1–21.
16. API Recommended practice 752. Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Permanent Buildings. — Washington, 2009. — 40 p.

e.nevskaya@safety.ru

Материал поступил в редакцию 25 июля 2019 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2019, № 8, pp. 57–65.
DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-57-65

Development of Protective Barrier Model for Reducing the Load from the Shock Wave on Buildings and Structures

E.E. Nevskaya, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Assistant, e.nevskaya@safety.ru

ANO «Industrial Risk Research Agency», Moscow, Russia

E.V. Glebova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department

A.T. Volokhina, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department Deputy Head

E.E. Fomina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department Deputy Head

FGAOU VO «RGU nefiti i gaza (NIU) im. I.M. Gubkina», Moscow, Russia

Abstract

The method is proposed concerning the reduction of the blast load on the buildings and structures from the incident blast wave when implementing scenarios of emergency explosions at the objects of oil and gas industry by creating the protective barrier. It is established that gas permeable barriers or screens have the greatest efficiency in reducing the shock loads. When the shock wave passes through the layers of the gas-permeable screen, the pressure at its front decreases and the wave profile changes. Such protective screens should be located along the path of the shock wave in the immediate vicinity from the source of the explosion. It is shown that multilayer screens made of steel sheets in combination with the layer of porous material have the best dissipative properties. Use of several protective screens can vary the parameters of the incident shock wave, which effects buildings and structures. The configuration of the device model was developed on reducing the incident shock wave intensity during explosions of fuel-air mixtures at hazardous production facilities in the form of a combined damper — attenuator of the shock wave of the explosion.

The main function of the attenuator is to reduce the blast load due to its absorption of the shock wave energy. The model of the device is a protective barrier located between the source of the explosion and the protected object, which serves as an obstacle to the effect of the shock wave and helps to dissipate its energy. Using numerical modeling, thanks to which it was possible to evaluate the efficiency of the developed design of the attenuator, the blast load, which influences the operator building during the implementation of the emergency explosion scenario, will decrease from 40 to 2 kPa. Thus, the protection measure in the form of the attenuator allows to minimize the magnitude of the blast load on the buildings and structures.

Key words: accident, fuel-air mixture, explosion, excessive pressure, dynamic load, protective barrier, shock wave attenuator.

References

1. Gelfand B.E., Silnikov M.V. Blast effects of explosions. Saint-Petersburg: OOO «Izdatelstvo «Poligon», 2002. 272 p. (In Russ.).
2. Turygina I.A. Numerical simulation of the interaction of the blast waves with the permeable obstacles: thesis... Candidate of Physical and Mathematical Sciences. N. Novgorod, 2016. 131 p. (In Russ.).
3. Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. Blast technologies: Textbook for higher education. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014. 519 p. (In Russ.).
4. Nesterenko V.F. Impulse loading of heterogeneous materials. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1992. 200 p. (In Russ.).
5. Kiselev S.P. Structure of compression blast waves in porous elastoplastic materials. *PMTF = PMTF*. 1998. Vol. 39. № 6. pp. 27–32. (In Russ.).
6. Gubaydullin A.A., Dudko D.N., Urmancheev S.F. Effect of air shock waves on the obstacles covered with a porous layer. *Vychislitelnye tekhnologii = Computational technologies*. 2001. Vol. 6. № 3. pp. 7–20. (In Russ.).
7. Nevskaya E.E. Improvement of the stability of buildings and structures during explosions of fuel-air mixtures at the objects of oil and gas industry: thesis... Candidate of Technical Science. Moscow: RGU (NIU) nefi i gaza im. I.M. Gubkina, 2018. 122 p. (In Russ.).
8. Landau L.D. On the shock waves at the far distances from the place of their occurrence. *Prikladnaya matematika i mekhanika = Applied mathematics and mechanics*. 1945. Vol. 9. № 4. pp. 286–292. (In Russ.).
9. Landau L.D. Continuum mechanics: hydrodynamics and the theory of elasticity. Moscow–Leningrad: OGIz: Gos. izd-vo tekhn.-teoret. lit., 1944. 624 p. (In Russ.).
10. Lighthill M.J. Viscosity effects in sound waves of finite amplitude. *Surveys in Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1956. pp. 250–351.
11. Sultanov A.Sh. To the acoustic theory of the interaction of the shock wave with the porous medium: Abstract of the thesis... Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Ufa, 2007. 26 p. (In Russ.).
12. McKenzie J.F., Westphal K.O. Interaction of linear waves with oblique shock waves. *Physics of Fluids*. 1968. Vol. 11. pp. 2350–2362.
13. Naugolnykh K.A. On the transition of the shock wave into the acoustic one. *Akusticheskiy zhurnal = Acoustic journal*. 1972. Vol. 18. № 4. pp. 579–583. (In Russ.).
14. Smirnov S.G., Terekhin A.S., Nevskaya E.E., Nesterov N.S. Combined silencer for power plants. Patent RF № 154807. F01N 1/24 (2006.01). Applied: May 14, 2015. Published: September 10, 2015. Bulletin № 25.
15. Gebbeken N., Döge T. Explosion protection: architectural design, urban planning and landscape planning. *International Journal of Protective Structures*. 2010. 1 (1). pp. 1–21.
16. API Recommended practice 752. Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Permanent Buildings. Washington, 2009. 40 p.

Received July 25, 2019

Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов (специализированный научный журнал)

Организационно-технические мероприятия по использованию криогелей для повышения несущей способности грунтов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта/ Л.К. Алтунина, П.В. Бурков, В.П. Бурков и др. — 2019. — № 2.

Обозначены пути повышения эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов в криолитозоне посредством увеличения несущей способности грунтов за счет применения технологии и технических средств управления их физико-химическими свойствами. На примере анализа мерзлотно-грунтовых условий северо-восточной части России показано, что проблема укрепления грунтов основания возникает практически повсеместно и требует поиска решения

для широкого набора грунтов и диапазона температур. В связи с этим вопрос повышения эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов, расположенных в криолитозоне, в частности, путем управления физико-химическими свойствами грунтов, является актуальной темой исследований как с научной, так и с практической точки зрения. Использование новых методов получения композиционных материалов на основе криогелей с регулируемыми физико-химическими свойствами позволит решить важные технические задачи в условиях многолетне-мерзлых грунтов. Предлагаемые авторами организационно-технические мероприятия включают в себя экспериментальные исследования криогелей с целью эффективного закрепления грунтов и разработку требований к закреплению грунтов с помощью криогелей при строительстве и эксплуатации объектов в криолитозоне.