

На правах рукописи



НЕВСКАЯ ЕЛЕНА ЕВГЕНЬЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ
ВЗРЫВАХ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НА ОБЪЕКТАХ
НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

Специальность: 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность
(нефтегазовый комплекс)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре «Промышленная безопасность и охрана окружающей среды» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина». Адрес: 119991, Город Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1.

Научный руководитель:	Глебова Елена Витальевна , доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», заведующая кафедрой «Промышленная безопасность и охрана окружающей среды»
Официальные оппоненты:	Васин Алексей Яковлевич , доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», профессор кафедры «Техносферная безопасность» Абдрахманов Наиль Хадитович , доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», заведующий кафедрой «Промышленная безопасность и охрана труда»
Ведущая организация:	Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - ГАЗПРОМ ВНИИГАЗ" (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Защита состоится 25 октября 2018 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 355.001.01 при Научно-техническом центре исследований проблем промышленной безопасности (ЗАО НТЦ ПБ) по адресу: 105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14.

Тел. (495) 620–47–50; эл. почта: gra@safety.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ЗАО НТЦ ПБ (<https://www.safety.ru/about/dissertation/obyavozaschite/nevskaya-elena-evgenevna-25-okt-2018>), а также на сайте ВАК при Минобрнауки России (<http://vak.ed.gov.ru>).

Отзывы на диссертацию и автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) направлять по адресу: 105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14. Копии отзывов высылать на e-mail: gra@safety.ru.

Автореферат разослан: «___» сентября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

А.И. Гражданкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия в нефтегазовом комплексе произошло значительное количество аварий со взрывами топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах (далее – ОПО), сопровождавшихся разрушением зданий и сооружений, гибелью людей. Такого вида аварии связаны, прежде всего, с обращением на предприятиях нефтегазовой отрасли пожаровзрывоопасных и горючих веществ, повышением их энергоемкости. Добыча, транспортировка, переработка, хранение, использование опасных веществ на технологических объектах предопределяет необходимость оценки опасности взрыва и устойчивости зданий и сооружений к взрывным нагрузкам и воздействиям.

Исследование воздействия ударных волн на производственные и непромышленные объекты, расположенные вблизи источника взрыва на ОПО, имеет важное значение для обеспечения промышленной безопасности, защиты людей, зданий и сооружений от воздействия взрыва. Следует отметить, что принципы предотвращения взрывов и реализация мер по смягчению последствий взрывов требуют принятия технических решений, начиная с этапа концептуального проектирования ОПО, поскольку впоследствии при эксплуатации объекта решение данного круга задач становится или крайне сложным, или практически невозможным.

Степень разработанности темы

Большинство методических подходов к вычислению и определению параметров ударной волны взрыва, воздушной волны сжатия, воздействия взрывных нагрузок на здания и сооружения были предложены и широко исследовались с середины XX в. (Зельдович Я.Б., М.А. Садовский, М.В. Бесчастнов, Б.Е. Гельфанд, С.А. Губин, А.А. Комаров, Ю.Н. Шебеко, Э.А. Грановский, H.L. Brode, J. Henrych, W. Baker и многие другие). Результаты данных исследований нашли свое отражение в существующих нормативных

документах. Дальнейшее решение вопросов количественной оценки взрывных нагрузок на здания и сооружения, расположенные за взрывозащитными барьерами, рассмотренные в настоящей диссертационной работе, дают возможность внедрения результатов работы в нормативные документы в области промышленной безопасности для обеспечения взрывобезопасности проектируемых ОПО.

Цель и задачи работы

Цель работы - повышение устойчивости зданий и сооружений, а также защищенности персонала технологических установок опасных производственных объектов нефтегазового комплекса путем разработки модели оценки воздействия взрыва на здания и сооружения, расположенные за взрывозащитными барьерами.

Указанная цель определила постановку и решение следующих основных задач:

- проанализировать данные по аварийности и производственному травматизму на объектах нефтехимии, нефтепереработки, нефтепродуктообеспечения и нефтегазодобычи для выявления общего числа аварий, произошедшие в результате взрыва, оценки причин их возникновения на ОПО;
- сравнить отечественные и зарубежные подходы к оценке параметров ударных волн и рассчитать безопасные расстояния для зданий и сооружений по критерию максимально возможной взрывной нагрузки при внешнем взрыве на примере объекта хранения сжиженных углеводородных газов;
- обобщить принципы взрывоустойчивого проектирования и основные подходы к повышению взрывоустойчивости зданий и сооружений, включая практику использования взрывозащитных барьеров;
- разработать модель анализа последствий взрывного воздействия для количественной оценки давления и импульса ударной волны при воздействии на здания и сооружения, исследовать параметры пределов деформации конструкций при взрыве с использованием взрывозащитных барьеров;

– разработать новую конфигурацию специального защитного устройства (взрывозащитного барьера), способного снизить воздействие ударной волны на здания и сооружения.

Научная новизна

- Предложена модель анализа эффектов взрыва для количественной оценки параметров воздействия взрыва на здания и сооружения, расположенные за взрывозащитными барьерами различной устойчивости.

- Разработан подход, позволяющий визуализировать степень повреждения зданий и сооружений в результате взрыва на основе результатов расчетов, полученных при использовании модели анализа эффектов взрыва.

- Разработан алгоритм подбора взрывозащитного барьера, включающий определение его конструктивных параметров, и обеспечивающий достижение определенного уровня защиты от воздействия взрывных нагрузок.

- Для снижения интенсивности падающей ударной волны на здания и сооружения разработана принципиально новая конструкция специального защитного устройства, способного уменьшить её негативное воздействие.

- Аналитическими методами и методами численного моделирования установлена эффективность использования диссипативных пористых материалов в комбинации с защитным барьером из твердых материалов при их послойном лабиринтном расположении относительно источника взрыва.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в: анализе результатов предшествующих исследований и разработок в области методов оценки воздействия ударной волны на здания и сооружения ОПО; обобщении существующих способов и средств защиты от аварийных взрывов; разработке универсальной модели анализа эффектов взрывных воздействий, оказываемых на здания и сооружения с учетом применения взрывозащитных стен; создании конфигурации защитного устройства для поглощения энергии ударной волны.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке алгоритма определения типа взрывозащитного барьера, включающего

определение его конструктивных параметров, и методики количественной оценки и визуализации воздействия взрыва на объекты за жёсткими или хрупкими взрывозащитными барьерами, которые могут быть использованы в нормативных документах в области пожарной и промышленной безопасности.

Проведенные в диссертационной работе исследования и полученные результаты, разработанная численная модель расчета параметров ударных волн за защитными барьерами могут быть использованы при проектировании защитных конструкций, предназначенных для снижения динамических нагрузок при взрывных воздействиях.

Методология и методы исследования

Теоретические исследования построены на методах и уравнениях теорий детонации, ударных волн. Для решения поставленных задач также были использованы методы сбора и обработки данных – анализ и синтез, выявление закономерностей, описание, обобщение, моделирование возникновения и развития аварий и их последствий. Для решения отдельных вопросов применялись методы численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель анализа эффектов взрыва для количественной оценки параметров воздействия взрыва на здания и сооружения, расположенные за взрывозащитными барьерами различной устойчивости.
2. Методика, позволяющая визуализировать степень повреждения зданий и сооружений в результате взрыва на основе результатов расчетов, полученных при использовании модели анализа эффектов взрыва.
3. Алгоритм подбора взрывозащитного барьера, включающий определение его конструктивных параметров, для достижения заданного уровня защиты от воздействия взрывных нагрузок.
4. Конструкция специального защитного устройства в виде комбинированного гасителя с диссипативными вставками, способного уменьшить негативное воздействие ударной волны при авариях.

Степень достоверности

Степень достоверности проведенных исследований подтверждается достаточным количеством экспериментальных и статистических данных, корректным использованием апробированных научных методов исследований и современного математического аппарата обработки результатов, а также общепризнанных отечественных и зарубежных программных комплексов в области анализа риска и численного моделирования (TOXI+Risk 5, FLACS, ANSYS, SYSNOISE).

Апробация результатов

Результаты исследования были апробированы на указанных ниже научных конференциях и семинарах:

1. Восьмая Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва МГТУ имени Н.Э. Баумана, 23-26 сентября 2015 года;
2. Научный Семинар «Декларирование промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ), г. Москва, 26 октября 2015 г.
3. XXIX Научный семинар «Практика оценки риска аварий на опасных производственных объектах», Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности (ЗАО НТЦ ПБ), г. Москва, 23 ноября 2015 год;
4. II Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности, г. Москва РХТУ имени Д.И. Менделеева, 25-26 апреля 2017 г.
5. XXXII Научный семинар «Промышленная безопасность», Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности (ЗАО НТЦ ПБ), г. Москва, 22 мая 2017 год;
6. День безопасности Shell в России, Double Tree by Hilton, г. Москва, «Основные проблемы нефтегазовой отрасли и пути их решения», 23 мая 2017 год;

7. Международная конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность– 2017», г. Севастополь, 11–15 сентября 2017 года.
8. «Техносферная безопасность байкальского региона», г. Чита, 01-18 сентября 2017 г.
9. Научный Семинар «Декларирование промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ), г. Москва, 10 октября 2017 г.
10. Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2016», «Нефть и газ 2017», «Нефть и газ 2018» г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. 2016 г., 2017 г., 2018 г.

Публикации по теме исследования

Основные результаты исследований изложены в 13 печатных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в: проведении анализа результатов предшествующих исследований и разработок в области методов оценки параметров ударных волн; обобщении существующих способов и средств защиты от аварийных взрывов и подходов к повышению взрывоустойчивости зданий и сооружений, проектируемых во взрывозащищенном исполнении; разработке универсальной модели анализа эффектов взрыва при использовании взрывозащитных стен; разработке конфигурации взрывозащитного устройства в виде комбинированного гасителя; проведении экспериментального и численного исследования эффективности диссипативных вставок.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, 2 приложений; содержит 122 страницы основного текста, 62 рисунка, 12 таблиц, библиографический список из 95 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы и основные задачи исследования, показаны ее научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ аварийности и травматизма, в том числе со смертельным исходом, на ОПО нефтегазовой отрасли за период с 2002 по 2017 годы включительно.

В рамках проведенных исследований были изучены отечественные и зарубежные подходы (в том числе отраженные в методике «тротилового эквивалента») к оценке параметров ударных волн и показаны (в том числе на расчетных примерах) безопасные расстояния для зданий и сооружений по критерию максимально возможной взрывной нагрузки при внешнем взрыве.

В зарубежной практике для описания профиля взрывной волны наиболее часто используется уравнение Фридлиндера (формулы 1.1, 1.2).

$$P(t) = P_0 + P_{\text{pos}} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{pos}}}\right) e^{-b\left(\frac{t}{t_{\text{pos}}}\right)}, \quad 0 < t \leq t_{\text{pos}}, \quad (1.1)$$

$$b = 2,3 \left(\frac{t_{\text{pos}}}{t}\right) \log\left(\frac{P_{\text{pos}}}{P}\right), \quad (1.2)$$

где P_0 – атмосферное давление, кПа; P_{pos} – амплитуда избыточного давления, кПа; b – параметр, описывающий спад кривой (декремент затухания); t – время, прошедшее с момента наступления взрыва, мс; t_a – время прибытия ударного фронта, мс.

При этом импульс положительной фазы сжатия вычисляется по выражению (1.3), аналитическое решение по формуле (1.4).

$$I_{\text{pos}} = \int_{t_a}^{t_a+t_{\text{pos}}} P(t) dt. \quad (1.3)$$

$$I_{\text{pos}} = \frac{P_{\text{pos}} \cdot t_{\text{pos}}}{b^2} [b - 1 + e^{-b}]. \quad (1.4)$$

Кроме того, формула (1.4) служит альтернативным решением в определении декремента затухания b в том случае, если параметры P_{pos} , I_{pos} , t_{pos} известны из экспериментальных данных.

Другой общепринятый подход к получению значения давления взрыва заключается в задании взрывного воздействия на элемент конструкции в виде функции давления, которая также зависит от времени. Данный подход основан на

эмпирической модели Ч. Кингери и Дж. Балмэша. Пиковое давление вычисляют с помощью уравнения, реализованного в подходе CONWEP (Conventional weapons effects program).

Давление, испытываемое поверхностью, представляет собой совокупный эффект падающей волны и отраженной:

$$\Delta P = P_r \cos^2 \alpha + P_i (1 + \cos^2 \alpha - 2 \cos \alpha), \quad (1.5)$$

где P_r и P_i – отраженное и падающее давление соответственно, кПа;
 α – угол падения ударного фронта на поверхность.

Давление от падающей и отраженной волны рассчитывается отдельно. Подробно про отраженное давление указано в п.1.4 Главы 1 диссертации. Значение падающей на поверхность ударной волны можно найти исходя из уравнения (1.1), пиковое отраженное давление определяется согласно (1.6):

$$P_r = 2P_{\text{pos}} \left(\frac{7P_0 + 4P_{\text{pos}}}{7P_0 + P_{\text{pos}}} \right) \quad (1.6)$$

Формула (1.5) справедлива, если α , угол между направлением движения и поверхностью, на которой происходит скачок уплотнения, меньше 90° , т.е. $\cos \alpha \geq 0$. Если $\cos \alpha < 0$, то формула (1.5) приобретает вид:

$$\Delta P = P_i, \quad (1.7)$$

С использованием указанных выше формул в главе 1 проведена оценка максимального поражающего воздействия ударной волны по условной вероятности разрушения зданий на различных расстояниях от эпицентра взрыва. Так, при аварии, связанной с полным разрушением изотермического резервуара хранения сниженных углеводородных газов объемом $60\,000\text{ м}^3$, полное разрушение зданий может происходить: на расстоянии более 200 м от эпицентра взрыва с вероятностью 0,87, а на расстоянии 1135 м – с вероятностью 0,01. Размещение большинства зданий и сооружений на ОПО расстояниях более 1000 м от изотермических резервуаров с учетом реальных границ объекта практически неосуществимо, что определяет необходимость защиты зданий и сооружений от воздействия взрыва на площадке ОПО с применением специальных мер, уменьшающих риск разрушения здания, сооружения до допустимых значений.

Во второй главе исследованы параметры пределов деформации конструкции при взрыве.

В тексте диссертации показано, что в качестве параметров пределов деформации в целях оценки реакции устойчивости конструкции при взрывном воздействии рекомендуются два параметра: коэффициент пластичности и угол поворота для разных материалов.

Прогнозируемую реакцию элемента конструкции при ударном нагружении необходимо сравнить с коэффициентом пластичности μ и максимальным углом поворота θ , чтобы убедиться, что ни одно из этих значений не превышено. Пример диаграммы напряженно-деформированного состояния стальной пластины с предельными значениями критериев реакции приведен на рисунке 1.

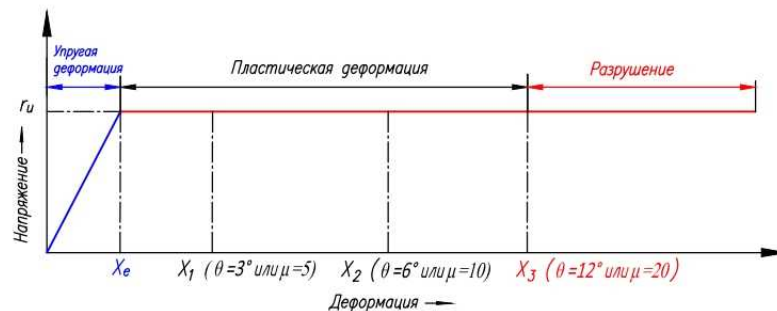


Рисунок 1 – Диаграмма напряженно-деформированного состояния стальной пластины с предельными значениями критериев реакции

В диссертационной работе обобщены принципы проектирования и основные подходы к повышению взрывоустойчивости зданий и сооружений, включая анализ существующих типов пассивных мер защиты для сохранения конструкции от возможного обрушения при аварии.

В третьей главе разработана модель анализа эффектов взрывного воздействия для количественной оценки нагрузок давления отражения падающей ударной волны на здания, расположенные за взрывозащитными барьерами, а также разработан алгоритм, позволяющий визуализировать степень повреждения зданий и сооружений в результате воздействия взрывных нагрузок.

Задачей исследований в данной главе являлась разработка модели анализа эффектов взрыва (далее - МАЭФВ), способной эффективно количественно

оценить и визуализировать воздействие взрыва на построенные объекты за взрывозащитными стенами. Данная модель позволит анализировать и сравнивать все возможные варианты конструкции для выбора самого эффективного сочетания типа взрывозащитной стены и строительного материала для снижения рисков угрозы взрыва для персонала, зданий и сооружений. Построение модели представляет собой совокупность пяти основных этапов:

- I. анализ взрывозащитной стены - разрабатываются новые аналитические формулы и определяются показатели эффективности для количественной оценки пригодности хрупких взрывозащитных стен, в том числе заполненных песком (или водой), и деревянных стен для снижения давления отражения падающей ударной волны на здания и сооружения;
- II. оценка повреждения - вычисляется процентная доля площади каждого здания или сооружения по пяти установленным в ФНП ОПВБ классам зон разрушения, с целью подсчета общего повреждения;
- III. визуализация повреждений в результате взрыва - отображаются прогнозируемые зоны поражения здания или сооружения, исходя из массы облака во взрывоопасных пределах, типа взрывозащитной стены и конструктивного исполнения здания;
- IV. анализ эффективности - оценивается точность и эффективность разработанной модели;
- V. ситуационный анализ - оценивается работоспособность разработанной модели на конкретном примере.

Взрывозащитные барьеры функционируют за счет отражения части энергии взрыва, что позволяет снизить отраженное давление и импульсную нагрузку на объект. Сокращение взрывного воздействия при наличии твердых стен можно количественно оценить, используя уравнения (3.1) и (3.2) для отраженного давления и импульса.

$$K_{P_{max,тв}} = -0.1359 + [0.3272 + 0.1995 \log(H/S)] \log \frac{S}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}} - 0.5626 \log(H/S) + 0.4666(L/S) \quad (3.1)$$

$$K_{I_{max,тв}} = 0.0274 + [0.4146 + 0.2393 \log(H/S)] \log \frac{S}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}} - 0.5044 \log(H/S) + 0.2538(L/S) \quad (3.2)$$

где $K_{Pmax,мс}$ – поправочный коэффициент максимального отраженного давления для твердых стен; H – высота взрывозащитной стены, м; S – расстояние между местом взрыва и объектом, м; E – эффективный энергозапас горючей смеси, Дж; P_0 – атмосферное давление, Па; L – расстояние места взрыва до взрывозащитной стены, м; и $K_{Imax,мс}$ – поправочный коэффициент максимального отраженного импульса для твердых стен.

Разработаны аналитические формулы для количественной оценки эффективности возможных типов хрупких взрывозащитных стен в снижении отраженного давления и импульсной нагрузки на объекты, как показано в уравнениях (3.5) и (3.6).

$$K_{Pmax,хр} = K_{Pmax,тв} \cdot EF_P, \quad (3.5)$$

$$K_{Imax,хр} = K_{Imax,тв} \cdot EF_I, \quad (3.6)$$

где $K_{Pmax,хр}$ – поправочный коэффициент максимального отраженного давления за хрупкими стенами; EF_P – показатель эффективности хрупких стен в снижении давления; $K_{Imax,хр}$ – поправочный коэффициент максимального отраженного импульса за хрупкими стенами; EF_I – показатель эффективности хрупких стен в снижении импульса.

На основе экспериментальных данных была составлена таблица показателей эффективности различных материалов стены в зависимости от толщины материала (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Показатели эффективности взрывозащитной стены

Материал стены	Толщина (м)	Показатель эффективности EF_P	Показатель эффективности EF_I	Анализ показателей эффективности	
Толстая пробковая древесина	0,08	0,70	1,06	++	-
Тонкая пробковая древесина	0,02	1,33	1,33	-	-
Толстая ледяная стена	0,60	0,80	0,86	++	+
Тонкая ледяная стена	0,30	0,97	0,93	+-	+
Пенополистирол	0,05	0,78	1,01	++	-
Лист полиэтилена	<0,01	1,26	1,29	-	-
Толстая песчаная стена	1,50	0,74	0,64	++	+
Средняя песчаная стена	1,00	0,82	0,71	+-	+
Тонкая песчаная стена	0,50	0,86	0,78	+-	+
Сталь, стандарт Ст3	0,20	1,00	1,00	+	+
Мешки, наполненные водой	0,10	0,71	0,91	++	+
Стена, заполненная водой	0,60	0,81	0,84	+-	+

МАЭфВ позволяет количественно оценить и визуализировать воздействие взрыва на построенные здания и сооружения за взрывозащитной стеной в виде следующих основных этапов:

1. определение входных параметров модели;
2. расчет расстояний между точкой взрыва и защищаемым зданием или сооружением;
3. количественная оценка площади здания (сооружения) в пределах установленных классов зон разрушения (далее - КЗР);
4. расчет общего повреждения здания (сооружения).

Входные параметры разработанной модели подобраны таким образом, чтобы представить все возможные варианты проектирования с целью определения наиболее эффективного сочетания типа взрывозащитной стены и конструктивного исполнения для снижения рисков для персонала, разрушения зданий и сооружений от угрозы взрыва. Местоположения объектов в модели определяются с помощью координатной сетки, как показано на рисунке 2.

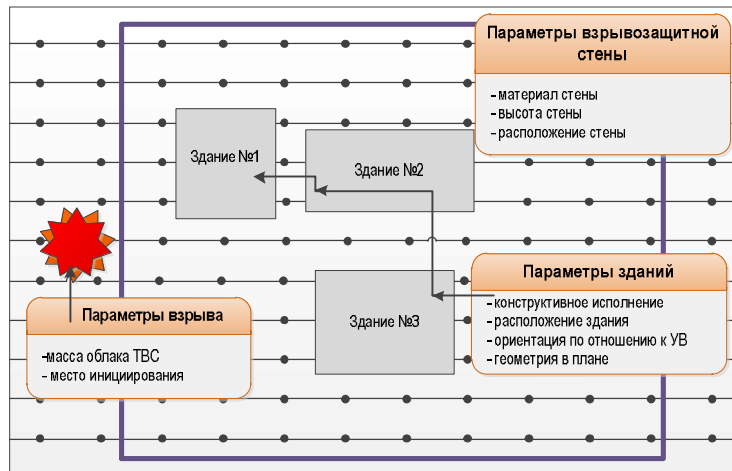


Рисунок 2 - Модель входных параметров

Расстояния до объектов определяются для каждой комбинации уровня повреждения, массы облака топливовоздушной смеси и конструктивного исполнения, как показано на схеме (рисунок 3).

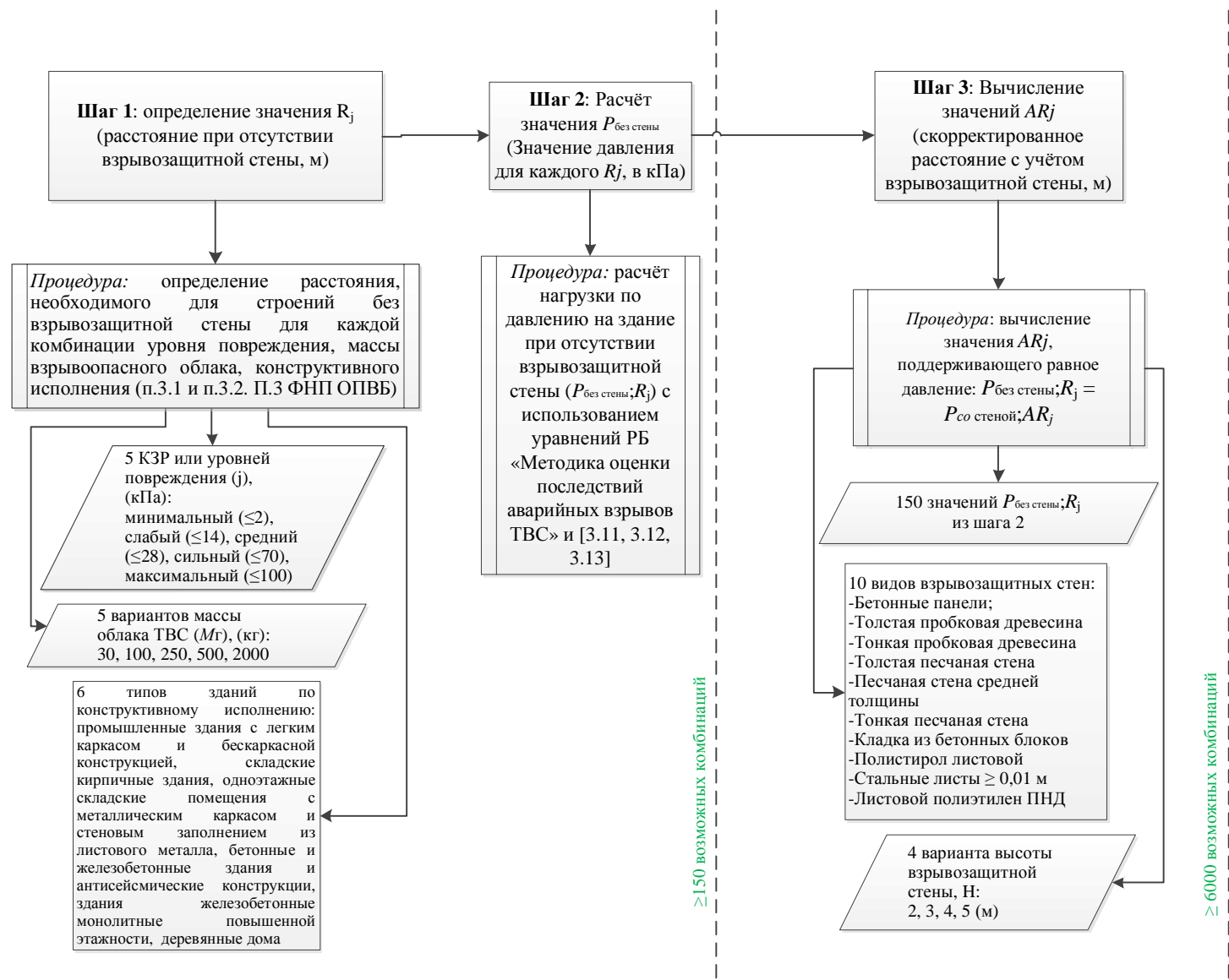


Рисунок 3 - Этапы вычисления расстояния, скорректированного с учётом наличия взрывозащитной стены

Нагрузки отраженного давления $P_{\text{без стены}}$ или импульса $I_{\text{без стены}}$ на этих определённых расстояниях рассчитываются с использованием модифицированных уравнений (3.11) – (3.13), где отраженное давление и импульс являлись функцией приведённого расстояния:

Если $0,06 \leq \frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}} \leq 2,0$, то

$$P_{\text{без стены}} = e^{\left\{ \begin{aligned} &9,006 - 2,6893 \ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) - 0,6295 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^2 + 0,1011 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^3 + 0,29255 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^4 + \\ &+ 0,13505 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^5 + 0,019736 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^6 \end{aligned} \right\}}. \quad (3.11)$$

Если $2,0 \leq \frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}} \leq 40$, то

$$P_{\text{без стены}} = e^{\left\{ \begin{aligned} &8,8396 - 1,733 \ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) - 2,64 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^2 + 2,293 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^3 - 0,8232 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^4 + \\ &+ 0,14247 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^5 - 0,0099 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^6 \end{aligned} \right\}}. \quad (3.12)$$

Значение импульса в случае:

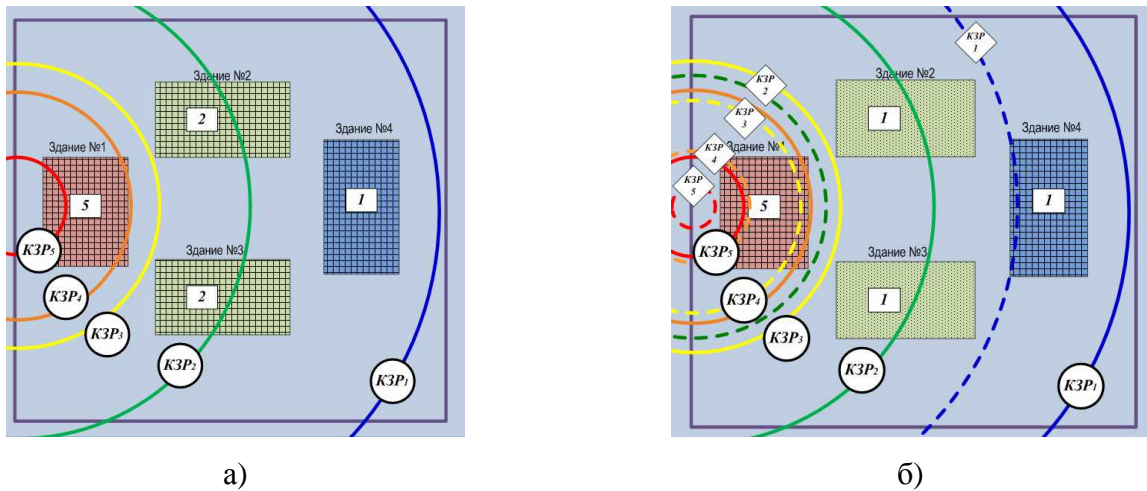
$0,06 \leq \frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}} \leq 40$,

$$I_{\text{без стены}} = e^{\left\{ \begin{aligned} &6,7853 - 1,3466 \ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) + 0,101 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^2 - 0,01123 \left[\ln\left(\frac{R}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \right]^3 \end{aligned} \right\}}. \quad (3.13)$$

Созданный алгоритм по визуализации ущерба представляет собой инструмент анализа для оценки результатов проектирования и определения уровня защиты для каждого объекта строительства. Он позволяет выполнить визуальную оценку устойчивости зданий и сооружений к взрывным нагрузкам и определить, необходимы ли какие-либо изменения в конструктивном исполнении, чтобы обеспечить необходимый уровень защиты для построенных зданий и сооружений.

Например, созданная визуализация на рисунке 4, представляет систему, где расчетный уровень нагрузок превышает максимально допустимый уровень

устойчивости, заложенный проектировщиком в решениях конструктивного исполнения здания.



Конструктивное исполнение		Класс зоны разрушения			Уровни повреждения здания	
Тип здания/сооружения	Обозначение	Повреждение	Кирпичное здание	Железобетонное здание	№ КЗР	Цвет
Складские кирпичные здания	□□□□□□□□	Минимальное	—	—	КЗР-1	Синий
		Слабое	—	—	КЗР-2	Оранжевый
Бетонные и железобетонные здания	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■	Среднее	—	—	КЗР-3	Желтый
		Сильное	—	—	КЗР-4	Оранжево-красный
		Максимальное	—	—	КЗР-5	Красный

Рисунок 4 - Классы зон разрушения, представляющие пять уровней повреждений: а) для кирпичного здания; б) для кирпичного и железобетонного здания

Эффективность разработанной модели была оценена по расчетам отраженного давления.

На рисунке 5а приведены девять сочетаний массы облака в ТНТ и расстояния включают: (1) массу в ТНТ 100 и 250 кг на расстоянии 25 м; (2) массу в ТНТ 100, 250, 454,5, и 1818,2 кг на расстоянии 50 м; и (3) массу в ТНТ 250, 454,5, и 1818,2 кг на расстоянии 100 м. На рисунке 5а представлены средние значения отраженного давления, рассчитанные с помощью разработанной модели МАЭФВ, рассчитанным по TOXI+Risk 5, и по данным, полученным в программном комплексе VAPO. На рисунке 5б учтено наличие 5-ти метровой взрывозащитной стеной. Расчет в TOXI+Risk 5 с использованием взрывозащитной стены не проводился, т.к. в данный момент программный модуль не учитывает препятствия на пути действия ударной волны.

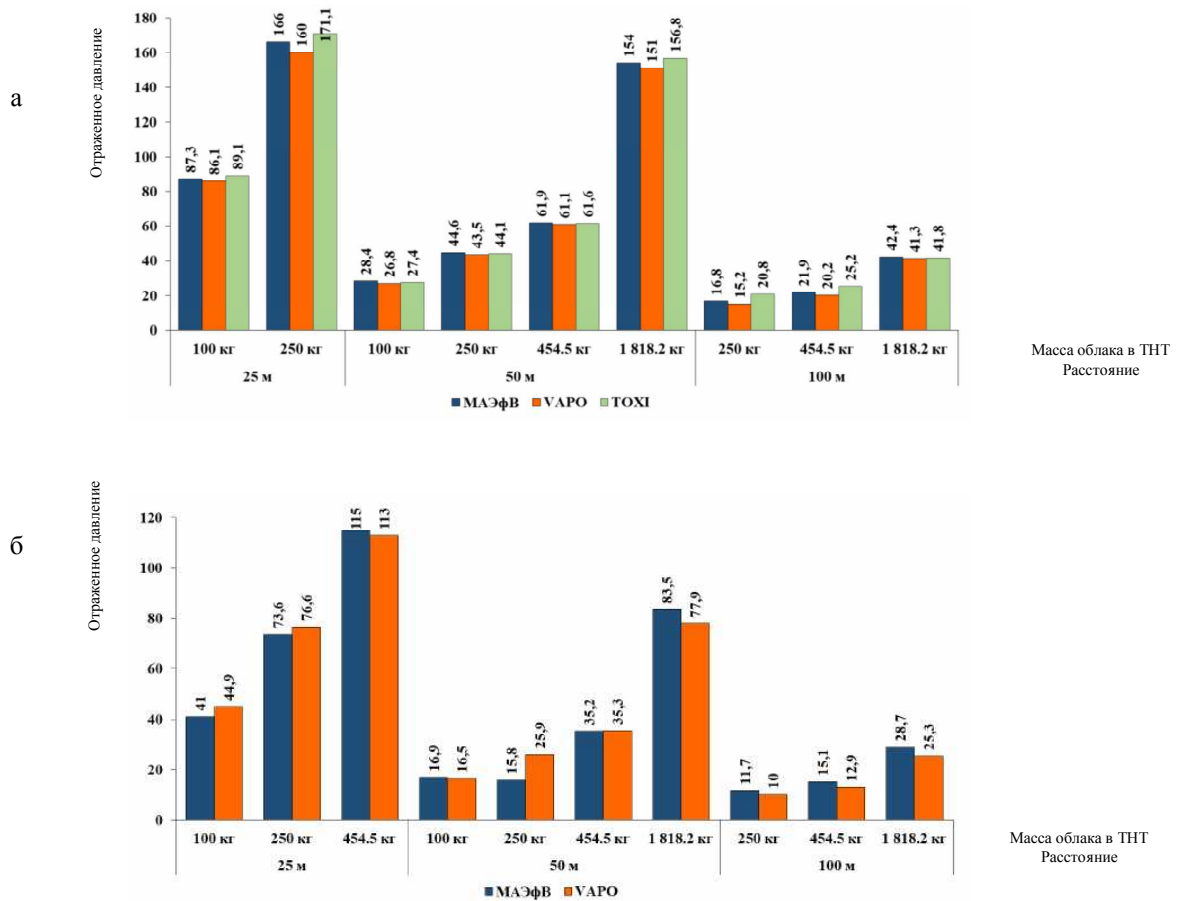


Рисунок 5 - Сравнение результатов расчета отраженного давления на здание

В четвертой главе разработана новая конфигурация специального защитного устройства – «Аттенюатор ударной волны взрыва» (далее - АУВВ), способного максимально снизить воздействие ударной волны на здание. Методами численного моделирования доказана эффективность разработанного взрывозащитного устройства.

Устройство АУВВ представляет собой защитный барьер - стена вокруг здания и сооружения, которая помогает рассеивать энергию, а также увеличивает дистанцию противостояния от взрывоопасной угрозы и, таким образом, либо полностью устраняет, либо снижает давление, вызванное внешним взрывом. Конструкция защитного устройства представляет собой многослойную модель сварных стальных перегородок, состоящих из балочных профилей и стальных листов, покрытых слоем из диссипативных вставок, формирующих собой энергопоглощающий одиночный экран – гаситель из стального листа, усиленный слоем диссипативных вставок (легкие пористые материалы), обеспечивающих при его прохождении снижение давления на неотраженной части фронта ударной

волны. По своей конфигурации модель АУВВ представляет собой пространственную конструкцию с лабиринтным расположением одиночных энергопоглощающих экранов.

Рассмотрим результаты численного моделирования воздействия ударной волны на здание операторной при реализации сценария взрыва облака пропана с учетом размещения защитного барьера – АУВВ высотой 5 м на расстоянии 8 м от взрывоопасного модуля (рисунки 6-8). Расстояние между экранами модуля принято 0,5 м. Моделирование проводилось для 4 и 5 слоев экранирующих барьеров, расположенных в лабиринтном порядке.

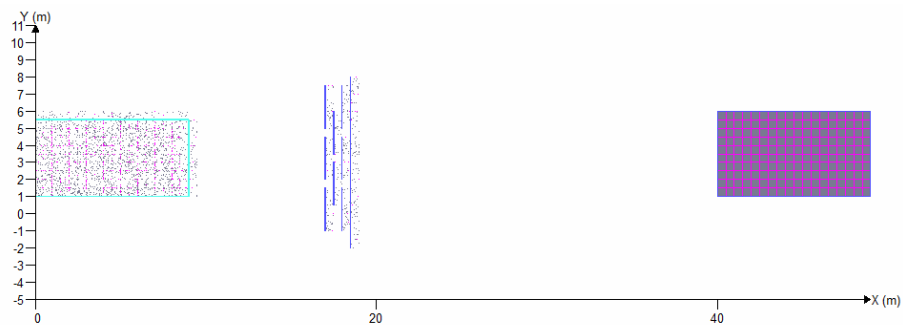


Рисунок 6 – Расположение взрывоопасного модуля, АУВВ (4 сл.) и здания операторной

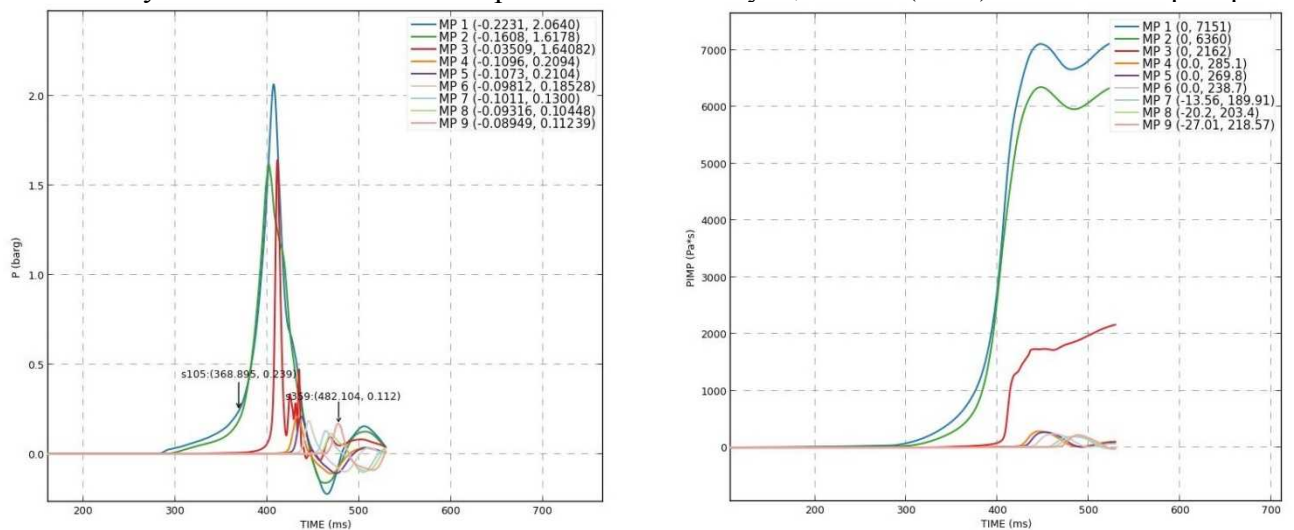


Рисунок 7 – Визуализация результатов расчета давления (слева) и импульса (справа) в зависимости от времени при установке АУВВ

Далее представлены цветные схемы распределения максимального давления отражения падающей ударной волны в зависимости от времени.

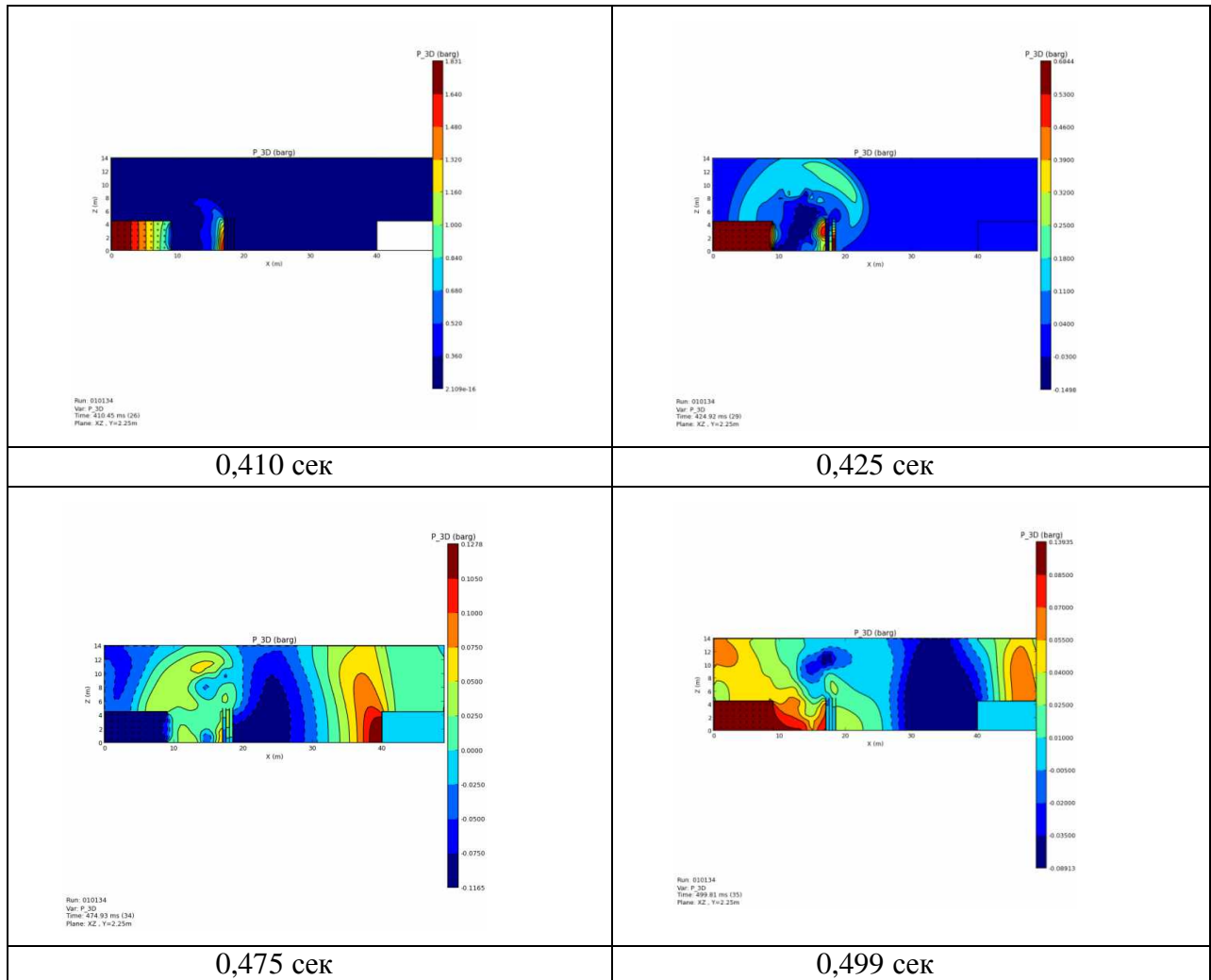


Рисунок 8 – Цветовые схемы распределения избыточного давления

Ниже на рисунках (рисунки 9-10) представлены 3d визуализации распределения максимального давления в зависимости от времени для пятислойного АУВВ.



Рисунок 9 – 3d визуализация распространения избыточного давления на 0,440 сек

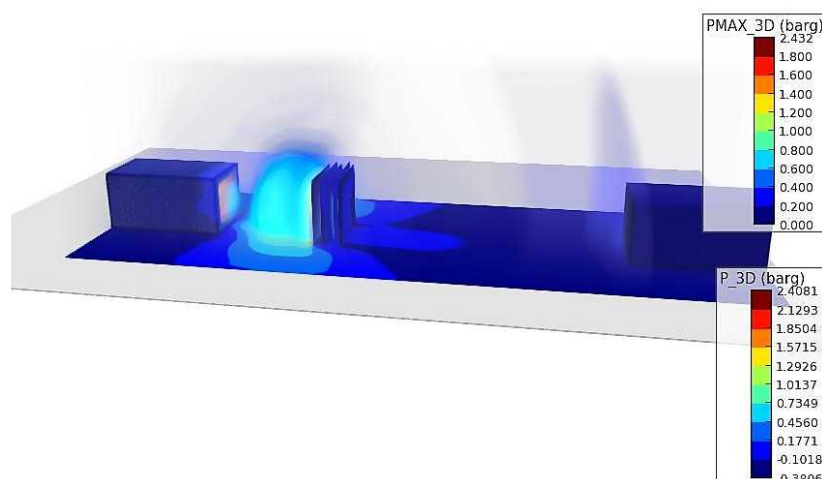


Рисунок 10 – 3d визуализация распространения избыточного давления на 0,475 сек

С помощью проведенного численного моделирования, благодаря которому удалось оценить эффективность разработанной конструкции АУВВ, снижение давления во фронте ударной волны на здание операторной составит с 40 кПа до 2 кПа. Таким образом, мера защиты в виде АУВВ позволяет максимально снизить давление, вызванное внешним взрывом.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ данных по аварийности на объектах нефтехимии, нефтепереработки, нефтепродуктообеспечения и нефтегазодобычи показал, что воздействия, вызванные взрывными нагрузками, возникающими вследствие аварий, на здания и сооружения влекут за собой наиболее тяжелые последствия.
2. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных подходов к оценке параметров ударных волн показал, что большинство из них основаны на результатах натурных экспериментальных исследований, отраженных в методике «тротилового эквивалента». Методики, учитывающие тип взрывного превращения (детонация / дефлаграция) при воспламенении топливовоздушных смесей, позволяют снизить избыточный консерватизм в расчетах параметров ударных волн, а имеющиеся в настоящее время средства численного моделирования адекватно отражают распространение эффектов взрыва и ударных волн.

3. Обобщены принципы взрывоустойчивого проектирования и основные подходы к повышению взрывоустойчивости зданий и сооружений, включая практику использования взрывозащитных барьеров. Сделан вывод, что в настоящий момент нет защитного устройства, способного эффективно снизить интенсивность падающей ударной волны и способного удовлетворить требованиям по его размещению в условиях плотной застройки объектов нефтегазового комплекса.
4. Разработана модель анализа последствий взрывного воздействия для количественной оценки давления и импульса ударной волны, позволяющая анализировать и сравнивать все возможные варианты размещения зданий и сооружений с целью выбора оптимального проектного решения, минимизирующего риски для персонала, находящегося в зданиях и сооружениях, от угрозы взрыва.
5. Разработана конфигурация специального защитного устройства по снижению интенсивности падающей ударной волны при взрывах топливно-воздушных смесей на ОПО в виде комбинированного гасителя АУУВ, позволяющего максимально снизить давление, вызванное внешним взрывом при аварии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК

1. Экспресс-методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах — складах горюче-смазочных материалов; // Невская Е.Е., Дегтярёв Д.В., Лисанов М.В. и др. Безопасность труда в промышленности. – 2016 – № 3 – С. 62-68.
2. Анализ способов и средств повышения уровня защиты зданий и сооружений от действия ударных волн; // Невская Е.Е., Глебова Е.В. Безопасность труда в промышленности – 2017 – № 2 – С. 73-78.
3. Основные методы оценки параметров ударных волн при аварийных взрывах. Принципы проектирования взрывоустойчивых зданий и

сооружений; // Невская Е.Е. Безопасность труда в промышленности – 2017 – № 9 – С. 20-29.

4. Проблемы обоснования взрывоустойчивости зданий и сооружений на опасных производственных объектах; // Базалий Р.В., Невская Е.Е., Чуркин Г.Ю. Безопасность труда в промышленности – 2018 – № 4 – С. 25-30.

В других изданиях:

1. Экспресс-метод определения частоты аварийных ситуаций на объектах, осуществляющих деятельность с использованием пожаровзрывоопасных веществ (на примере складов ГСМ ОАО «РЖД»); // Невская Е.Е., Мартынюк В.Ф. В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Восьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. 2015. С. 710-713.
2. Способ прогнозирования аварий на резервуарных парках топливных складов методом полуколичественной оценки частоты нежелательных событий; // Невская Е.Е. В сборнике: Безопасность и живучесть технических систем. Материалы и доклады: в 3-х томах. 2015. С. 94-97.
3. «Оценка показателей риска взрыва от аварий на объектах нефтегазового комплекса»; // Невская Е.Е. Тезисы докладов Юбилейной 70-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2016»., Том 2, стр.67.
4. Ударно-волновое воздействие взрыва облаков топливно-воздушных смесей; // Невская Е.Е. Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2017. № 7 (365). С. 319-324.
5. Устойчивость производственных зданий опасных объектов к аварийным взрывам; // Е.Е. Невская, Е.В. Глебова. Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых по проблемам техносферной безопасности, Москва, 25 – 26 апреля 2017 г., стр. 97-99.
6. Расчет радиусов зон разрушения в результате барического воздействия»; // Невская Е.Е. Тезисы докладов 71-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2017»., Том 2, стр. 235.

7. Повышение устойчивости зданий и сооружений при внешних взрывах ТВС на объектах нефтегазового комплекса; // Е.Е. Невская. Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 20-летию принятия Федерального закона №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», 19 мая 2017 г. стр. 141 -145.
8. Оценка последствий взрывов при промышленных авариях; // Невская Е.Е. В сборнике: Техносферная безопасность байкальского региона Сборник статей Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор В.В. Звягинцев. 2017. С. 18-23.
9. Снижение интенсивности падающей ударной волны при взрывах топливно-воздушных смесей на объектах нефтегазовой отрасли; // Невская Е.Е., Глебова Е.В. В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2017 Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием. Под редакцией Ю.А. Омельчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик. 2017. С. 959-962.