Минобрнауки России

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

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)»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Глебова Е.В.

Москва - 2018

оглавление

введен	НИЕ
1 ГЛА	АВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ УДАРНЫХ ВОЛН
ПРИ АВ	ЗАРИЙНЫХ ВЗРЫВАХ 11
1.1	Анализ аварийности и смертельного травматизма предприятий нефтегазовой отрасли.
Стати	стика аварий, сопровождающихся взрывом 11
1.2	Характеристика аварийных взрывов и подходы к определению их последствий 13
1.3	Оценка параметров ударных волн 15
1.4	Отражение и дифракция падающей ударной волны
1.5	Методики численного моделирования для определения избыточного давления во
фронт	е ударной волны
1.6	Расчет радиусов зон разрушения
1.7	Выводы по главе 1
2 ГЛА	АВА 2. РАЗРУШЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДИНАМИЧЕСКОГО
воздей	ЙСТВИЯ. АНАЛИЗ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЗАЩИТЫ
ЗДАНИ	Й И СООРУЖЕНИЙ ОТ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА 29
2.1	Оценка проявления устойчивости строений по отношению к взрыву 29
2.2	Параметры пределов деформации 31
2.3	Основные принципы взрывоустойчивого проектирования
2.4	Общие подходы к повышению взрывоустойчивости
2.5	Анализ существующих типов пассивных мер защиты
2.6	Выводы по главе 2 45
3 ГЛА	АВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА ЗДАНИЯ И
СООРУ	ЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЗРЫВОЗАЩИТНЫХ СТЕН 46
3.1	Обзор экспериментальных моделей взрывозащитных стен
3.2	Разработка модели анализа эффектов взрыва 48
3.3	Оценка входных параметров для модели анализа эффектов взрыва 54
3.4	Количественная оценка площади повреждения зданий и сооружений 63
3.5	Оценка эффективности разработанной модели

3.6 Выводы по главе 3 69			
4 ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПО СНИЖЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ			
ПАДАЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВАХ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ 71			
4.1 Уменьшение взрывных нагрузок на здания и сооружения с помощью пористых экранов			
71			
4.2 Разработка конфигурации модели защитного устройства 74			
4.3 Исследование эффективности диссипативных вставок			
4.4 Результаты оценки эффективности аттенюатора ударной волны взрыва 81			
4.4.1 Численное моделирование воздействия ударной волны на здание операторной 81			
4.4.2 Численное моделирование воздействия ударной волны на здание операторной при			
использовании АУВВ			
4.5 Выводы по главе 4			
Заключение			
Список сокращений и условных обозначений			
Список использованной литературы			
Приложение 1 106			
Приложение 2 107			

введение

Актуальность темы исследования

В настоящее время на объектах нефтегазового комплекса увеличилось число аварий, приводящих к поражению персонала и оборудования вследствие взрывов. Такого вида аварии связаны, прежде всего, с обращением на предприятиях нефтегазовой отрасли и нефтехимии пожаровзрывоопасных и горючих веществ. Получение, использование, переработка, хранение, транспортировка опасных веществ на технологическом объекте предопределяет необходимость оценки опасности взрыва и устойчивости зданий и сооружений к взрывным нагрузкам и воздействиям.

Потребности и требования к взрывоустойчивости производственных зданий в нефтегазовой промышленности всё больше развиваются и формируют интерес общества на протяжении последних лет. Нефтехимические процессы стали более сложными, и опасные производственные объекты увеличиваются в масштабах производства и переработки, тем самым повышая риск случайных взрывов. Такие взрывы разрушали производственные здания, в приводя к значительным некоторых случаях потерям персонала, экологическим и экономическим ущербам. Подобные события повысили озабоченность руководства предприятий и надзорных органов вопросами взрывозащиты на опасных производственных объектах, обладающих потенциалом возможного взрыва. В целом, эти вопросы относятся к безопасности предприятий и управлению рисками по предотвращению или минимизации возникновения подобных инцидентов, и к практике размещения, проектирования и производственных зданий снижения воздействия на сотрудников и строительства ДЛЯ технологические установки предприятий.

Актуальность выбранной темы подчеркивается результатами анализа аварийности, который показывает, что большинство крупных промышленных аварий произошли вследствие дефлаграционного взрыва топливно-воздушных смесей (ТВС) с последующим разрушением зданий и сооружений на опасных производственных объектах. Вот лишь несколько примеров последствий внешних взрывов ТВС. Авария в Порт-Хадсоне (09.12.1970 г.) произошла в виде взрыва парового облака ТВС вследствие разрыва трубопровода с жидким пропаном. Воспламенение облака от источника зажигания произошло спустя 20 минут после разрыва трубопровода. Количество разлившейся жидкости составляло 60 т, из которых, по оценке специалистов, приняло участие во взрыве 12 т. Полностью разрушено кирпичное здание склада. В г. Людвигсхафен (28.07.1948 г.) авария была вызвана взрывом железнодорожной цистерны, нагретой солнечными лучами. Цистерна содержала 30,4 т диметилового эфира. В момент

максимальное избыточное давление не превышало 50 кПа. Радиус зоны полного разрушения составил 113 м, а зоны сильных разрушений – 309 м. Крупная авария произошла на заводе в Фликсборо (01.06. 1974 г.) на установке окисления циклогексана при температуре 155 °С и давлении 900 кПа. Разрушение байпаса между двумя установками привело к образованию облака паров циклогексана массой 56 т. Инициирование облака ТВС произошло на высоте 45 м над землей. В результате было полностью разрушено здание операторной и в зоне сильных разрушений оказались служебные здания аппаратных. Одна из самых тяжелых по последствиям и приравненная к катастрофе авария произошла в Башкирии, на перегоне Улу-Теляк-Аша (03.06. 1989 г.). Воспламенение паров ШФЛУ произошло в момент встречи двух пассажирских поездов. Облако образовалось вследствие разрыва продуктопровода и утечки 1000 т сжиженного топлива на расстоянии 900 м от железной дороги. В результате оказались сброшены с рельсов 14 вагонов, сломаны 30 опор из железобетона, разрушено остекление в жилых домах на расстоянии 12 км в поселке Аша. Но самое ужасающее в этой катастрофе – это количество погибших и пострадавших. На месте аварии было обнаружено 258 погибших, 806 человек получили ожоги и травмы различной степени тяжести, 317 из них от полученных травм скончались в больнице. Всего в аварии погибло 575 человек, пострадало 623.

Таким образом, угрожающее цифры данных об авариях, увеличивающиеся темпы производства и переработки в нефтегазовой отрасли, нарастание энергопотенциала технологических процессов – все указанные факты приводят к тому, что исследования воздействия ударных волн на производственные объекты, расположенные вблизи источника взрыва, а также повышение устойчивости зданий и сооружений на опасных производственных объектах, имеет важное практическое значение при решении вопросов промышленной безопасности и защиты людей и сооружений от действия взрыва.

Степень разработанности выбранной темы

До настоящего момента в области отечественных научных разработок господствовали экспериментальные методы исследования взаимодействия ударной волны с различными преградами. Результаты данных исследований не нашли своего отражения в существующих нормативных документах и руководствах по безопасности в области промышленной безопасности. Проведенные в работе исследования для создания модели анализа эффектов взрыва для количественной оценки нагрузок отраженного давления и импульса падающей ударной волны на здания и сооружения, расположенные за жесткими или хрупкими взрывозащитными барьерами, характеризуются доведением полученных в результате исследования зависимостей до конкретных выражений, что способствует внедрению результатов исследования в нормативные документы.

5

Цели исследования

Автор выделяет две основные цели исследования данной диссертационной работы:

Повышение устойчивости зданий и сооружений, а также защищенности обслуживающего персонала технологических установок опасных производственных объектов нефтегазового комплекса, путем разработки модели оценки воздействия взрыва на здания и сооружения, расположенные за жесткими или хрупкими взрывозащитными барьерами.

Создание нового типа конструкции, как эффективного метода защиты от ударных волн и локализации их действия в условиях существующей плотной застройки пространства территории предприятий.

Задачи исследования

Для достижения поставленных целей были сформулированы следующие основные задачи:

 Проанализировать данные по аварийности и производственному травматизму на отечественных объектах нефтехимии, нефтепераработки, нефтепродуктообеспечения и нефтегазодобычи для выявления общего числа аварий, связанных с видом «взрыв».

— Изучить отечественные и зарубежные подходы в оценке параметров ударных волн, показать на расчетном примере для конкретного сценария безопасные расстояния для зданий по критерию максимально возможной взрывной нагрузки при внешнем взрыве.

 Исследовать параметры пределов деформации конструкции при взрыве.
Обобщить принципы взрывоустойчивого проектирования и основные подходы к повышению взрывоустойчивости зданий и сооружений.

 Разработать модель анализа эффектов взрывного воздействия для количественной оценки нагрузок отраженного давления и импульса падающей ударной волны на здания, расположенные за взрывозащитными барьерами.

 Разработать алгоритм, позволяющий визуализировать процент повреждения зданий и сооружений в результате воздействия взрывных нагрузок.

 Разработать новую конфигурацию специального защитного устройства оптимального типа, способного максимально снизить воздействие ударной волны на здание.

Научная новизна

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- Предложена модель анализа эффектов взрыва для количественной оценки нагрузок отраженного давления и импульса падающей ударной волны на здания и сооружения, расположенные за жесткими или хрупкими взрывозащитными барьерами.

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

- Разработан алгоритм подбора взрывозащитного барьера, включающий определение его конструктивных параметров, и обеспечивающий определенный уровень защиты от воздействия взрывных и ударных нагрузок.

- Для снижения интенсивности падающей ударной волны на здания и сооружения разработана принципиально новая конфигурация специального защитного устройства оптимального типа, способного максимально уменьшить её воздействие по пути движения от источника взрыва.

- 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.

Теоритическая значимость работы

Теоритическая значимость работы заключается в анализе результатов предшествующих исследований и разработок в области методов оценки воздействия ударной волны на здания и сооружения опасных производственных объектов. В обобщении существующих на территории Российской Федерации способов и средств защиты от аварийных взрывов и анализе зарубежных подходов в модернизации зданий и сооружений. В разработке универсальной модели анализа эффектов взрывных воздействий оказываемых на здания и сооружения с учетом применения взрывозащитных стен. В создании конфигурации защитного устройства оптимального типа для поглощения энергии ударной волны.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке алгоритма определения оптимального типа взрывозащитного барьера, включающая определение его конструктивных параметров. Разработанная методика количественной оценки и визуализации воздействия взрыва на построенные объекты за жёсткими или хрупкими взрывозащитными барьерами может быть включена в нормативно-технические документы, регламентирующие деятельность в области промышленной безопасности.

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

Методология и методы исследования

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

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

- Модель анализа эффектов взрыва для количественной оценки нагрузок отраженного давления и импульса падающей ударной волны на здания и сооружения, расположенные за жесткими или хрупкими взрывозащитными барьерами.
- 2. Методика, позволяющая визуализировать процент повреждения зданий и сооружений в результате взрыва на основе результатов расчета, полученных при использовании модели анализа эффектов взрыва.
- Алгоритм подбора взрывозащитного барьера, включающий определение его конструктивных параметров, и обеспечивающий определенный уровень защиты от воздействия взрывных и ударных нагрузок.
- Конфигурация специального защитного устройства оптимального типа, способного максимально уменьшить воздействие ударной волны по пути её движения от источника взрыва.
- 5. Численные модели воздействия ударной волны на защитное устройство.

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:

- Восьмая Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-26 сентября 2015 года;
- Научный Семинар «Декларирование промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ), г. Москва, 26.10.15 г.
- 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 им. Д.И. Менделеева, 25-26 апреля 2017 г.
- 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.
- Научный Семинар «Декларирование промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ), г. Москва, 10.10.17 г.

Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2016», «Нефть и газ 2017», «Нефть и газ 2018» г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) им. 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 Министерства образования и науки Российской Федерации.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в самостоятельном проведении анализа данных по аварийности и производственному травматизму на отечественных объектах нефтехимии, нефтепераработки, нефтепродуктообеспечения и нефтегазодобычи. Проведение анализа результатов предшествующих исследований и разработок в области методов оценки параметров ударных волн. В обобщении существующих способов и средств защиты от аварийных взрывов и подходов в модернизации 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. Проведение экспериментального и численного исследования эффективности диссипативных вставок. Численное моделирование воздействия ударной волны.

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.

ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВАХ

1.1 Анализ аварийности и смертельного травматизма предприятий нефтегазовой отрасли. Статистика аварий, сопровождающихся взрывом

Вопросы прогнозирования последствий аварийных взрывов и обеспечения устойчивости зданий и сооружений к действию взрывных нагрузок особо актуальны для инвесторов строительства, проектировщиков, собственников производственных объектов, на которых обращаются взрывопожароопасные вещества, а также экспертных и надзорных органов. Имеющиеся статистические данные о последствиях аварий подтверждают невозможность обеспечения гарантированной безаварийной эксплуатации промышленных предприятий. Ниже (рисунок 1.1 – рисунок 1.2) представлены данные по динамике аварийности и производственного травматизма за 2011-2016 гг. на опасных производственных объектах Российской Федерации, приведенные в соответствии с ежегодными отчетами, публикуемыми Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (далее - Ростехнадзор).



Рисунок 1.1 – Динамика аварийности и производственного травматизма на объектах нефтегазодобычи



Рисунок 1.2 - Динамика аварийности и производственного травматизма на объектах нефтехимии, нефтепераработки, нефтепродуктообеспечения

Согласно проведенному анализу статистических данных об авариях на объектах нефтехимии, нефтепереработки, нефтепродуктообеспечения из общего числа аварий за 12 месяцев 2016 года 44,4% всех аварий связаны с видом «взрыв», доля которых по сравнению с тем же периодом 2015 года возросла на 12,4% [1]. Всего было проанализировано 34 аварии, связанных со взрывными превращениями облаков ТВС, 14 из них по данным публикуемым в информационных бюллетенях Ростехнадзора, в период с 2002 по 2017 год, и 20 по данным из чек-листов (уроки, извлеченные из аварий) Ростехнадзора, в период с 2014 по 2017 год. Составленный перечень аварий связанных с видом «взрыв», произошедших на предприятиях отечественного нефтегазового комплекса, представлен в Приложении №2.

	Число аварий						
Виды аварий	12 месяцев 2016		2 месяцев 2016		Дельта		
	Кол-во	%	Кол-во	%	+/-		
Взрыв	8	44,4	6	32	+2		
Пожар	3	16,6	11	58	-8		
Выброс ОВ	7	39	2	10	+5		
Всего	18	100	19	100	-1		

Таблица 1.1 – Процентное соотношение числа аварий

Ниже представлены основные данные по техническим и организационным причинам, произошедших аварий. Из таблицы 1.2 видно, что основную долю из всех технических причин аварий занимают: неудовлетворительное техническое состояние оборудования и отклонения от требований проектной, технологической документации. Значительный процент всех организационных причин аварий составляет – неэффективность производственного контроля.

Таблица 1.2 – Технические и организационные причины аварий

Причины аварий	2016	2015	Динамика аварийности, Рост(+), спад(-)		
Технические причины					
Неудовлетворительное техническое состояние оборудования	40	40	0		
Сбой (отсутствие) средств аварийного отключения, системы ПАЗ	-	-	-		
Ошибки сбора и монтажа конструкции	10	30	-20		
Отклонения от требований проектной, технологической документации	40	-	+40		
Нарушение экспертизы или технического обслуживания по регламенту технического устройства	10	10	0		
Несоответствие проектным решениям при	-	-20	-20		

Причины аварий	2016	2015	Динамика аварийности, Рост(+), спад(-)		
эксплуатации и условиям обеспечения безопасности					
Организационные причины					
Неправильная организация работ	12,5	18,2	-5,7		
Неэффективность производственного контроля	62,5	72,7	-10,2		
Нарушение производственной дисциплины	-	-	-		
Низкий уровень знаний требований промышленной безопасности	12,5	-	+12,5		
Неосторожные или несанкционированные действия исполнителей	12,5	-	+12,5		
Другие причины	-	9,1	-9,1		

1.2 Характеристика аварийных взрывов и подходы к определению их последствий

При аварийном взрыве на несущие и ограждающие конструкции здания действуют непериодические кратковременные динамические нагрузки, законы изменения которых во времени зависят от вида взрыва [2, с. 18]. Различают детонационные и дефлаграционные взрывы. Для детонации характерно распространение взрыва по опасному веществу (преимущественно конденсированные взрывчатые вещества (КВВ) – тротил, гексоген, а также газо- и паровоздушные смеси, образующиеся при истечении в атмосферу водорода и ацетилена, реже смеси кислорода с газообразными углеводородами – облака ТВС), «обусловленное прохождением УВ с постоянной сверхзвуковой скоростью, обеспечивающей быструю химическую реакцию» [2, с. 115]. Характер изменения детонационной и дефлаграционной волны в зависимости от времени представлен на рисунках ниже (рисунок 1.3 a, б).



Рисунок 1.3 - Типичные профили детонационной а) и дефлаграционной б) волн

При дефлаграционных взрывах, которые могут наблюдаться в облаках ТВС, скорость распространения пламени по веществу меньше звуковой и может изменяться в широких пределах. Однако, это не общепринятый критерий, в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» [3, с. 2] и пособии [4] взрывное превращение облака ТВС в диапазоне скорости фронта пламени 300-500 м/с также является дефлаграционным. Характер изменения избыточного давления при таком взрыве иной, чем при детонации: его нарастание происходит медленнее и максимальное давление меньше, но продолжительность действия дольше. Такое нагружение ближе к статическому, но может оказаться опаснее для строительных конструкций, чем более интенсивная, но кратковременная нагрузка при детонационном взрыве. Другое принципиальное отличие дефлаграционного взрыва этого типа состоит в том, что избыточное давление зависит только от скорости горения вещества, но не от его количества – последнее определяет длительность действия давления. После окончания горения облака ТВС от его границы распространяется УВ, давление на фронте которой значительно меньше, чем при детонации. Поэтому, как правило, дефлаграционный взрыв представляет опасность для сооружения только в том случае, если оно целиком или частично находится внутри облака. Следует, однако, иметь в виду, что при определенных условиях режим горения облаков некоторых TBC может измениться от дефлаграции на детонацию. Из справочника [5, с. 88] известно, что переход дефлаграционного горения в детонацию в газовоздушных смесях возможен в следующих случаях:

- 1. При обогащении горючей смеси кислородом;
- 2. При очень больших размерах газовых облаков;
- 3. При наличии турбулизаторов горения.

В качестве турбулизатора горения может выступать сильнозагроможденное пространство, а также наличие длинных труб, полостей, каверн, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно формирование турбулентных струй продуктов сгорания размером не менее трех размеров детонационной ячейки для данной смеси, что соответствует 1 и 2 виду окружающего пространства согласно Руководству по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» [3, с. 3]. Это подтверждает теорию гидродинамической неустойчивости и автотурбулизации фронта нормального горения в горючих облаках достаточно больших размеров, в которых переход от дефлаграционного горения к детонации неизбежен. По данным [5] экстраполяционные оценки приводят к следующим критическим размерам облаков, при которых вероятность возникновения детонации высока: для водородовоздушных смесей – 70 м, для пропановоздушных – 3500 м, для метановоздушных – 5000 м.

Немаловажным аргументом в маловероятности реализации аварийного сценария, сопровождающимся детонационным взрывом, является именно совокупность условий. По обобщенным данным [2] для детонационного взрывного превращения необходим мгновенный выброс всего вещества из оборудования в атмосферу, погодные условия близкие к штилевым, если апеллировать классификацией по Паскуиллу, то это инверсия F – устойчивая стратификация атмосферы и скорость ветра до 1м/с, а также появление в определенный момент времени после выброса (интервал времени зависит от состояния атмосферы) в центральной части взрывоопасного облака мощного источника воспламенения (не менее 100 гр. ТНТ), например, мощной тротиловой шашки, мощной вольтовой дуги, интенсивного механического удара или разряда молнии.

Зачастую дефлаграционный взрыв реализуется при взрывном горении подавляющего количества ТВС и происходит на ОПО значительно чаще. Согласно экспериментальным данным и результатам расследований промышленных аварий [6, 7], при распространении углеводородных облаков «в открытых» (не полностью замкнутых) пространствах даже при их сильном загромождении, режим горения протекает со скоростью, не превышающей околозвуковую скорость (≈ 250 – 300 м/с), без эффекта разгона фронта горения с последующим переходом к детонации [8].

Количественная оценка запаса прочности конструкции при дефлаграционном и детонационном типах взрывного превращения показывает, что для обеспечения устойчивости здания, на которое воздействует ударная детонационная волна, необходим удвоенный запас прочности по сравнению с воздействием дефлаграционной волны сжатия той же интенсивности.

1.3 Оценка параметров ударных волн

Для определения взрывной нагрузки, приходящей на здания и сооружения, проводят анализ зависимости импульса от избыточного давления в процессах дефлаграционного горения в открытом пространстве и помещениях, физического и химического (детонация) взрывов, путем построения диаграмм «избыточное давление – импульс», (*P-I*) диаграмм. В зависимости от источников энергии рассматривают физические и химические взрывы. Источником энергии физических взрывов служит энергия сжатой газовой фазы. При химическом взрыве происходит высвобождение тепловой энергии в результате химических реакций, к ним относятся взрывы горючих веществ, газовые или пылевые взрывы. Самые опасные последствия взрывов связаны с образованием динамического импульса в виде УВ. Скачок уплотнения или УВ – это распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью узкая переходная область, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и скорости. На рис. 1 показан типичный

15

профиль УВ, вызванный взрывным давлением в случае идеальной детонации. Детонация взрывного превращения. является наиболее опасным видом Детонационная волна распространяется по невозмущенной среде со сверхзвуковой скоростью, приводя к локальному повышению давления в зоне химического превращения исходного вещества в конечные продукты. В результате детонации образуется ограниченная область продуктов детонации, имеющих высокие давления и температуру, резкое расширение этой области приводит к образованию УВ в воздухе (или грунте) и взаимодействию их с какими-либо препятствиями. Иными словами, по окончанию процесса детонации от границы облака (рисунок 1.4) распространяется УВ, скорость которой больше звуковой. На рисунке 1.5 показан типичный профиль УВ, характерный для случая идеальной детонации.



Рисунок 1.4 - Схема распределения давления по взрывной волне





Здесь P_0 — атмосферное давление, кПа; P_{pos} (P_+) — амплитуда фазы сжатия, кПа; t_a — время прихода ударного фронта, с; P(t) — кривая изменения давления; I_{pos} (I_+) — импульс фазы сжатия, кПа·с; t_0 — продолжительность фазы сжатия, с; I_{neg} (I_+) — импульс фазы разрежения,

кПа·с; $P_{\text{neg}}(P_{-})$ — амплитуда фазы разрежения, кПа; t_{0}^{-} — продолжительность фазы разрежения, ча

Положительная фаза волны давления, известная как фаза сжатия, характеризуется амплитудой избыточного давления, импульсом фазы сжатия и длительностью положительной фазы; отрицательная фаза или фаза разрежения — длительностью, импульсом и амплитудой фазы разрежения. Часто в анализе используют треугольный профиль нагрузки взрыва, как показано пунктиром на рисунке 1.5, пренебрегая отрицательной фазой. Часто в анализе используют треугольный профиль нагрузки взрыва, как показано пунктиром на рис. 1, пренебрегая отрицательной фазой. Большинство эмпирических подходов к вычислению и определению профиля избыточного давления УВ взрыва были предложены и широко исследовались с середины XX в. (М.А. Садовский, 1941 г.; Н.L. Brode, 1955 г.; J. Henrych, 1979 г.; W. Baker, 1983 г.; М. Held, 1983 г.; Ч. Кингери и Дж. Балмэш, 1984 г.; Дж. Кинни и К. Грахам, 1985 г.; М.М. Ismail и S.G. Murray, 1993 г.; Р.D. Smith и J.G. Hetherington, 1994 г.; Т. Krauthammer и А. Altenberg, 2000 г.; П.Г. Белов, М.В. Бесчастнов, А.Н. Бирбраер, Б.Е. Гельфанд, Ю.Ф. Карабанов, А.М. Козлитин, А.А. Комаров, М.В. Лисанов, В.Ф. Мартынюк, А.С. Печеркин, В.И. Сидоров, С.И. Сумской, А.А. Швыряев, 2001 г.; N. Lam и P. Mendis, 2004 г.; М.Ү.Н. Bangash и Т. Bangash, 2006 г.; З. Баджич, 2007 г.; J. Borgers и J. Vantomme, 2008 г.; М. Teich и N. Gebbeken, 2010 г.). В зарубежной практике уравнение Фридлендера наиболее часто используется для описания профиля взрывной волны из-за его простоты в сравнении с другими эмпирическими соотношениями. Исходное уравнение Фридлендера не зависит от атмосферного давления. Однако модифицированное уравнение Фридлендера с учетом Р₀ широко используется для моделирования УВ, будучи сравнительно более точным и достаточно простым:

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

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

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.

Импульс положительной фазы сжатия вычисляется по выражению (1.3), аналитическое решение по формуле (1.4).

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

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

Кроме того, формула (1.4) служит альтернативным решением в определении декремента затухания b, в том случае, если параметры P_{pos} , I_{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. Балмэш [9]. Пиковое давление вычисляют с помощью уравнения, реализованного в подходе CONWEP [10].

При встрече ударной волны с жесткой преградой происходит ее отражение и навстречу падающей волне начинает распространяться волна отражения. Давление, ощущаемое поверхностью, представляет собой совокупный эффект падающей волны и отраженной:

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

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 в п.1.4 Главы 1. Согласно [10] значение падающей на поверхность УВ можно найти исходя из модифицированного уравнения Фридлендера (1.1), пиковое отраженное давление определяется согласно (1.6):

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

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

$$\Delta P = P_i \,, \tag{1.7}$$

Подход CONWEP реализован в программном комплексе по моделированию взрывных нагрузок LS-DYNA, который встроен в пакеты программ ANSYS и MD NASTRAN, также он поддерживается программой MEDINA. Применение заданных функций, представленных в подходе, позволяет описать пиковое давление и импульс, приходящие на конструкцию, с приемлемой точностью. Однако ограничения данного подхода состоят в том, что он не учитывает эффект «затухания» ударной волны из-за наличия объектов, находящихся на пути ее распространения и локальные эффекты ее отражения от элементов конструкции. Учет геометрических характеристик окружающего пространства есть в методике [3, с. 15], степень загроможденности пространства определяет скорость взрывного превращения облака TBC.

Согласно [11] избыточное давление детонационной волны определяется как разность между абсолютным давлением на фронте детонационной волны и атмосферным давлением. После того, как детонационная волна достигла границы облака, в окружающем его воздухе

Для вычисления параметров ударной волны на заданном расстоянии от источника инициирования заряда с учетом количественного значения массы тротила обычно предварительно рассчитывается соответствующее приведенное расстояние (Z) по соотношению (1.8).

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}},\tag{1.8}$$

где *R* – расстояние от центра облака до рассматриваемой точки, м; *W* – количественное значение массы тротила, кг.

Изменение давления за фронтом УВ с расстоянием представлено на рисунке 1.6



Рисунок 1.6 - Изменение давления за фронтом УВ с расстоянием

В основе такого моделирования параметров УВ заложен принцип «кубического корня» Хопкинсона: «Подобные ударные волны образуются на тождественно равных приведенных расстояниях в тех случаях, когда два заряда одного и того же вещества подобной геометрии, но различного размера детонируют в одинаковой атмосфере» [12, с. 154].

Уравнение, предложенное Дж. Кинни и К. Грахамом, отражает зависимость избыточного давления от приведенного расстояния (*Z*) при реализации сценария химического взрыва и может быть записано в следующем виде:

$$\frac{P_{\text{pos}}}{P_0} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2}} \text{ (fap).}$$
(1.9)

Отечественные подходы в области промышленной безопасности при исследовании взрывов облаков ТВС также применяли понятие тротилового эквивалента по энергии, считая, что эти взрывы аналогичны взрывам твердых (конденсированных) взрывчатых веществ [13].

$$\Delta P_{\phi} = 0.085 \cdot \frac{\sqrt[3]{W}}{R} + 0.3 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R^2}\right)^2 + 0.8 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R^2}\right)^3 (\text{M}\Pi\text{a}).$$
(1.10)

Следует заметить различия в обозначении пикового избыточного давления в отечественных источниках (ΔP_{ϕ}), которое следует понимать как избыточное давление во фронте УВ и в зарубежных источниках, часто встречающееся (P_i), (P_{max}) или обозначение амплитуды фазы сжатия (P_{pos}).

Основываясь на проведенном эксперименте, З. Баджич в работе [15] модифицировал уравнение М.А. Садовского и представил новое соотношение для вычисления пикового избыточного давления:

$$\Delta P_{\phi} = 1.02 \cdot \frac{\sqrt[3]{W}}{R} + 4.36 \frac{\sqrt[3]{W^2}}{R^2} + 14 \frac{W}{R^3} (\text{foap}).$$
(1.11)

Однако, модели взрыва облака ТВС, основанные на тротиловом эквиваленте, не способны правильно описать явления, происходящие в ближней зоне объемного взрыва ТВС. Это объясняется тем, что начальные условия формирования УВ при взрыве парового облака по уровню давления и геометрическим размерам резко отличны от таковых при взрыве конденсированных взрывчатых веществ [16]. В непосредственной близости от места взрыва конденсированного взрывчатого вещества давление может превысить 1 ГПа, в то время как максимальная величина избыточного давления в результате детонационного взрыва ТВС в ближней зоне не превышает 2 МПа [17]. Время передачи энергии в УВ при детонации ТВС существенно больше. Более того при газовой детонации доля выделившейся энергии, передающаяся в УВ существенно меньше доли энергии, передающейся в ударную волну при детонации при конденсированном ВВ. По иному идет и диссипация энергии в воздушных ударных волнах: при взрыве конденсированных ВВ она более интенсивна, в силу большей интенсивности волны.

Таким образом, методики, основанные на тротиловом эквиваленте, могут использоваться в качестве консервативной оценки необходимой для экспресс-анализа устойчивости объектов при условии их расположения в средней и дальней зоне.

В такой ситуации примерно 40 лет назад начали отказываться от метода тротилового эквивалента при оценке действий газовых взрывов. Появились методики, учитывающие указанные выше специфические особенности газовых взрывов. К таким методикам относится методика, изложенная в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» [3, с. 15]. Представленный в руководстве метод расчета позволяет учитывать агрегатное состояние и энергетические характеристики

ТВС, связывая последствия взрыва газопарового облака с конкретным потенциально опасным веществом. Расчет параметров ударной волны можно произвести для индивидуального горючего газа, для смеси газов и для гетерогенной системы, кроме того, данная методика учитывает размеры облака и возможный дрейф, и положение облака относительно земли.

1.4 Отражение и дифракция падающей ударной волны

Нагрузки на здания и сооружения от действия ударной волны определяются с учетом её взаимодействия с преградой (отражения, обтекания, затекания). При встрече УВ с жесткой преградой происходит её отражение и навстречу падающей волне ($\Delta P_{\phi 1}$) начинает распространяться волна отражения ($\Delta P_{\phi 2}$). При взрыве облака ТВС на определенной высоте над преградой в некоторой точке пространства происходит нормальное отражение (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 - Нормальное отражение УВ от преграды

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. Параметры отраженной УВ рассчитываются из условия, что на преграде, а следовательно, на фронте отраженной волны скорость течения воздуха равна нулю. Перепад давления на фронте отраженной волны зависит от угла встречи (а) УВ с преградой.

Углом падения волны называется угол α, образованный поверхностью преграды и касательной к фронту волны с вершиной в точке касания (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 - Угол встречи УВ с преградой (α)

Нормальным отражением считается такое отражение, при котором угол между нормалью к преграде и направлением распространения фронта волны равен нулю (α =0). При α >0 возникает так называемый «косой удар». Величину отраженной волны при α =0 находят по разработанной теории отражения УВ, экспериментально подтвержденной А.В. Беляевым, а при α >0, используя формулу Измайлова-Крюссара. В Руководстве по безопасности [3, с. 17] используются логарифмические соотношения для расчета параметров отраженной УВ при её нормальном падении на преграду.



Рисунок 1.9 - Регулярное отражение

Различают регулярное (рисунок 1.9) и нерегулярное (рисунок 1.10) отражение. При регулярном отражении в точке касания падающей УВ и преграды возникает отраженная волна, которая всё время движется за падающей УВ, не опережая её. Точка пересечения обоих волн находится на поверхности преграды.



Рисунок 1.10 - Нерегулярное отражение

Для нерегулярного отражения характерно поведение фронта отраженной волны, при котором он догоняет фронт падающей волны и постепенно сливается с ним по мере слияния больших участков падающей и отраженных волн. Точка пересечения двух фронтов постепенно отрывается от поверхности преграды, образуя фронт третьей УВ ($\Delta P_{\phi 3}$), называемая головной волной. В целом картину отражения падающей УВ от поверхности можно представить следующим образом (рисунок 1.11). В зоне так называемого эпицентра взрыва образуется нормальное отражение α =0; в ближней зоне, границы которой находятся на расстоянии равном

высоте инициирования облака, образуется регулярное отражение угол $\alpha \leq \alpha_{\text{кр}}$, где $\alpha_{\text{кр}}=40^{\circ}$; и, наконец, в дальней зоне, границы которой больше расстояния от точки инициирования облака до поверхности в 5 раз, образуется нерегулярное отражение, $\alpha > \alpha_{\text{кр}}$, т.е. $40^{\circ} < \alpha \leq 90^{\circ}$.



Рисунок 1.11 - Общая схема отражения УВ

1.5 Методики численного моделирования для определения избыточного давления во фронте ударной волны

Существующие методики, упомянутые выше и применяемые для оценки воздействия УВ на объекты, в основном разработаны на результатах натурных экспериментальных исследований. Эти методики описывают, как правило, взрывы сферических облаков на открытом пространстве.

При помощи данных методик есть возможность рассчитать поля давлений и импульсов при взрывах, определить радиусы зон и уровни возможных разрушений, а также частоту воздействия падающей УВ на здание, сооружение [3, 18, 19, 20]. Однако они позволяют приблизительно определить возникающие разрушения и не учитывают реальную застройку ОПО, рельеф, реальную форму облака и переменную концентрацию в нем, местоположение источника воспламенения. На сегодняшний день наиболее адекватно оценить параметры взрывной нагрузки позволяют средства численного моделирования с использованием математических моделей, описывающих распространение продуктов взрыва и ударных волн в 3-х мерном пространстве.

Методы наиболее точно оценивающие последствия аварийного взрыва используют подход вычислительной гидродинамики (CFD – computational fluid dynamics) для расчёта нагрузки взрыва в определенных точках конструкции. Программное обеспечение, основанное

на подходе CFD, учитывает пространственные изменения нагрузки, геометрию застройки, форму облака TBC и расстояние между источником взрыва и конструкцией. Сравнение расчетов по российским нормативным методикам, входящим в компьютерный комплекс TOXI+, и зарубежным методикам, используемым в программах PHAST и FLACS, для типовых сценариев аварий с выбросом горючих жидкостей, сжиженных углеводородов и токсичных веществ показало, что применение методик, основанных на «тротиловом эквиваленте» оценки последствий взрыва TBC, дают наиболее консервативные расстояния зон разрушения (без учета дрейфа облака TBC). Различие в величине расстояний в зависимости от условий могут отличаться от 2 до 10 раз по сравнению с экспериментами и расчетами, выполненными по методикам, разработанным в соответствии с действующими нормативно-методическими документами Ростехнадзора [3, 18, 19, 20] (TOXI+), BST (PHAST) и вычислительной гидродинамики комплекса FLACS (CFD).

Методы доступные для прогнозирования эффектов взрыва можно сгруппировать по трем основным категориям, а именно: 1) эмпирические (или аналитические) методы, 2) полуэмпирические методы и 3) численные методы (или методы первого порядка). Эмпирические подходы разрабатываются на основе обширного анализа огромных объемов экспериментальных данных, собранных в течение длительного периода времени, и, таким образом, ограничены объемом экспериментальной базы данных. Кроме того, хорошо известно, что эмпирические уравнения не дают точных результатов при рассмотрении ближайшей от источника взрыва зоны действия УВ. Полуэмпирические подходы основаны на упрощенных моделях физики явлений. В этих подходах основное внимание уделяется моделированию физических процессов в значительно упрощенном виде. Этот подход в основном зависит от обширных данных и тематических исследований, а точность, как правило, выше, чем та, которая обеспечивается эмпирическим подходом. Численный или метод первого порядка включает совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов. В этих методах математические функции описывают законы сохранения массы, импульса и энергии. Динамическое поведение материалов при этом описывается эмпирическими зависимостями, полученными на основе экспериментов, проведенных на этих материалах. Под эту категорию подпадают методы: FEM (Finite Element Method) – метод конечных элементов, FDM (Finite-difference Method) – метод конечных разностей и метод граничных элементов BEM (Boundary Element Method).

1.6 Расчет радиусов зон разрушения

В существующей практике количественного анализа риска взрыва динамическая нагрузка, возникающая при взаимодействии УВ с конструктивными элементами зданий и сооружений, в случае реализации сценария аварийного взрыва, напрямую зависит от вида

24

взрывного превращения. Тип взрывного превращения влияет на интенсивность И продолжительность ударной нагрузки. Для оценки параметров действия взрыва, по методике, изложенной в Руководстве по безопасности [3, с. 17], используют специальную экспертную таблицу института Химической Физики РАН, в которой топлива, способные к образованию горючих смесей с воздухом, разделены на определенные классы по чувствительности к инициированию взрывных процессов. Геометрические характеристики окружающего пространства разделены на четыре класса в соответствии со степенью их потенциальной опасности (степенью загроможденности). В зависимости от типа вещества и вида окружающего пространства экспертная таблица (табл. № 2 Приложения 3 [3, с. 19]) позволяет определить наиболее вероятный режим взрывного превращения смеси. Однако, для большинства расчётов выбор степени загроможденности окружающего пространства является решающим фактором в определении диапазона скорости взрывного превращения. Несмотря на то, что далее в расчетах параметров УВ (избыточного давления ΔP и импульса волны давления I) скорость фронта пламени полагается равной значению верхней границы для данного диапазона, однако субъективное определение геометрических характеристик окружающего пространства технологической установки нередко вызывает трудности и заведомо могут быть неверно определены, т.к. при дрейфе облако ТВС может затечь как в более загроможденное пространство, так и в менее загроможденное, что повлияет на режим превращения и как следствие размеры зон разрушения. Методикой [3, с. 3] допускается использование более точных значений скорости взрывного превращения при их обосновании, однако в настоящий момент в практике расчетов не применяются.

Рассмотрим аварию на изотермическом резервуаре для хранения СУГ объемом 60000 м³. Исходными данными для расчета служат следующие параметры: температура t_{pa6} , при которой опасное вещество (пропан) находится внутри резервуара (-41) °C; давление P_{pa6} в резервуаре – 108 кПа; масса $m_{r\phi}$ пропана в резервуаре – 7 т.; $m_{x\phi}$ – 33043 т.; $t_{воздуха}$ – 27 °C; Размеры бетонного обвалования: 101 м ×100 м× 7 м. Площадь боковой поверхности обвалования: 2734 м². Площадь подстилающей поверхности обвалования: 10100 м². Принято, что площадь контакта с твердой поверхностью включает боковую поверхность обвалования и подстилающую поверхность (консервативное допущение): 12834 м².

Наиболее опасный по последствиям будет сценарий аварии с полным разрушением резервуара и мгновенным выбросом опасного вещества в окружающую среду, частота разгерметизации резервуара полной герметизации «full-containment» при таком сценарии составляет 1·10⁻⁸ год⁻¹, согласно табл.4-4 Руководства по безопасности «Методически основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных

объектах» [18]. Частота самого сценария, при условной вероятности реализации взрывного превращения с учетом отложенного воспламенения – 0,0095, составит 9·10⁻¹¹ год⁻¹.

Результаты расчетов изменения массы пропана, способного участвовать во взрыве, при дрейфе облака ТВС в условиях изотермии со скоростью ветра 1 м/с, а также избыточного давления на фронте падающей УВ в зависимости от расстояния до центра облака ТВС, приведены на рисунках 2 и 3. Расчет проводился с помощью программного комплекса TOXI+risk, версия 5.0. Масса во взрывоопасных пределах на момент времени 800 с составляет более 121 т. Размеры зоны НКПР на момент времени 800 составляют X_{min} =-1051, X_{max} =2026, Y_{max} =1538, Z_{max} =4. Дрейф центра масс облака ТВС составит 350 м.



Рисунок 1.12 - Изменение массы горючего вещества, способного участвовать во взрыве (резервуар изотермический для хранения пропана объемом 60000 м³)

Результаты расчетов радиусов зон разрушения в результате воздействия УВ с заданным избыточным давлением, следующие: 70 кПа – 249м; 53кПа – 365 м; 28 кПа – 532м; 14кПа - 847 м; 12 кПа – 951м; 5кПа – 2109 м. Радиусы отсчитываются от центра облака ТВС в момент его инициирования (зажигания). С учетом условной вероятности поражения человека при наступлении сильной степени разрушения зданий (табл. 4 приложения № 3 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» - далее ФНП ОПВБ [21]) все люди, находящиеся в неукрепленных зданиях, расположенных в радиусе 249 м от эпицентра взрыва, либо погибнут при обрушении здания, либо получат серьезные травмы в результате действия УВ.



Рисунок 1.13 - Избыточное давление на фронте падающей ударной волны в зависимости от расстояния до центра масс облака ТВС

На рисунке ниже (Рисунок 1.14) показана типичная зависимость вероятности разрушения зданий, подлежащих сносу (т.е. полного разрушения) и повреждений зданий, при которых возможно восстановление без их сноса, от удаления от эпицентра взрыва. Для практических вычислений приведенная зависимость аппроксимируется трапецией, которая разбивает зависимость на две зоны. В первой зоне для $R < R_{100}$ вероятность равна единице, а для зоны $R_{100} < R < R_{01}$ определяется из соотношения:

$$P=1-(R-R_{100})(R_{01}-R_{100}).$$
(1.12)



— Повреждение промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса (поражение человека в здании по МЧС)

— Длительная потеря управляемости у людей (состояние нокдауна) – поражение человека вне зданий (по МЧС)

— Отброс людей волной давления

Разрушение промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу

Разрыв барабанных перепоноку людей

Рисунок 1.14 - Зависимость условной вероятности разрушения зданий и поражения человека от расстояния эпицентра взрыва, %

Таким образом, оценка поражающего воздействия ударной волны по условной вероятности разрушения зданий на различных расстояниях от эпицентра взрыва показывает, что с вероятностью 87%, принятой для практических вычислений как 100%, на расстоянии 201 м. от эпицентра взрыва произойдет полное разрушение зданий, при котором здания подлежат сносу. На расстоянии 1135 м. от эпицентра взрыва разрушатся здания, не подлежащие восстановлению с вероятностью – 1%. В целях соблюдения п.3.1 Приложения №3 ФНП ОПВБ [21, с. 105] необходимо размещение неукрепленных зданий и сооружений на расстоянии не менее 1135 м. от изотермического резервуара, что на практике практически неосуществимо.

1.7 Выводы по главе 1

Анализ статистики и результатов расследования аварий на ОПО нефтегазовой отрасли показывает, что воздействия вызванные взрывными нагрузками, возникающими вследствие аварий, на здания и сооружения, а также технологическое оборудование, влекут за собой наиболее тяжелые последствия. За 12 месяцев 2016 года на объектах нефтехимии, нефтепереработки, нефтепродуктообеспечения из общего числа аварий почти половина из всех произошедших аварий (44,4%) связаны с видом «взрыв», доля которых по сравнению с тем же периодом 2015 года возросла на 12,4%.

Из обзора существующих подходов оценки параметров ударных волн, можно сделать вывод, что большинство из них основаны на результатах натурных экспериментальных исследований, результаты которых отразились в методике «тротилового эквивалента». Однако, недавно разработанные отечественные методики, нашедшие свое отражение в нормативных документах в области промышленной безопасности, учитывают тип взрывного превращения (детонация/дефлаграция) при воспламении ТВС, что позволяет снизить избыточный консерватизм в расчетах параметров УВ. Имеющиеся в настоящее время средства численного моделирования, основу которых составляют математические модели, адекватно отражающие распространение эффектов взрыва и УВ, позволяют более точно оценить последствия аварийного взрыва.

Детерминированный подход в определении взрывоустойчивости зданий по критерию максимально возможной взрывной нагрузки при внешнем взрыве дает результаты с безопасными расстояниями по барическому воздействию, значительно превышающие территорию самого ОПО. Однако, проектирование новых объектов с повышенной энергоемкостью требует обоснования расстояний с учетом применения современных мер защиты. Для новых, вновь строящихся объектов, особенно содержащих СУГ, проектирование которых проводится с учетом современного опыта обеспечения надежности технологических систем и предупреждения аварий, увеличение размеров производственной площадки может привести к повышению значений риска.

28

ГЛАВА 2. РАЗРУШЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ. АНАЛИЗ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОТ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА

2.1 Оценка проявления устойчивости строений по отношению к взрыву

Для взрыва облака TBC с появлением разрушительного для оборудования и строений избыточного давления необходимо четыре условия.

Во-первых, должно произойти выделение горючей смеси при соответствующих давлении и температуре. Сюда относятся сжиженные газы под давлением, обычные горючие жидкости (особенно при повышенных давлениях и / или температурах) и горючие газы. При разлитии горючей жидкости часть ее испаряется, формируя аэрозоль. Эту дисперсию называют облаком пара. Во-вторых, воспламенение должно запаздывать по времени для формирования облака пара достаточного размера. Максимальный размер горючего облака, как правило, достигается через 30-60 секунд, так что задержка воспламенения не является длительной. Если воспламенение произойдет почти мгновенно, возникнет пожар или огненный шар, но не взрыв ТВС.

В-третьих, соотношение топливо-воздух в достаточном объеме облака пара должно находиться в диапазоне взрывоопасных пределов. Чем более однородной является воздушно-топливная смесь, ближе к стехиометрическому составу горючей смеси, тем сильнее взрыв.

И наконец, должен присутствовать механизм ускорения пламени, такой как область, с большим количеством оборудования, в условиях сильно загроможденного пространства внутри горючей части облака пара. Избыточные давления, производимые взрывом облака пара, определяются скоростью распространения пламени в облаке. Объекты на пути пламени (такие как области с большим количеством трубопроводов, колонного оборудования, теплообменных аппаратов и т.д.) увеличивают турбулентность пара и пламени. Эта турбулентность приводит к значительно большей скорости пламени, которое, в свою очередь, может создавать избыточные значительные лавления. Средства изоляции, которые ограничивают распространение пламени, такие как прочные консоли, в многоуровневых рабочих конструкциях, также увеличивают скорость пламени. Без ускорения пламени может возникнуть крупный огненный шар или пожар облака ТВС, но не взрыв.

Таким образом, центр облака TBC не обязательно находится в месте выделения опасного вещества, в точке воспламенения или в центре облака пара. Скорее, центр взрыва облака пара, как правило, находится в области с большим количеством оборудования или трубопроводных эстакад. Если в горючей части облака пара находятся модули с большим количеством оборудования, могут возникнуть многочисленные взрывы по мере распространения пламени, то есть серия каскадных взрывов и будет наблюдаться эффект эскалации аварии. Для детонационного взрыва характерны возможность возникновения значительного давления на фронте УВ и кратковременность действия (десятые и даже сотые доли секунды). На практике, на установках ОПО, где есть возможность возникновения детонационного взрыва, большинство строительных конструкций рассчитывают на нагрузку от действия УВ, т.е. за пределами облака. Если же конструкция находится внутри него, то на нее действует давление детонационной волны, которое настолько велико, что обычные сооружения выдержать его не могут. Изменение избыточного давления при дефлаграционном взрыве протекает иначе, чем при детонации: нарастание происходит медленнее и максимальная величина меньше, но длительность больше. Поэтому такое нагружение по характеру ближе к статическому [11].

Расчет конструкций объектов, подвергающихся действию взрывных нагрузок, производится:

- на основное сочетание нагрузок в соответствии с требованиями норм [22];

- на особое сочетание нагрузок, состоящее из статических (постоянных и длительных) и динамических нагрузок, вызванных взрывными волнами.

В особом сочетании не учитываются кратковременные нагрузки, установленные в нормах [22] длительная снеговая нагрузка учитывается, если она создает неблагоприятную комбинацию усилий. Коэффициенты надежности по нагрузке для всех учитываемых нагрузок принимаются равными единице. Динамическая нагрузка считается приложенной нормально к поверхности конструкции и равномерно распределенной по ее грузовой площади.

Расчет конструкций на действие взрывных волн производится методами динамики сооружений, в которых существуют три основных направления [23]: численные методы высокой точности с использованием диаграмм деформирования материалов «σ-ε», реализованные В программных комплексах; приближенные динамические методы, позволяющие в результате решения обыкновенных дифференциальных уравнений получать аналитические расчетные зависимости; упрощенные методы расчета, основанные на применении эквивалентных статических нагрузок, получаемых в результате обобщения данных динамических расчетов.

К численным методам относятся сложные методы анализа систем со многими степенями свободы, которые позволяют оценить реакцию элементов конструкций или сложных систем. В отличие от аналитических методов, на основе которых можно рассчитать только конечное состояние конструкции, численные методы позволяют получить динамику изменения состояния конструкций во времени, необходимой для расчетов по предельным состояниям.

Преимуществом приближенного решения является - то, что оно позволяет установить влияние увеличения или уменьшения любых параметров нагрузки на напряжения и

деформации в конструкции при помощи графических построений. Часто для получения решения требуется численное интегрирование уравнений.

К упрощенным методам – относятся методы приведения конструкций к системам с одной и двумя степенями свободы, используемые для описания динамического поведения элементов конструкций. Результаты расчетов, могут быть представлены графически – на диаграммах подобия или в аналитической форме. Упрощенные методы основаны на инженерных приближениях и схематизации конструктивных элементов объектов.

На основе результатов экспериментального и численного анализа должны быть приняты меры по взрывоустойчивому проектированию конструкции, соответствующие отечественным нормам и подтверждающие устойчивость таких конструкций к рассмотренному уровню угроз. Таким образом, анализ дает уверенность в том, что сооружение сможет противостоять заданным параметрам взрыва.

2.2 Параметры пределов деформации

Как упоминалось выше основным видом внешнего воздействия на конструкцию является нагрузка. При статическом нагружении конструкция деформируется и находится в состоянии равновесия, которое характеризуется внутренними усилиями и перемещениями. Напряженно-деформированное состояние конструкции рассматривается как физический процесс. Рост нагрузки на конструкцию возможен до тех пор, пока не будет достигнута величина, отвечающая предельному состоянию конструкции по прочности. Такое значение нагрузки называется несущей способностью конструкции.

В динамически нагруженных конструкциях материал находится, как правило, в сложном напряженно-деформированном состоянии, изменяющемся во времени. Проявляющиеся при этом свойства могут существенно отличаться от статического поведения — при низких скоростях деформации. Сложности при анализе динамических экспериментов возникают в связи с волновыми процессами в образцах, когда инерционные силы накладываются на внутренние усилия, характеризующие свойства материала [13].

В случае нагрузки от взрыва, максимальная динамическая реакция ограничивается для того, чтобы предотвратить разрушение составляющих частей конструкции и выдержать взрывные нагрузки посредством указания критерия смещения, который косвенно учитывает приемлемый уровень ущерба. В отечественном пособии по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок [24], есть указания по исключению возможности разрушения основных несущих и ограждающих конструкций во взрывоустойчивых зданиях. Допускаются повреждения конструкций случайного характера, не

влияющие на их прочность, устойчивость и некоторые эксплутационные характеристики, а также требующие незначительных материальных затрат на проведение ремонтных работ.

Также указания по исключению возможности разрушения основных несущих представлены и в зарубежном документе Комитета по вопросам взрывоустойчивого проектирования нефтехимических объектов ASCE [25], эксплуатационные характеристики сооружений на ОПО, помимо функциональности, должны включать возможность дальнейшего использования после взрыва. Как указано в [25] основные критерии реакции конструкционного элемента на динамическое воздействие - это коэффициент пластичности и угол поворота прогибающейся от нагрузки балки (плиты/ панели). Коэффициент пластичности (µ) определяется как отношение максимального отклонения деформированного элемента (X_m) к эквивалентному упругому отклонению (X_e), формула (9). Коэффициент пластичности связан с пластической деформацией, и предполагается, что разрушение конструкции происходит, когда значение пластическое изображение зависимости между напряжениями и деформациями материала. Графическое изображение зависимости между напряжениями и деформациями материала при нагружении представлено на рисунке 2.1, где г_u – предельное значение сопротивления.





Угол поворота прогибающейся от нагрузки балки — это еще один критерий реакции элемента, который соотносит максимальный прогиб с расстоянием между пролетами конструкции и определяет степень нестабильности для критических участков элемента. Угол поворота обозначается символом θ и определяется несколькими способами (рисунок 2.2). Первый способ заключается в нахождении угла, θ_1 , сформированного между линией, соединяющей конечные точки балки или опоры, и линией, соединяющей конечную точку прогиба и ближайшую конечную точку балки. Второй способ — по прилежащему углу, θ_2 ,

сформированному между двумя линиями, отходящими от точки максимального отклонения балки.



Рисунок 2.2 – Определение угла поворота прогибающейся от нагрузки балки

$$\theta_1 = \operatorname{arctg}(\frac{2X_m}{L}) \tag{2.2}$$

$$\theta_2 = 2\theta_1, \tag{2.3}$$

В качестве примера рассмотрим диаграмму напряженно-деформированного состояния (рисунок 2.3) с предельными значениями критериев реакции на динамическое воздействие для стальной пластины. Диапазоны критериев представлены для трёх уровней разрушения, которые имеют общий характер как для стальных компонентов конструкции, так и для компонентов из железобетона. Область – [X_e; X₁] соответствует низкому уровню разрушений, в которой устойчивое повреждение компонента отсутствует или едва заметно. В области – [X₁; X₂] компонент подвергается устойчивой деформации, при которой характерны средние повреждения. В области с высоким уровнем разрушений [X₂; X₃] компонент подвергается значительной деформации, после которой восстановление практически невозможно. Затем наступает область разрушений при которой компонент полностью утрачивает структурную целостность.

Предельные значения параметров деформации для стальных и железобетонных компонентов указаны в Приложении 5.В [25]. Прогнозируемую реакцию элемента необходимо сравнить с коэффициентом пластичности μ и максимальным углом поворота θ, чтобы убедиться, что ни одно из этих значений не превышено.



Рисунок 2.3 – Диаграмма напряженно-деформированного состояния стальной пластины с предельными значениями критериев реакции

Таким образом, значения коэффициента пластичности и угла поворота для разных материалов используются в качестве критериев реакции при взрывозащищенном проектировании

2.3 Основные принципы взрывоустойчивого проектирования

В целях проектирования конструкций рассматривают различные виды нагрузок и их сочетаний (рисунок 2.4). К основным принципам взрывоустойчивого проектирования относятся следующие:

- Недопущение разрушения конструкций при взрывах, определяемых как возможные при количественной оценке рисков.

- Защита людей в зданиях с постоянным пребыванием людей.

- Обеспечение срабатывания системы ПАЗ в безопасных условиях на установках, расположенных рядом с установкой, на которой происходит взрыв.

- Обеспечение перезапуска установок, расположенных рядом с установкой, на которой происходит взрыв, если при этом практически не пострадали несущие конструкции.

Следовательно, если на технологической установке произойдёт взрыв:

- Не должна разрушиться несущая, т.е. основная конструкция. Согласно руководству [25], несущая конструкция должна проектироваться таким образом, чтобы на ней возникали только т.н. средние разрушения, т.е разрушения общивки модулей и второстепенных конструкций.

- Для блока или модуля, на котором произошёл внутренний взрыв, допускается значительный уровень повреждений.

- Не должны разрушиться модули/эстакады/здания на технологических установках, расположенных рядом с данной установкой, а несущая конструкция должна оставаться в

упругойдеформации материала. Если для обеспечения того, чтобы несущая конструкция оставалась в области упругой деформации, потребуются более тяжелые конструкции, чем при проектировании конструкции без обеспечения взрывоустойчивости, то, в зависимости от обстоятельств и при согласовании с владельцем ОПО, могут допускаться пластические деформации, при условии, что они обеспечивают меньшие разрушения, согласно определению, в руководстве [25].



Рисунок 2.4 – Нагрузки и их сочетания на конструкции и сооружения ОПО

Цель инженера – проектировщика – уменьшить возможную нагрузки на здание при проектировании. Это может быть достигнуто путем правильного планирования, проектирования и размещения строений на доступном участке. В идеале строение должно располагаться как можно дальше от периферии завода и линий собственников.

Установлено, что формы строений и размеры значительно влияют на расчетную ударную нагрузку. На основании исследований и опыта предыдущих событий было замечено, что для снижения проектных нагрузок следует избегать нормального отражения. Исследования по влиянию формы структур на взрывные нагрузки представлены в работе [77]. Показано, что в

случае квадратных и прямоугольных секций с длинными гранями существует почти постоянный пик отраженного давления по всему раскрытому краю грани с нормальными отражениями в центре и регулярными отражениями вблизи углов здания. Кроме того, квадратный край приводит к более высокому пику отраженного избыточного давления по сравнению с длинным прямоугольным. В случае строения с круговой формой, наивысшее пиковое отраженное избыточное давление наблюдается в точке на границе, ближайшей к взрыву, и где нормальное отражение происходит с уменьшением величины в сторону обеих и сторон центра. Кроме того, форма фасада также влияет на нагрузку, испытываемую зданием в случае взрыва. Доказано, что параболическая форма или кубическая форма лучше, чем вертикальный фасад лицевой поверхности здания.

Для проектирования взрывоустойчивой конструкции необходимы хорошие проектные и строительные навыки, а также знание характеристик УВ и поведения конструкций и их элементов при взрывных нагрузках. После определения условия нагрузки и выбора места расположения, инженер - проектировщик участвует в выборе необходимого типа конструкции, способного выдержать потенциальное взрывное воздействие. Хотя все виды конструкций обеспечивают определенный уровень сопротивления взрыву, существуют более подходящие конструкции по сравнению с другими [26].

Наиболее важной особенностью взрывоустойчивой конструкции является способность поглощать энергию взрыва, не вызывая общее катастрофическое разрушение конструкции. Строительные материалы во взрывозащищенных конструкциях должны быть достаточно гибкими и прочными. Кроме того, при взрыве на ОПО, вследствие взрывной нагрузки на одной стороне здание будет подвергаться воздействию поперечной силы, внутреннему усилию, возникающему в конструкции в ответ на действие внешней нагрузки. Чтобы конструкция могла показать максимальный уровень взрывоустойчивости, ее рама и фундамент должны выдерживать такую большую поперечную нагрузку. Это требование аналогично требованиям для сейсмоустойчивой конструкции. В целом, ряд сейсмоустойчивых конструкций в некоторой степени являются взрывоустойчивыми. Составные части взрывоустойчивой конструкции должны иметь соответствующий потенциал деформации для формирования механизма гибкости.

Железобетон обычно считается наиболее подходящим и экономичным строительным материалом для взрывоустойчивых конструкций, особенно для объектов, расположенных вблизи потенциального источника взрыва, где конструкции будут подвергаться относительно высоким избыточным давлениям и термическим эффектам при взрыве. Однако, это не означает, что нельзя проектировать здания с металлическим каркасом или со стеновым заполнением из

36
листового металла, главное требование в таком случае, чтобы они располагались на соответствующем расстоянии от источников опасности.

Для взрывоустойчивых конструкций хрупкий материал не подходит. Примерами такого типа строительного материала являются неармированный бетон, кирпич, древесина. Кроме того, что они уязвимы к катастрофическим внезапным разрушениям при взрывной нагрузке, такие материалы после взрыва производят много осколков и обломков, которые могут привести к повреждению оборудования и серьезным травмам персонала. Древесина и изделия из дерева, используемые для промышленных зданий, могут стать источником пожароопасности. Основной критерий для оценки такой конструкции - характер разрушения при больших нагрузках. В целом хрупкий материал должен использоваться только во внешней оболочке взрывоустойчивой конструкции при соответствующем армировании, для обеспечения пластичности и пластичного каркаса для поперечного сопротивления конструкции при взрывной нагрузке.

Фиброармированные полимерные композиты (ФАП) в настоящее время широко используются за рубежом в качестве усиления конструкций вместо железобетонных плит, т. к. они более прочны, более стойкие к коррозиям и гораздо более удобны в транспортировке, применении и установке. Самое большое преимущество ФАП композитов – это их способность принимать заданные свойства. Они легко подстраиваются под специфические условия среды, в отличие от других материалов, например стали, обладают низкой ползучестью, легкостью, высоким пределом прочности на растяжение (в 10 раз выше, чем у стали), отсутствием коррозии, и, таким образом, оптимальны в применении. Процедура упрочнения с помощью ФАП композитов не требует много времени, проста в технологии, а сам материал делает здание более взрывоустойчивым. В основном в состав ФАП входят композитные материалы на основе углеродного, арамидного, базальтового и стекловолокна. Очевидно, расходы на ФАП композиты, по сравнению с другими материалами, являются препятствием в принятии решения по внедрению данной технологии взрывозащиты. Однако, непосредственное сравнение цен за единицу элемента может быть неправильным. Если в стоимость включить установку и логистику, то стоимость ФАП может коррелировать наравне с обычными материалами [27].

2.4 Общие подходы к повышению взрывоустойчивости

Согласно межгосударственному стандарту [28] одновременное наличие взрывоопасной среды и активных источников воспламенения, а также возможные поражающие факторы взрыва, ведут к основным принципам взрывозащиты и предотвращения взрыва (рисунок 2.5):

37



Рисунок 2.5 - Основные принципы взрывозащиты

Для уменьшения уровня риска взрыва возможно применение как одного из приведенных выше принципов, так и их комбинация. Однако, предупреждение появления взрывоопасной среды – есть приоритетная мера по предотвращению взрывов.

Проблема повышения устойчивости оборудования, зданий и сооружений и обеспечение защищенности персонала от основного поражающего фактора взрыва – действия фронта УВ становится все более актуальной на сегодняшний день, т.к. большинство объектов этой отрасли функционирует ещё с середины прошлого века. Поражающее действие взрыва связано с механическим воздействием на конструкции и людей динамического импульса в виде взрывной волны и разлетающимися осколками, с выделением тепла, которое может вызвать пожары и с колебаниями почвы («сейсмовзрывное воздействие»). На основе данных, приведенных в [11, 28], была составлена номограмма (рисунок 2.6) для зданий и сооружений, специально не рассчитанных на действие УВ. С помощью номограммы есть возможность оценить степень поражения конструкций при различных значениях ударно-волновых нагрузок.



Рисунок 2.6 - Номограмма уровней поражения людей и конструкций

Рекомендации по обоснованию взрывоустойчивости зданий и сооружений базированы на методах количественного анализа риска взрыва. Обязательные требования к проведению количественной оценки риска, расчета зон поражения и риска разрушения зданий, применению критериев взрывоустойчивости зданий содержатся в подпунктах 2.1, 10.5 и приложении 3 ФНП ОПВБ [21, с. 86], пп. 4, 12 и раздела 4 Руководства [20], а также в требованиях к разработке деклараций промышленной безопасности. Согласно [20] выполнение количественного анализа риска взрыва включает: моделирование аварийного истечения и распространения ОВ при всех возможных сценариях аварийной разгерметизации оборудования и воспламенении облаков ТВС; построение деревьев событий развития аварий, сопровождающихся взрывом, с определением вероятностей исходных и конечных событий; расчет размеров зон разрушения при воздействии УВ при аварийных взрывах ТВС; расчет показателей риска взрыва ТВС, включающих оценку частоты превышения заданных значений на фронте падающей УВ для зданий и сооружений на территории ОПО. Помимо перечисленных рассчитанных показателей, результатом количественной оценки риска взрыва могут быть профили давления и пиковые значения избыточного давления, продолжительность и форма импульса падающей УВ, оказывающей барическое воздействие на соседние установки, помещения операторных и зданий административного назначения при различных сценариях взрыва.

По итогам расчетов и оценки показателей риска взрыва полученное значение частоты превышения расчетного давления сравнивают с критериальным и делают вывод об обоснованности проектных решений. Согласно Руководству [20] рекомендуемая величина допустимой частоты воздействия взрыва на здание не должна превышать 1·10⁻⁴ год⁻¹. Для оценки устойчивости конструктивных элементов объекта проводят дополнительные расчеты по распределению давления падающей УВ на его поверхности.

При проектировании сооружений, способных выдерживать внешние взрывные и ударные нагрузки, основная цель — защита людей, присутствующих в здании. Главная задача — стремление предотвратить возможность катастрофического разрушения всего здания или его значительной части. Тот же принцип распространяется и на защитные устройства, проектируемые во взрывостойком исполнении. Для функционирующих производств технические решения по повышению взрывоустойчивости зданий целесообразно применять в случае, когда проектное конструктивное исполнение здания не обеспечивает его взрывоустойчивости в предполагаемом месте размещения, а перенос здания не возможен по технологическим причинам или экономически нецелесообразен [30].

Повышение допустимых ударно-волновых нагрузок для операторных зданий может достигаться повышением взрывоустойчивости отдельных конструктивных элементов здания или усилением взрывозащиты (УВЗ) здания в целом. Основные способы УВЗ согласно [34] приведены ниже (рисунок 2.7):

Поглощение энергии ударной волны путем размещения между эпицентром взрыва и защищаемым зданием преград с деформируемыми или разрушаемыми структурами; Размещение здания заданной конструкции на расстоянии от предполагаемого эпицентра взрыва, на котором оно устойчиво к возникающим взрывным нагрузкам;

Снижение интенсивности падающей УВ путем размещения перед зданием или прямо на его стенах обтекателей; Отражение УВ путем размещения между эпицентром взрыва и защищаемым зданием преград в виде твёрдых прочных стен или барьеров из грунта, песка, бетона, стальных и композиционных материалов;

Размещение защищаемого здания в противовзрывном укрытии.

VI

Рисунок 2.7 – Основные принципы УВЗ зданий и сооружений

<u>I</u> Выбор конструкции здания, устойчивого к параметрам взрывной волны в месте его предполагаемого расположения (степень разрушения: среднее или слабое); <u>IV</u>

Все вышеперечисленные способы УВЗ относятся к пассивным мерам защиты (ПМЗ), т.к. основной принцип их действия заключается в ослаблении разрушительного действия взрыва за счет своевременного сброса из объекта защиты избыточного давления. Что же касается ПМЗ от взрыва конкретного технологического оборудования, то к ним относятся применение предохранительных устройств, т.е. предохранительных мембран, клапанов, дыхательной арматуры. Активными мерами защиты (АМЗ) принято считать: контроль за накоплением взрывоопасных паров; аварийное вентилирование помещений, флегматизация взрывоопасной среды, автоматические системы подавления взрыва, направленные на подавление взрыва при его зарождении путем введения в очаг взрыва огнегасящего средства и др.

Как у активных, так и у пассивных мер УВЗ прослеживается направленность защитного действия как в сторону подавления взрывов в замкнутом объеме, так и подавления взрывов, возникающих на открытой площадке. Однако, применение AMЗ возможно лишь при локальных взрывах малой и ограниченной мощности. Применение же ПМЗ более эффективно, т.к. в случае крупных и масштабных промышленных аварий их использование позволяет всесторонне обеспечивать безопасность оборудования и сооружений.

2.5 Анализ существующих типов пассивных мер защиты

Область пожарной и промышленной безопасности не единственная, в которой рассматриваются вопросы защиты людей и оборудования от действия УВ при взрывах. Вопросы УВЗ широко использованы в таких отраслях знаний, как взрывные работы в горном деле и промышленности, противодействие терроризму и гражданская оборона, военное дело, промышленное и гражданское строительство.

Предотвращение инцидентов и аварий, снижение производственного травматизма входят в концепцию установления приемлемой безопасности на угольных шахтах. Основные мероприятия по взрывобезопасности направлены на снижение и устранение риска взрыва метана и угольной пыли путем непрерывного контроля за состоянием атмосферы горных выработок. Однако в соответствии с требованиями Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» на шахтах, опасных по газу и разрабатывающих пласты, опасные по взрывам пыли, должны осуществляться мероприятия по предупреждению и локализации взрывов угольной пыли: применение инертной пыли (сланцевая пылевзрывозащита), воды или смачивающих составов (гидропылевзрывозащита), воды и инертной пыли (комбинированная пылевзрывозащита). Наличие таких требований обусловлено невозможностью обеспечить абсолютную надежность всех средств предупреждения взрывов метана и угольной пыли в шахтах.

Пассивные меры защиты в виде перечисленных выше методов пылевзрывозащиты в угольных шахтах представляют собой способы уменьшения интенсивности УВ в момент ее образования путем возведения на ее пути взрыволокализующих заслонов, с помощью которых изолируются наиболее вероятные очаги взрывов. Основные причины затухания УВ в подземных горных выработках и каналах — диссипация энергии в воздухе и трение воздуха о поверхность выработки [31]. До настоящего времени в России и странах ближнего зарубежья в качестве базовых средств пылевзрывозащиты используют водяные и сланцевые заслоны, они наиболее распространены и достаточно просты в конструкционном исполнении. Взрыволокализующее действие водяных и сланцевых заслонов заключается в создании гасящей среды на пути распространяющегося фронта пламени (ФП) от взрыва угольной пыли, представляющей собой облако распыленного пламегасящего вещества (вода, инертная пыль), которое образуется при воздействии на заслон УВ от взрыва.

Эффективность реализации действия взрывозащитных заслонов обеспечивается при выполнении нескольких условий. Во-первых, необходимо осуществление полного перевода всей массы инертной пыли или воды во взвешенное состояние, во-вторых, сохранение инертной пыли (воды) во взвешенном состоянии до момента прихода ФП. Первое условие будет выполняться тогда, когда модель заслонов, представляющая собой конструкцию из полок или сосудов, расположенных особенным образом, будет наиболее податлива и легка к разрушению, а само расположение заслонов находиться на оптимальном расстоянии от места возникновения взрыва или входа ФП в выработку (от 100 до 220 м). Для создания надежной локализации взрывов пыли необходимо 50–150 кг инертной пыли на 1 м поперечного сечения выработки. Соответственно, чем ближе расположен заслон к вероятному месту возникновения взрыва, тем большие весовые нагрузки требуются. Второе условие достигается за счет выбора оптимального расстояния между самими заслонами, которое обычно составляет 2–3 м, и времени существования облака 0,4–0,6 с. Эффективное срабатывание сланцевых заслонов обеспечивается при скорости $\Phi \Pi V \Phi \Pi = 80 - 235$ м/с.

Однако сравнительная простота конструкции не гарантирует эффективность сланцевых заслонов. Так, 19 марта 2007 г. на шахте «Ульяновская» (переименована в «Усковскую» в 2012 г.), расположенной в Новокузнецке Кемеровской обл., произошла крупная авария. При действии УВ, возникшей вследствие взрыва метановоздушной среды в нижней части отработанной лавы, все сланцевые заслоны были разбиты и сланцевая пыль рассыпана по горной выработке, однако взрыв угольной пыли не только не был локализован, но продолжал развиваться, увеличивая свою мощность и, соответственно, скорость распространения. Ввиду малой эффективности сланцевые заслоны не выполнили своей основной функции. В то же время на шахте «Ульяновская» использовались и современные автоматические системы

42

взрывоподавления — локализации взрывов АСВП-ЛВ. Однако из десяти установленных сработали только пять данных систем в связи с размещением в местах, где ударно-воздушная волна (УВВ) не достигла порога срабатывания. Технические параметры АСВП-ЛВ обеспечивают локализацию взрыва метана и угольной пыли, ФП которого распространяется со скоростью VФП = 40 - 660 м/с [32]. Схема действия системы АСВП-ЛВ показана на рисунке 2.8.





Несмотря на теоретически и экспериментально доказанные преимущества использования водяных заслонов в качестве устройств по снижению давления на фронте УВ, применение данного типа устройств для объектов нефтегазовой отрасли нерационально. Первый аргумент против — это то, что габариты средств защиты в виде гидравлической перемычки не позволяют разместить их в непосредственной близости от источника взрыва в условиях плотного размещения оборудования промышленных объектов. Второй весомый аргумент заключается в неэффективности разрушающихся гидравлических заслонов на открытых площадках в случае объемных взрывов облаков ТВС. Немаловажным фактором выступает и невозможность использования таких заслонов в зимний период.

Методы гражданской обороны, такие как предотвращение и смягчение последствий от чрезвычайных ситуаций, быстрое реагирование и аварийная эвакуация в случае возникновения угрозы взрыва, пожара, химических атак, подготовка и планирование мероприятий по ликвидации последствий, также применимы в области промышленной безопасности. Вопросы защиты зданий и людей от поражающих факторов взрыва широко рассмотрены в работе [33], где сформулированы основные требования, предъявляемые к убежищам гражданской обороны как эффективному средству обеспечения безопасности в случае техногенной или военной угрозы. Классификационные признаки убежищ определяются рядом параметров, на основании выборки которых принимают конструктивные решения для защитного укрытия, являющегося сооружением бункерного типа. Динамическая нагрузка от действий УВ преимущественно приходится на фронтальную стену модели убежища, в результате встречи волны сжатия с такой преградой происходит ее отражение, таким образом обеспечивается безопасность людей, находящихся внутри него.

Использование моделей защитных устройств в виде убежищ применимо в гражданском строительстве и направлено на выполнение основной функции — защиты людей от поражающих факторов взрыва, однако такие отдельно стоящие конструкции не обеспечивают безопасность других близкорасположенных объектов, а, наоборот, могут усилить воздействие факторов взрыва. Строительство убежищ на промышленных объектах нефтегазового комплекса осуществимо только при возведении новых или при масштабном перевооружении существующих, так как габариты таких сооружений не позволяют их применять на уже функционирующих объектах.

До недавнего времени наука о гражданской обороне преимущественно рассматривала вопросы обеспечения безопасности населения от возможных средств массового поражения, таких как взрыв ядерного боеприпаса, действие отравляющих веществ и бактериальных средств, в настоящее время первое место среди возможных угроз безопасности занимают терроризм и экстремизм.

Угроза террористических актов в полной мере требует реализации мероприятий по защите стен зданий и сооружений различного функционального назначения от взрывов различной мощности. Наиболее эффективными техническими средствами защиты стен от взрывов повышенной мощности называют следующие системы [34]:

система № 1: баллистическая ткань с энергопоглощающими анкерными элементами (ЭАЭ) — обеспечивает высокий уровень взрывостойкости;

система № 2: металлические панели с ЭАЭ — гарантирует высокий уровень взрывостойкости;

система № 3: металлические панели с ЭАЭ в комбинации со стальной сеткой — обеспечивает максимальный уровень взрывостойкости.

В случае локального или внутреннего взрыва предложенные типы конструкции наиболее эффективны, однако такие средства защиты не обладают требуемой защищенностью при воздействии взрывной волны на все здание.

В военной науке также рассмотрены вопросы обеспечения безопасности от воздействия ударно-волновых нагрузок. Наука об искусственных закрытиях и преградах — фортификация — предлагает в качестве средств защиты использовать простейшие сооружения открытого типа: окопы, щели, траншеи и ходы с встроенными над ними увлажненными грунтовыми перекрытиями, которые значительно снижают поражающее воздействие УВ. Но в соответствии с подпунктом 10.2 ФНП ОПВБ [21, с. 86] на территории предприятия, имеющего в составе

44

взрывопожароопасные производства, не допускается наличие оврагов, выемок, низин, устройств открытых траншей, котлованов и приямков, так как в них возможно скопление взрывопожароопасных паров и газов.

2.6 Выводы по главе 2

Проектирование взрывоустойчивых конструкций зданий и усиление существующих — меры, которые владелец ОПО должен принимать в целях минимизации риска гибели людей, а также риска разрушения оборудования и технологических линий из-за угрозы случайных взрывов облаков ТВС.

В данной главе проанализированы основные требования федеральных норм и правил, руководств по безопасности, межгосударственных стандартов в области промышленной безопасности к обоснованию устойчивости зданий и сооружений при взрывных нагрузках. Приведены обобщенные принципы взрывозащиты и предотвращения взрыва. Рассмотрены методы повышения устойчивости зданий. Установлено, что рекомендации по обоснованию взрывоустойчивости зданий и сооружений базированы на методах количественного анализа риска взрыва. Проанализированы средства ослабления действия ударных волн из разных областей знаний с точки зрения их применимости на существующих взрывопожароопасных объектах нефтегазового комплекса.

Установлено, что немаловажной задачей при взрывоустойчивом проектировании является сохранение конструкции здания путем исключения возможности прогрессирующего обрушения. Этого можно добиться, следуя основным рекомендациям по проектированию взрывоустойчивых конструкций: расчет и анализ ключевых структурных элементов, без которых здание не способно противостоять сильной нагрузке от высокого давления; создание альтернативных путей действия нагрузки, чтобы при потере одного структурного компонента здание устояло; использование связующих компонентов на основе полимерных композитов в целях укрепления конструкции для поддержания стабильности, гибкости и структурной прочности. Принимая во внимание вышеуказанные параметры, могут быть выбраны подходящие материалы и соответствующие стратегии проектирования, которые позволят уменьшить последствия взрыва.

Однако, по результатам проведенного анализа, можно сделать вывод, что в настоящий момент нет защитного устройства, способного эффективно снизить интенсивность падающей УВ и способного удовлетворить требованиям по его размещению в условиях плотной застройки объектов нефтегазового комплекса. Одним из направлений обеспечения взрывоустойчивости зданий и защиты, находящихся в них людей является создание защитной конструкции комбинированного типа, поглощающей энергию УВ при взрывах облаков ТВС на ОПО.

45

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЗРЫВОЗАЩИТНЫХ СТЕН

3.1 Обзор экспериментальных моделей взрывозащитных стен

Стремясь свести к минимуму воздействие взрыва на здания и сооружения ОПО, проектировщики пытаются максимально увеличить расстояние между объектом защиты и вероятным источником взрыва. Если невозможно обеспечить достаточное расстояние для поддержания желаемого уровня защиты, необходимо укрепить сооружения и / или построить дополнительные стены вокруг сооружения для снижения потенциального воздействия взрыва. Конструкторы должны тщательно проанализировать и выбрать самое эффективное сочетание используемых взрывозащитных стен и средств укрепления для уменьшения риска безопасности персонала при разрушении здания в случае реализации аварийного взрыва.

В данной главе был проведен ряд исследований с целью: (1) прогнозирования воздействия взрыва на объекты; (2) анализа и количественной оценки эффективности взрывозащитных стен для защиты зданий и сооружений от взрыва. В настоящее время существует несколько методов для прогнозирования воздействия взрыва на объекты с использованием эмпирических и численных методов. Эмпирические методы обеспечивают наилучшее соответствие расчетным кривым из экспериментальных данных, приведенных в работе [35]. Эти методы объединили и включили обширные экспериментальные данные о взрывах нескольких технических отчётов и руководств по проектированию, включая Американское Общество Инженеров Гражданского Строительства Инженерного Института (ASCE/SEI) [36]. Уравнения и расчетные кривые, представленные Ч. Кингери и Дж. Балмэш [37], составляют основу приведенных в главе №2 единых критериев для проектирования, а также включены в программную систему CONWEP, которая способна моделировать и рассчитывать взрывные нагрузки на построенные объекты, о которой упоминалось в главе №1. Численные методы обычно используют вычислительную гидродинамику для решения математических уравнений законов физики, решающих такие задачи, как сохранение массы, импульса и энергии. Численные методы могут быть разделены на: (1) модели взрыва, которые предсказывают взрывные нагрузки на объекты; и (2) модели совместного анализа, которые способны учитывать движение конструкции при расчете взрыва путем объединения взрывной нагрузки и расчетов реакции конструкции. Примеры отечественных и зарубежных программ, моделирующих взрыв: TOXI+Risk (ЗАО НТЦ ПБ, Россия), PHAST (DNV GL, Норвегия), FLACS (Gexcon, Норвегия), ProSAIR (Cranfield University at Shrivenham, Великобритания), SHAMRC ([38], США), и VAPO (Applied Research Associates, США). Модели совместного анализа гидродинамических процессов и прочностных расчёты включают следующие программные комплексы: ABAQUS, AUTODYN, LS-DYNA.

В ходе проведенных исследований были выявлены ряд зарубежных экспериментов, в которых проводились испытания в реальном времени и использовались численные методы количественной оценки эффективности взрывозащитных стен. Натурные испытания проводились на моделях жестких стальных стен следующими учеными: М. Байер, 1986 [39]; П. Джонс, К. Витая-Адам и Дж. Уотт, 1987 [40]; Т. Чепмен, Т. Роуз и П. Смит, 1995 [41]; Т. Роуз, П. Смит и Г. Майс 1995, 1997, 1998 [42, 43, 44]. Ф. Халтон и др. (1995) [45]. Эксперименты проводились как на полноразмерных моделях, так и на отмасштабированных конфигурациях защитных стен. Реальные эксперименты со взрывами также проводились на нежестких и хрупких материалах, в том числе исследования Т. Роуз, П. Смит и Г. Майс, которые провели масштабные испытания семи различных материалов, включая контейнеры заполненные песком, древесиной и льдом. Другое исследование было проведено в 2002 году под руководством Д. Богосян и Д. Пьепенбургом [46], которые проверили эффективность кладки из бетонных блоков, тонких сборных бетонных панелей и водных стен. В исследованиях 2008 года [47] провели полномасштабные испытания на контейнерах, заполненных почвой, изготовленных из сетки. оцинкованной сварной стальной проложенной нетканым полипропиленовым текстильным материалом. Л. Чен и соавт. [48] в 2015 году проанализировали водные стены и через масштабные испытания, и через числовое моделирование с использованием LS-DYNA. Результаты этих исследований согласованно показали, что нежесткие или хрупкие материалы обеспечивают сопоставимое и часто большее снижение взрывной нагрузки, чем жесткие стены. Для количественной оценки эффективности взрывозащитных стен также использовались численные методы. Например, Т. Чепмен с соавт. В работе [49] проанализировали моделирование взрывных волн при наличии защитных барьеров с использованием AUTODYN2D. Т. Нгои, Н. Нгуен и П. Мендис (2004) [50] использовали LS-DYNA и Air3D (2001) для визуализации комплексного течения взрывной волны, распространяющейся по стене. Д. Рикман, Д. Мюрелл и Б. Армстронг [51] в 2006 году провели серию небольших экспериментов и использовали моделирование SHAMRC для изучения влияния высоты стен, расстояния между зарядом ТНТ и стеной, и расстояния между зарядом и объектом на экранирующую способность взрывозащитных стен. К. Зоу и Х. Хау в работе [52] разработали аналитические формулы, основанные на оптимальных кривых численного моделирования AUTODYN3D. Эти формулы могут быть применены для разработки методики прогнозирования взрывной нагрузки на объекты за жесткой стеной.

Основную базу отечественных экспериментов по ослаблению действия взрыва в воздухе провел известный ученый Б.Е. Гельфанд [53, 54, 55, 56, 57, 58]. Экспериментально установлена эффективность снижения параметров УВ с помощью воздушно-водяной завесы [59].

Демпфирование эффектов локального взрыва небольшой мощности наблюдается при использовании цилиндрических пакетов металлических сеток [60, 61].

Несмотря на значительный вклад вышеупомянутых исследований и моделей взрыва, они неспособны:

(1) эффективно прогнозировать эффективность всех возможных вариантов конструкции взрывозащитной стены и строительного материала из-за значительного времени и усилий вычисления, требуемых численными моделями оценки взрыва для анализа каждого возможного сочетания типа взрывозащитной стены, строительного материала и местоположения объекта;

(2) количественно оценить эффективность возможных типов взрывозащитных стен, в том числе бетонных, стальных, песочных, водоналивных и деревянных стен, в снижении отраженного давления и импульсной нагрузки на объекты;

(3) визуализировать предполагаемые области повреждения объекта на основе массы взрывоопасного облака, типа взрывозащитной стены и комбинаций строительных материалов. Кроме того, следует отметить важный момент, что все вышеупомянутые исследования были проведены с использованием КВВ, а аналитические формулы составлены для массы заряда в тротиловом эквиваленте. Чтобы преодолеть эти ограничения, в данной главе представлена разработка инновационной модели, которая способна эффективно количественно оценить и визуализировать воздействие взрыва облака ТВС на объекты за взрывозащитными стенами из различных материалов, чтобы помочь проектировщикам в их критически важной задаче определения наиболее эффективной конструкции для взрывозащитных стен и укрепления зданий и сооружений.

3.2 Разработка модели анализа эффектов взрыва

Целью данной работы является разработка модели анализа эффектов взрыва (МАЭ $_{\Phi}$ В), 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 безопасности персонала и зданий и сооружений от угрозы взрыва. Модель представляет собой совокупность пяти основных этапов:

I. Этап анализа взрывозащитной стены, на котором разрабатываются новые аналитические формулы и массив факторов эффективности для количественной оценки пригодности хрупких взрывозащитных стен, в том числе заполненных песком, заполненных водой, и деревянных стен, для снижения отражённого давления и импульса нагрузки на здания и сооружения;

- II. Этап оценки повреждения, на котором вычисляется процент площади каждого здания или сооружения по пяти установленным в ФНП ОПВБ [21, с. 114] классам зон разрушения, с целью подсчитать общее повреждение;
- III. Этап визуализации повреждений в результате взрыва, на котором отображаются прогнозируемые зоны поражения здания или сооружения, исходя из массы облака во взрывоопасных пределах, типа взрывозащитной стены и конструктивного исполнения здания;
- IV. Этап анализа эффективности, на котором оценивается точность и эффективность разработанной модели;
- V. Этап ситуационного анализа, на котором анализируется работоспособность разработанной модели на конкретном примере.

Взрывозащитная стена – физический барьер, отделяющий важные объекты от угрозы взрыва. Взрывозащитные стены функционируют за счет отражения части энергии взрыва, что позволяет снизить отраженное давление и импульсную нагрузку на объект. Это сокращение взрывного воздействия при наличии твердых стен можно количественно оценить, используя уравнения (3.1) и (3.2) для отраженного давления и импульса, составленных на основе аналитических формул апробированных в работе [52]. Эти уравнения, однако, ограничиваются твёрдыми стенами и нуждаются в расширении для рассмотрения возможных типов хрупких стен, таких как стены, заполненные песком, заполненные водой и деревянные стены, которые, как было установлено в работах [43, 46], обеспечивают большее снижение взрывной нагрузки на объекты.

$$K_{Pmax,\text{\tiny TB}} = -0.1359 + \left[0.3272 + 0.1995\log(H/S)\right]\log\frac{S}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}} - 0.5626\log(H/S) + 0.4666\binom{L}{S}$$
(3.1)

$$K_{Imax,\text{\tiny TB}} = 0.0274 + \left[0.4146 + 0.2393\log(H/S)\right]\log\frac{S}{(E/P_0)^{\frac{1}{3}}} - 0.5044\log(H/S) + 0.2538(L/S)$$
(3.2)

где $K_{Pmax, \text{тв}}$ – 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 $K_{Imax, \text{тв}}$ – поправочный коэффициент максимального отраженного импульса для твердых стен.

Согласно Руководству по безопасности [3, с. 3] эффективный энергозапас ТВС определяется по соотношению:

$$E = M_{\rm r} \cdot q_{\rm r} \, \text{при} \, c_{\rm r} \le c_{\rm cr}, \tag{3.3}$$

ИЛИ

$$E = M_{\Gamma} \cdot q_{\Gamma} \cdot \left({}^{\mathcal{C}_{\text{CT}}} / {}_{\mathcal{C}_{\Gamma}} \right) \text{ при } c_{\Gamma} > c_{\text{ст}}, \tag{3.4}$$

где M_{Γ} – масса горючего вещества в облаке TBC, находящаяся во взрывоопасных пределах, кг; q_{Γ} – удельная теплота сгорания газа, Дж/кг; c_{Γ} – концентрация горючего вещества в облаке TBC, кг/м³; c_{cr} – стехиометрическая концентрация вещества в смеси с воздухом, кг/м³.

Для устранения вышеупомянутого ограничения уравнений (3.1) и (3.2) на данном этапе разрабатываются 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). В этих уравнениях используется разработанный набор факторов эффективности, учитывающих широкий спектр типов хрупких стен, включая различные толщины пробкового дерева, ледяных стен, полистирола, полиэтиленовых пластин; различные толщины заполненных песком контейнеров, стен из мешков с водой и заполненных водой контейнеров. На основе экспериментальных данных представленных в [52] была составлена таблица показателей эффективности различных материалов стены в зависимости от толщины самого материала (Таблица 3.1).

$$K_{Pmax,xp} = K_{Pmax,TB} \cdot EF_P, \tag{3.5}$$

$$K_{Imax,xp} = K_{Imax,TB} \cdot EF_{I}, \tag{3.6}$$

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

Материал стены	Толщина (м)	Показатель эффективности <i>EF_P</i>	Показатель эффективности <i>EF_I</i>	Ана показа эффект	ллиз ателей ивности
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	+-	+

Таблица 3.1 – Показатели эффективности взрывозащитной стены

Показатели эффективности хрупких стен в снижении давления и импульса измеряют работоспособность хрупких взрывозашитных стен по сравнению со стандартной, твердой взрывозащитной стеной. На этом этапе рассчитывается совокупность коэффициентов эффективности хрупкой стены для 11 возможных типов хрупкой стены путем анализа экспериментальных данных предыдущих исследований взрывозащитных стен.

Предыдущие исследования фиксировали измерения давления и импульса на увеличивающихся расстояниях или высотах за взрывозащитной стеной. Показатели эффективности хрупкой стены из уравнений (3.5) и (3.6) вычисляются в три этапа, которые предназначены: (1) использовать имеющиеся экспериментальные данные фиксированных измерений взрыва в различных точках (n) за взрывозащитной стеной; (2) вычислить соотношение величин давления и импульса для хрупкой и твёрдой стен для каждого местоположения; и (3) вычислить коэффициент эффективности путем усреднения всех показателей, рассчитанных на предыдущем этапе. Например, коэффициент эффективности давления (3.7), как показано в таблице 3.2.

$$EF_P = \frac{\sum_{n=1}^{N} \left(\frac{P_{XP,n}}{P_{TB,n}}\right)}{N} \tag{3.7}$$

$$EF_I = \frac{\sum_{n=1}^{N} \left(\frac{x_{\text{P},n}}{I_{\text{TB},n}}\right)}{N} \tag{3.8}$$

где n – местоположение измерения давления/импульса за взрывозащитной стеной на разном расстоянии и/или высоте, м; N – общее количество мест измерения давления и импульса за взрывозащитной стеной; $P_{xp.n}$ – давление взрывной волны за хрупким барьером в точке n (кПа); $P_{\text{тв.}n}$ – давление взрывной волны за твёрдым барьером в точке n (кПа); $I_{xp.n}$ – импульс за хрупким барьером в точке n (кПа · мс/кг^{1/3}); и $I_{\text{тв.}n}$ – импульс за твёрдым барьером в точке n (кПа · мс/кг^{1/3}).

Точки	Расстояние от	Измеренное	Измеренное	Расчёт	Показатель
измерения	взрывозащитной	давление,	давление,	соотношения	эффективности
давления,	стены, S (м)	$\boldsymbol{P}_{xp.\boldsymbol{n}}$ (kPa)	$\boldsymbol{P}_{\text{TB.}\boldsymbol{n}}$ (kPa)	$(\boldsymbol{P}_{xp.\boldsymbol{n}})$	EF_P
n		[44]	[43]	$\left(\overline{\boldsymbol{P}_{\mathrm{TB},\boldsymbol{n}}}\right)$	
1	1.35	41	57	0.72	
2	1.50	38	49	0.78	0.74
3	1.65	35	46	0.76	0.74
4	1.80	28	39	0.72	

Таблица 3.2 – Вычисление показателя эффективности толстой песчаной стены

На этом этапе уравнения (3.7) и (3.8) были использованы для расчета коэффициентов эффективности по давлению и импульсу для 11 видов хрупких взрывозащитных стен. Величина

больше единицы означает, что выбранный материал будет работать менее эффективно, чем стандартная стальная стена, тогда как значение меньше единицы означает, что стена из хрупкого материала будет работать лучше, чем стандартная стальная стена, как показано в таблице 3.1.

Значимость этих рассчитанных коэффициентов эффективности можно проиллюстрировать на упрощенном примере, как показано на рисунки 3.1-3.3 и в Таблице 3.3.



Рисунок 3.1 - Вычисление массы во взрывоопасных пределах





В этом примере предполагается, что воспламенение дрейфующего облака пропана, с массой во взрывоопасных пределах 55 кг, произойдет на расстоянии 40 м от здания операторной. Пример показывает эффект использования 2 вариантов конструкции защиты от взрыва: стандартная стальная стена и толстая песчаная стена. Отсутствие взрывозащитной стены подвергает объект воздействию падающего давления 29 кПа и отраженного давления в 65 кПа. Использование жесткой стальной стены на расстоянии 4 м от взрыва снижает это максимальное отраженное давление на 30%, в результате чего отраженное давление равно 45

кПа, в то время как толстая песчаная стена снижает давление на 48%, в результате чего давление нагрузки равно 34 кПа. Этот пример показывает, что использование хрупкой взрывозащитной стены может существенно уменьшить нагрузку максимального отраженного давления на объект. Это снижение нагрузки давления уменьшает повреждения объекта, снижая количество смертельных случаев персонала, повреждение имущества и потери третьих лиц.

В следующем разделе, посвященном количественной оценке последствий взрыва для всех возможных типов стен, основное внимание будет уделено разработке модели оценки последствий взрыва, которая предназначена для расчета процентной площади каждого объекта в рамках установленных уровней ущерба, с тем, чтобы определить общий уровень ущерба от взрыва.

Тип стены	Показатель эффективности <i>EF_P</i>	Поправочный коэффициент максимального отраженного давления	Давление отраженное, ΔР _{ф2} (кПа)
Отсутствие стены	-	-	65
Стальная стена (0,2 м)	1.0	0.7	46
Песчаная стена (1,5 м)	0.74	0.52	34

Таблица 3.3 – Вычисление показателя эффективности толстой песчаной стены



Рисунок 3.3 - Влияние взрывозащитной стены на величину отражённого давления, возникающего на фронтальной стене операторной (1) нет взрывозащитной стены, (2) твёрдая стальная взрывозащитная стена, (3) толстая песчаная взрывозащитная стена

3.3 Оценка входных параметров для модели анализа эффектов взрыва

Этот этап представляет собой разработку модели анализа эффектов взрыва (МАЭфВ), которая способна эффективно количественно оценить и визуализировать воздействие взрыва на построенные здания и сооружения за взрывозащитной стеной. Данный этап состоит из четырех шагов:

- 1. Определение входных параметров модели;
- 2. Расчет расстояний между точкой взрыва и защищаемым зданием;
- 3. Количественная оценка процентной площади здания в пределах установленных классов зон разрушения (далее КЗР);
- 4. Расчет общего ущерба здания.

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 безопасности персонала и разрушения зданий и сооружений от угрозы взрыва. Модель требует три главных типа входных параметров:

(1) параметры здания: расположение, конструктивное исполнение, геометрия в плане, ориентация по отношению к вероятному направлению взрыва;

(2) параметры взрывозащитной стены: материал стены, высота стены и положение;

(3) параметры облака TBC: масса облака во взрывоопасных пределах и местоположение взрыва.

Местоположения в модели определяются с помощью системы сеток, которая позволяет задавать интервал сетки. Местоположения объектов определяются размещением их центров в системе сеток, как показано на рисунке 3.4.





Основанная на вышеупомянутых входных параметрах модель предназначена для проведения оценки взрывного эффекта путем вычисления процентной площади каждого объекта, подвергающегося пяти установленным КЗР согласно таблице 2 Приложения 3 ФНП ОПВБ [21, с. 108]. В соответствии с таблицей 3 Приложения 3 ФНП ОПВБ [21, с. 11] можно дать им следующие названия: минимальный (КЗР-5), слабый (КЗР-4), средний (КЗР-3), сильный (КЗР-2), максимальный (КЗР-1), как показано на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 - Визуальное отображение процента повреждения здания, подверженного различным КЗР

Класс зоны разрушения (КЗРј)	Расстояние – радиус зоны разрушения (R _j)	Процент площади повреждения здания (%PPS _i)
Минимальный	\mathbf{R}_1	27
Слабый	\mathbf{R}_2	24
Средний	R ₃	16
Сильный	\mathbf{R}_4	0
Максимальный	R ₅	0

Таблица 3.4 – Процент площади повреждения здания операторной

Эти пять КЗР определены в настоящей модели для обеспечения согласованности с уровнями повреждений, указанных [3, 21]. Для вычисления этих процентных площадей повреждений (%ППј), расстояния (Rj) должны быть рассчитаны для каждой комбинации уровня повреждения (j), массы облака ТВС (M_r), типа взрывозащитной стены и конструктивного исполнения здания. Эти расстояния представляют собой минимально допустимое расстояние между объектом и взрывоопасной зоной, обеспечивающее желаемый уровень защиты. Например, если здание операторной, которая запроектирована во взрывоустойчивом исполнении на 30 кПа, находится на расстоянии 65 м от места наиболее вероятного инициирования облака ТВС, масса во взрывоопасных пределах которого составляет 55 кг, то это здание операторной будет находиться в зоне среднего ущерба или КЗР-3 (рисунок 3.6). В

56

существующих руководствах по безопасности отсутствуют методики расчета безопасных расстояний для зданий и сооружений, расположенных за взрывозащитными стенами. Для устранения этого ограничения предлагается новая методология расчета расстояний, скорректированных с учётом наличия взрывозащитной стены (ARj), которые обеспечивают такой же уровень защиты объектов за взрывозащитными стенами, как и существующие расстояния для объектов без взрывозащитной стены.



Рисунок 3.6 - Расстояние без взрывозащитной стены

На этом шаге вычисляются расстояния (ARi), скорректированные с учётом наличия взрывозащитной стены, которые обеспечивают такой же уровень защиты объектов за взрывозащитными стенами, как и существующие расстояния для объектов без взрывозащитной стены, как показано в уравнениях (3.9) и (3.11). Значения ARj в настоящей модели рассчитываются для каждой комбинации уровня повреждения (j), массы облака TBC ($M_{\rm r}$), допустимого типа взрывозащитной стены и конструктивного исполнения защищаемого здания. Расчет (ARj) выполняется в три основных этапа: (1) определение из существующих руководств по проектированию расстояния (Rj) для объектов без взрывозащитной стены для каждого сочетания уровня повреждения (j), т.е. с учетом п.3.1. или 3.2 Приложения №3 ФНП ОПВБ [21, с. 111], массы облака ТВС (М_г) и конструктивного исполнения; (2) расчёт отраженного давления или импульса на объекте на этих определенных расстояниях с помощью уравнений (3.11) и (3.12) для давления и уравнения (3.13) для импульса; и (3) вычисление расстояния (ARj), скорректированного с учётом наличия взрывозащитной стены, на котором поддерживаются давление и импульс равные тем, что были определены на втором этапе, используя модификацию гибридного метода Пауэлла для нелинейных уравнений [62] для решения уравнений (3.9) или (3.11), соответственно. Эти три шага обсуждаются ниже

$$P_{\text{без стены},Rj} = P_{\text{со стеной},ARj},\tag{3.9}$$

$$I_{\text{без стены},Rj} = I_{\text{со стеной},ARj},\tag{3.10}$$

где $P_{\text{без стены},Rj}$ – нагрузка отраженного давления на здание без взрывозащитной стены (кПа); Rj – расстояние до здания без взрывозащитной стены с КЗРj (м); $P_{\text{со стеной},ARj}$ – нагрузка

отражённого давления на здание за взрывозащитной стеной (кПа); ARj – скорректированное расстояние до здания за взрывозащитной стеной при уровне повреждения j (м); j – номер КЗР или уровня повреждения (минимальный, слабый, средний, сильный, максимальный); $I_{\text{без стены},Rj}$ – нагрузка отраженного импульса на объект без взрывозащитной стеной (кПа · с); $I_{\text{со стеной},ARj}$ – нагрузка отраженного импульса на объект за взрывозащитной стеной (кПа · с).

Во-первых, расстояния до объектов при отсутствии взрывозащитной стены, определяются для каждой комбинации уровня повреждения, массы облака ТВС (*М*г) и конструктивного исполнения, как показано на схеме (рисунок 3.7). Эти 150 возможных комбинаций охватывают:

(1) пять перечисленных выше КЗР или уровней повреждения: минимальный, слабый, средний, сильный, максимальный;

(2) пять наиболее вероятных масс горючего вещества в облаке ТВС, участвующей в создании поражающих факторов взрыва, рассчитанная для типового оборудования, частота разгерметизации которого в соответствии с [18, 21] ≤ 1·10⁻⁶ в год: 30 кг, 100 кг, 250 кг, 500 кг, 2000 кг;

(3) шесть распространенных типов зданий по конструктивному исполнению: «промышленные здания с легким каркасом и бескаркасной конструкцией, складские кирпичные здания, одноэтажные складские помещения с металлическим каркасом и стеновым заполнением из листового металла, бетонные и железобетонные здания и антисейсмические конструкции, здания железобетонные монолитные повышенной этажности, деревянные дома» [21, с. 115].



Рисунок 3.7 - Этапы вычисления расстояния, скорректированного с учётом наличия взрывозащитной стены

Во-вторых, нагрузки отраженного давления *P*_{без стены} или импульса *I*_{без стены} на этих определённых расстояниях рассчитываются с использованием модифицированных уравнений (3.11) – (3.13), составленных на основе уравнений для воздушной ударной волны Ч. Кингери и Дж. Балмэш [37], где отраженное давление и импульс являлись функцией приведённого расстояния [63]:

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

$$P_{\text{Ge3 CTEHAJ}} = e^{\left\{9.006 - 2.6893 \ln\left(\frac{R}{\left(\frac{R}}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}}{\left(\frac{R}}}{\left(1$$

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

$$P_{\text{6e3 CTEHBJ}} = e^{\left\{8.8396 - 1.733 \ln\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{P_{0}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right) - 2.64 \left[\ln\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{P_{0}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)\right]^{2} + 2.293 \left[\ln\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{P_{0}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)\right]^{3} - 0.8232 \left[\ln\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{P_{0}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)\right]^{4} + 0.14247 \left[\ln\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{P_{0}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)}\right]^{5} - 0.0099 \left[\ln\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{P_{0}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)\right]^{6} - 0.0099 \left[\ln\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{P_{0}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)\right]^{6} - 0.0099 \left[\ln\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{\left(\frac{R}{P_{0}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)}\right]^{6} - 0.0099 \left[\ln\left(\frac{R}{\left($$

Значение импульса в случае:

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

$$I_{6e3 \text{ стены}} = e^{\left\{6.7853 - 1.3466 \ln\left(\frac{R}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}}\right) + 0.101 \left[\ln\left(\frac{R}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)\right]^2 - 0.01123 \left[\ln\left(\frac{R}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)\right]^3\right\}}.$$

$$(3.13)$$

В-третьих, расстояния, скорректированные с учётом наличия взрывозащитной стены, вычисляются для количественной оценки влияния внедрения различных конструкций взрывозащитных стен на вышеуказанные расстояния. Как показано на схеме (рисунок 3.11), на третьем этапе вычисляются расстояния (*ARj*), скорректированные с учётом взрывозащитной стены, которые поддерживают давление или импульс равные тем, что были определены с использованием модифицированного гибридного метода Пауэлла для нелинейных уравнений на втором этапе для решения уравнений (3.9) и (3.10). На этом этапе вычисляются 6000 уникальных значений *ARj* путем количественной оценки эффективности 11 возможных вариантов взрывозащитных стен в снижении отраженного давления или импульсной нагрузки на объекты для каждого из 150 проектных комбинаций уровня повреждения, с учетом массы облака ТВС (*M*г) и конструктивного исполнения, указанных выше. Эти варианты взрывозащитных стен покрывают возможные комбинации:

(1) 10-ти типов взрывозащитных стен, в том числе 6 видов из них хрупких стен, для которых получены показатели эффективности, перечисленные в таблице 3.1, относительно стандартной жесткой стальной стены [52]. Следует отметить, что в перечне хрупких материалов для взрывозащитных стен отсутствуют, перечисленные в таблице 3.1., ледяные стены и мешки, наполненные водой, в виду невозможности их применения на ОПО нефтегазовой отрасли по причинам, указанным в п.2.5. Главы 2.

(2) 4-х значений высоты для взрывозащитной стены: 2 м, 3м, 4м и 5м.

Для выполнения этих расчетов необходимо количественно оценить работоспособность хрупких и жестких взрывозащитных стен при снижении отраженного давления и импульсной нагрузки и жестких взрывозащитных стен при снижении отраженного давления и импульсной нагрузки на объекты. Снижение максимальной нагрузки отраженного давления на объект определяется путем умножения величины давления на объект при отсутствии стены ($P_{\text{без стены}}$) из уравнений (3.11) и (3.12) на соответствующий поправочный коэффициент для взрывозащитной стены (K_{Pmax}), как показано в уравнении (3.14). Снижение нагрузки отраженного импульса на объект при отсутствии стены ($I_{\text{без стены}}$) из уравнения количественно оценивается путем умножения величины отражённого импульса на объект при отсутствии стены ($I_{\text{без стены}}$) из уравнения (3.13) на соответствующий поправочный коэффициент для импульса при наличии взрывозащитной стены (K_{Imax}), как показано в уравнении (3.13) на соответствующий поправочный коэффициент для импульса при наличии взрывозащитной стены (K_{Imax}), как показано в уравнении (13). Затем при необходимости для решения уравнений (3.9) и (3.10) используется модифицированный гибридный метод Пауэлла для нелинейных уравнений, путем вычисления значения ARj для $P_{\text{со стеной};ARj}$ значение которого меньше или равно $P_{\text{без стены};Rj}$ или $I_{\text{со стеной};ARj}$ значение которого меньше на втором этапе.

$$P_{\rm co\, cтеной} = K_{Pmax} \cdot P_{\rm без \, cтены},\tag{3.14}$$

$$I_{\rm co\, стеной} = K_{Imax} \cdot I_{\rm без \, стены}, \tag{3.15}$$

Расчеты, сделанные в приведённых выше трех этапах, можно проиллюстрировать на простом примере, как показано на рис. 3.10. В данном примере предполагается, что железобетонное здание операторной должно находиться за пределами зоны средних повреждений (j = 3) при наиболее вероятном взрыве облака пропана с массой во взрывоопасных пределах 55 кг. Необходимо сравнить расстояние, требуемое для объекта при отсутствии взрывозащитной стены со скорректированным расстоянием с учётом наличия 3-х метровой песчаной взрывозащитной стены толщиной 1 м для защиты здания операторной. На первом этапе определяется расстояние в 65 м (*Rj*), необходимое для объекта требуемого уровня защиты здания без взрывозащитной стены, но находящегося во взрывоустойчивом исполнении.

На втором этапе для расчета $P_{6e3 \text{ стены};Rj}$ на расстоянии, определенном на первом шаге, используются уравнения (3.11) и (3.12). Решения уравнения (3.12) показывает, что на расстоянии 65 м объект будет испытывать нагрузку отраженного давления равную 29,6 кПа. На третьем этапе путем решения уравнения (3.10) с использованием модифицированного гибридного метода Пауэлла для нелинейных уравнений вычисляется скорректированное с учётом наличия взрывозащитной стены расстояние для объекта, защищенного толстой песчаной стеной высотой 3 м, при котором на объект оказывается отраженное давление 28,8 кПа. Это вычисление даёт скорректированное расстояние (*ARj*) равное 45 м. Этот расчет можно проверить и дополнительно объяснить с помощью уравнения (3.14). При *ARj* равном 45 м, *P*_{со стеной} вычисляется умножением *P*_{6ез стены;45} на *Кpmax* [рассчитывается по уравнению (3.5)] для 3-метровой песчаной стены средней толщины, которая, как предполагается, находится на расстоянии 4 м от места взрыва. Выполнение этих расчетов приводит к следующим результатам: *P*_{6ез стены;45} = 52,7 кПа и *Кpmax* = 0,55 при перемножении дают *P*_{со стеной;45} = 29 кПа.

Данный пример демонстрирует, что хрупкие взрывозащитные стены могут существенно уменьшить расстояние, необходимое для обеспечения необходимого уровня защиты зданий и сооружений по сравнению с расстоянием, требуемым для объекта при отсутствии взрывозащитной стены. Кроме того, это уменьшение необходимого расстояния значительно увеличивает гибкость планирования места, позволяя проектировщикам построить дополнительные объекты на освобождённом пространстве или сократить занимаемую площадь опасного производственного объекта.



Рисунок 3.8 - Расстояние, скорректированное с учетом наличия взрывозащитной стены

3.4 Количественная оценка площади повреждения зданий и сооружений

На этом этапе определяется процент площади каждого здания в рамках пяти уровней повреждений (PPS_{ij}) путем вычисления площади пересечения зоны поражения взрыва, определяемой с использованием расстояния, скорректированного с учётом наличия взрывозащитной стены (AR_j), вычисленного на предыдущем этапе, и площади здания (S_i). Каждый уровень повреждения (DB_j) представлен в виде зоны, с центром в предполагаемом месте взрыва, с радиусом, равным расчетному расстоянию. Затем площади преобразуются в проценты путем деления площади пересечения на общую площадь объекта и умножения на 100%, как показано в уравнении (3.16).

$$PPS_{ij} = (S_i \cap DB_j)/S_i \cdot 100\% \tag{3.16}$$

где, PPS_{ij} – процентное отношение площади *i* здания в пределах уровня повреждения *j*; *i* – номер здания, S_i – площадь *i* здания (м²); и DB_j – площадь уровня повреждения *j* (м²).

Последним шагом в количественной оценке воздействия взрыва на объекты за взрывозащитными стенами является расчет общего процента ущерба, причиненного каждому объекту (PAD_i) . PAD_i – это сумма процентного отношения площади объекта (PPS_{ij}) , умноженного на процент разрушения (PD_j) для всех пяти уровней повреждения (j), рассматриваемых в этой модели, как показано в уравнении (3.17). Значение PD_j для этих пяти уровней повреждения (минимальный, малый, средний, тяжелый и очень тяжелый) считается в этой модели 10, 20, 40, 60 и 100% соответственно. Эти значения PD_j определяются на основе верхнего предела диапазонов КЗР каждого из этих пяти уровней повреждения в существующих руководствах по безопасности.

$$PAD_i = \sum_{j=1}^5 PPS_{ij} \cdot PD_j \tag{3.17}$$

где PAD_i – общий процент повреждения здания *i*; PPS_{ij} – процентное отношение площади *i* здания в пределах уровня повреждения *j*; и PD_j – процент разрушения в пределах уровня повреждения *j*.

Модель способна количественно оценить ожидаемые повреждения на нескольких построенных объектах за взрывозащитными стенами от одного взрыва.

Этап визуализации повреждений в результате взрыва представляет собой создание визуализаций повреждений в результате взрыва, которые отображают результаты, рассчитанные на основе вышеприведенной модели анализа эффектов взрыва. Эти вычисления выполняются с использованием построителя зон в селекторе методик TOXI+Risk. Визуализации повреждений после взрыва являются эффективным инструментом для анализа влияния различных комбинаций конструкций на уровень повреждений в результате взрыва на всех анализируемых зданиях и сооружениях. Эти произведенные визуализации отображают графические иллюстрации, показывающие влияние одиночного взрыва при заданном уровне повреждения для всех зданий при каждой возможной комбинации массы облака TBC (*Me*), типа взрывозащитной стены и конструктивного исполнения здания.

Сделанные визуализации представляют пять уровней повреждений (DB_i) в виде зон, с центром в ожидаемом месте взрыва и имеет радиус, равный соответствующему расчетному расстоянию (Rj), как показано на рисунке 3.9 (а). Созданная модель позволяет определить цвет и тип линии этих зон для облегчения анализа повреждения в результате взрыва. Например, возможно указать различные цвета для каждой из зон, представляющих пять уровней повреждений (КЗР), в случае, когда все объекты построены из одних и тех же строительных материалов, как показано на рисунке 3.9 (а), где красный, оранжевый, желтый, зеленый и синий представляют уровни максимального, сильного, среднего, слабого и минимального повреждения соответственно. Если стены здания по конструктивному исполнению запроектированы из разных строительных материалов, то есть возможность использовать различные стили линий для представления зон уровня повреждения для каждой стены здания, как показано рисунке 3.9 (б) где сплошные линии используются для изображения зон уровня повреждения для кирпичных сооружений, а пунктирные линии используются для представления колец уровня повреждения для железобетонных сооружений. Кроме того, модель позволяет использовать штриховку для отображения различных строительных на рисунке 3.9, диагонали (□□) используются для изображения материалов. Например, кирпичных сооружений, а точки ()) используются для изображения железобетонных сооружений. Более того, цвета объекта можно использовать для представления общего уровня повреждения объекта, позволяющего легко визуализировать уровень повреждения каждого здания.

Эти созданные визуализации представляют практичный и надежный инструмент анализа для оценки результатов проектирования и определение уровня защиты для каждого объекта строительства. Они позволяют:

(1) выполнить визуальную оценку устойчивости зданий и сооружений к взрывным нагрузкам.

(2) определить, необходимы ли какие-либо изменения в конструктивном исполнении, чтобы обеспечить необходимый уровень защиты для построенных зданий и сооружений.

Например, созданная визуализация на рисунке 3.10 представляет конструкцию, где расчетный уровень повреждения превышает максимально допустимый уровень повреждения, заложенный проектировщиком.



~	<u>۱</u>
ы	
u	

б)

Конструктивное исполнение		Класс зоны разрушения			Уровни повреждения здания	
Тип здания/сооружения	Обозначение	Повреждение	Кирпичное здание	Железобетонное здание	№ КЗР	Цвет
Складские кирпичные		Минимальное			K3P-1	
здания		Слабое			K3P-2	
Бетонные и		Среднее			КЗР-3	
железобетонные здания		Сильное			K3P-4	
		Максимальное			K3P-5	

Рисунок 3.9 - Классы зон разрушения, представляющие пять уровней повреждений: а) для кирпичного здания; б) для кирпичного и железобетонного здания

Рассмотри пример защиты кирпичного сооружения от наиболее вероятного сценария взрыва облака пропана уже рассчитанной массы – (*M*₂ = 55 кг). На расстоянии 20 метров построена стальная взрывозащитная стена. Определим уровень повреждения объекта как минимальный для конструкции здания.

Результат визуализации повреждений после взрыва и выходные данные модели показывают, что для данной конструкции уровень повреждения здания составит 40% и здание попадает в 4 КЗР – в зону сильных разрушений. Поскольку предполагаемый уровень повреждения превышает допустимый уровень защиты объекта, необходимо внести изменения в конструкцию, с тем, чтобы снизить риски для персонала и объекта, связанные с угрозой взрыва.

Рисунок 3.10 б) и в) показывает примеры альтернативных проектов, в которых используются две основные стратегии проектирования, применяемые для уменьшения воздействия взрывов на объекты в целях повышения уровня защиты. Во-первых, есть возможность увеличить расстояние между объектом и предполагаемым источником инициирования облака TBC, т.е. применив стратегию «защита расстоянием», как показано на

3.10 б). Увеличивая расстояние от 20 до 80 м, предполагаемый уровень повреждения объекта снижается с 40 до 10%, что находится в пределах допустимого уровня повреждения для кирпичного здания \leq 10 кПа. Во-вторых, если невозможно достичь достаточного расстояния для обеспечения требуемого уровня защиты, необходимо выбрать тип взрывозащитной стены и/или конструктивные решения по типу здания, которые обеспечивают более высокий уровень защиты от взрыва. Выбрав оба варианта в качестве приемлемых, рассмотрим рисунок 3.10 (в), который показывает результаты одной из возможных альтернативных конструкций, где для защиты железобетонного здания сооружена 5-ти метровая толстая песчаная взрывозащитная стена. Эта конструкция обеспечивает уровень повреждения объекта <5%, соответствующий минимальному уровню повреждения, что может рассматриваться в качестве допустимого при проектировании.



Конструктивное исполнение		Класс зоны разрушения			Уровни повреждения здания	
Тип здания/сооружения	Обозначение	Повреждение	Кирпичное здание	Железобетонно е здание	№ КЗР	Цвет
Складские кирпичные		Минимальное	≤ 10	≤ 25	K3P-1	
здания		Слабое	10-20	25-35	K3P-2	
Бетонные и		Среднее	20-30	80-120	K3P-3	
железобетонные здания		Сильное	30-40	150-200	K3P-4	
N		Максимальное	>40	>200	K3P-5	

Рисунок 3.10 – Пример расчета повреждений зданий

3.5 Оценка эффективности разработанной модели

Целью данного этапа является анализ эффективности предложенной модели МАЭфВ путем сравнения результатов расчета, полученных при её использовании с результатами, полученными с помощью программного обеспечения VAPO версии 6.2, разработанного Агентством по сокращению военной угрозы и возможной защиты¹, опубликованными в работе [64], а также с результатами, полученными в TOXI+Risk. Анализ эффективности был выполнен путем сравнения 19 проектных конфигураций, которые состояли из 9 конфигураций без взрывозащитной стены и 10 конфигураций со стальными взрывозащитными стенами.

¹ Defense Threat Reduction Agency's Vulnerability Assessment and Protection Option.

Работоспособность МАЭфВ была проанализирована с использованием двух метрик: точность и эффективность. Точность данной модели оценивалась путем вычисления:

- 1. Средней разности между полученными значениями отраженного давления с помощью данной модели с TOXI+Risk ,VAPO (ΔP), как показано в уравнении (3.18, 3.20);
- Процентной разницы между отраженным давлением полученным с помощью трёх моделей (%P), как показано в уравнении (3.19, 3.21).

Эти средние и процентные разницы были рассчитаны для диапазона возможных вариантов проектных решений. С помощью выбранных комбинаций можно получить представление о наиболее вероятных угрозах безопасности, реализующихся на ОПО. Всего было проанализировано 19 комбинаций массы взрывоопасного облака, расстояний и использования взрывозащитных стен, в том числе 9 проектных конфигураций без взрывозащитной стены и 10 вариантов с взрывозащитной стеной. На первом этапе анализируются варианты конструкций без взрывозащитной стены. Вычисляются отраженное давление, приходящие на здание. Т.к. в работе [64] представлены данные по рассчитанным значениям массы заряда в тротиловом эквиваленте, то сравнительные конфигурации в модели МАЭфВ также проводились с переводом значений массы взрывоопасного облака в массу ТНТ.

Как показано на рисунке 3.11, 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 1,818.2 кг на расстоянии 50 м; и (3) массу в ТНТ 250, 454.5, и 11,818.2 кг на расстоянии 100 м. Далее на диаграмме (рисунок 3.11) представлены средние значения отраженного давления, рассчитанные с помощью разработанной модели МАЭфВ, рассчитанным по TOXI+Risk, и по данным, полученным в программном комплексе VAPO.

На втором этапе разработки конструкции с взрывозащитной стеной вычисляется отраженное давление на сооружения за 5-ти метровой взрывозащитной стеной. Десять сочетаний величин массы облака в ТНТ и расстояния включают: (1) массу 100 и 250 кг на расстоянии 25 м; (2) массу 100, 250, 454.5, и 1,818.2 кг на расстоянии 50 м; и (3) массу в ТНТ 250, 454.5, и 11,818.2 кг на расстоянии 100 м. На диаграмме ниже (рисунок 3.12) представлены средние значения отраженного давления, рассчитанные с помощью разработанной модели МАЭфВ, при использовании взрывозащитной стены и по данным, полученным в программном комплексе VAPO. Расчет в TOXI+Risk с использованием взрывозащитной стены не проводился, т.к. в данный момент программный модуль не учитывает препятствия на пути действия УВ.



Рисунок 3.11 - Сравнение результатов расчета отраженного давления на здание без



Рисунок 3.12 - Сравнение результатов расчета отраженного давления на здание при наличии взрывозащитной стены

Результаты проведенного анализа подтверждают, что методология расчета взрывных нагрузок в этой части модели с использованием уравнений ударной волны взрыва (3.11, 3.12, 3.13), составленных на основе [37] и поправочных коэффициентов для жесткой стены [52] дает результаты очень близкие к тем, которые генерируются VAPO и TOXI+Risk, как показано на диаграммах 3.11 и 3.12. Средняя и процентная разница между значениями отражённого давления, полученными с помощью трёх моделей составила: 2,1 кПа и 4,0% для конструкции без взрывозащитной стены для VAPO и MAЭфB, и 1,6 кПа и 2,3% для TOXI+Risk и MAЭфB; и 1,2 кПа и 3,9% для конструкции со стальной взрывозащитной стеной для VAPO и MAЭфB. Эти

68

разницы в рассчитанных взрывных нагрузках между МАЭфВ ,VAPO и TOXI+Risk минимальны, и в целом можно говорить о верифицируемости МАЭфВ.

$$\Delta P = \frac{\sum_{n=1}^{N} (P_{\text{MA} \ni \phi \text{B}; n} - P_{VAPO; n})}{N}; \qquad (3.18)$$

$$\%P = \frac{\left[\sum_{n=1}^{N} \left(\frac{P_{\text{MA}} \partial \phi B; n^{-P} V A P O; n}{P_{VAPO; n}}\right) \cdot 100\%\right]}{N};$$
(3.19)

$$\Delta P = \frac{\sum_{n=1}^{N} (P_{\text{MA} \ni \phi B; n} - P_{TOXI; n})}{N}; \qquad (3.20)$$

$$\%P = \frac{\left[\sum_{n=1}^{N} \left(\frac{P_{\text{MA}} 3\phi B; n^{-P} T O X I; n}{P_{T O X I; n}}\right) \cdot 100\%\right]}{N};$$
(3.21)

где ΔР - средняя разница между значениями отражённого давления, полученными с помощью МАЭФВ и VAPO (кПа); n – число конфигураций по расстоянию и массе; N - общее количество анализируемых конфигураций; P_{MAЭΦB} - нагрузка отражённого давления на объект, рассчитанная с помощью МАЭфВ для конфигурации n (кПа); P_{VAPO}/ P_{TOXI} - нагрузка отражённого давления на объект, рассчитанная с помощью VAPO или TOXI+Risk для конфигурации n (кПа); %P - средняя процентная разница между значениями отражённого давления.

Результаты этого анализа подчеркивают точность и эффективность разработанной модели МАЭ_ФВ.

3.6 Выводы по главе 3

В настоящей главе представлена модель анализа эффектов взрыва для количественной оценки и визуализации воздействия взрыва на построенные объекты за жёсткими или хрупкими взрывозащитными стенами. Эта модель была разработана в пять этапов: (1) на этапе анализа взрывозащитной стены разработана методика количественной оценки эффективности возможных типов хрупких взрывозащитных стен в снижении нагрузки отраженного давления и импульса на здания и сооружения, в том числе стальных и бетонных стен, стен заполненных песком, заполненных водой, сделанных из дерева; (2) на этапе оценки повреждения объекта производится расчет процента площади каждого объекта в пределах пяти установленных уровней повреждения для определения общего уровня повреждения; (3) на этапе визуализации повреждений в результате взрыва отображается прогнозируемая площадь поражения исходя из массы облака ТВС, типа взрывозащитной стены, конструктивных решений для здания; (4) на этапе изучения конкретных примеров анализируется результативность разработанной модели, и на (5) на этапе анализа эффективности оценивается точность разработанной модели.

Основное преимущество данного исследования заключается в разработке новой модели, позволяющей эффективно и точно анализировать, и сравнивать все возможные варианты проектирования с целью выбора оптимального проектного решения, минимизирующего риски для безопасности персонала, находящегося в зданиях и сооружениях, от угрозы взрыва. Эта разработанная модель должна оказаться полезной для проектировщиков и руководителей строительства объектов в зоне повышенной опасности, позволяя им оценить варианты проектирования, которые, возможно, ранее не рассматривались из-за значительного вычислительного времени и усилий, необходимых для численных моделей оценки взрыва.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПО СНИЖЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ ПАДАЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВАХ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

4.1 Уменьшение взрывных нагрузок на здания и сооружения с помощью пористых экранов

В настоящее время всё более актуальными становятся задачи, решение которых связано с описанием поведения защитных преград под действием взрывных нагрузок. Экспериментально установлено, что наибольшей эффективностью в снижении ударной нагрузки обладают газопроницаемые преграды или экраны. При прохождении ударной волны через слои газопроницаемого экрана уменьшается давление на её фронте и происходит изменение профиля волны. При интенсивных взрывных воздействиях конструкция такого защитного экрана может испытывать деформации, в том числе, необратимые. В работе Гельфанда Б.Е., Сильникова М.В [65] 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» [66, с. 15].

Размещение экранов из сильнопористых материалов на поверхности защищаемых конструкций при воздействии на них ударных волн может приводить как к уменьшению, так и к увеличению максимального давления нагружения. Соответствующие экспериментальные данные приведены в таблице 4.1.[67, 68].

Таблица 4.1 –	· Значения параметров	нагружения г	преграды в з	ависимости	от состава
толщины экрана					

И

Состав экрана	Толщина экрана, мм	Максимальное давление, МПа	Длительность фазы сжатия УВ, мкс	Котр1
Экрана нет	0	5,8	225	1
	30	13,0	128	2,24
	50	9,3	100	1,60
Породон $o=40 \text{ kg/m}^3$	60	8,6	240	1,48
	70	7,6	630	1,31
	100	1,92	1060	0,33
	150	1,12	1260	0,19
Древесная стружка, p=170 кг/м ³	60	1,14	-	0,20

Состав экрана	Толщина экрана, мм	Максимальное давление, МПа	Длительность фазы сжатия УВ, мкс	Котр1
Древесная стружка, p=183 кг/м ³	60	1,6	-	0,28
Древесная стружка, p=260 кг/м ³	60	0,9	-	0,16
Один слой: сталь (4мм) + поролон (60 мм)	64	0,28	2160	0,05
Два слоя: сталь (2,5мм) + поролон (60 мм)	65	0,58	5000	0,10
Три слоя: сталь (2,5мм) + поролон (30 мм)	97,5	0,65	2690	0,11

Из таблицы 4.1. следует, что применение экранов из низкоплотного поролона толщиной до 70 мм приводит к увеличению амплитуды отраженной от преграды УВ. Для ослабления УВ необходимы экраны толщиной 100...150 мм.

Эффект усиления УВ объясняется таким образом, что в результате воздействия УВ пористый материал ускоряется и уплотняется. Приобретенную материалом экрана скорость *и* для треугольного профиля давления падающей УВ в первом приближении можно оценить с помощью зависимости:

$$u = \frac{k_{\text{orp1}} \cdot P_{+} \cdot \tau_{+}}{2 \cdot \rho_{0} \cdot H},\tag{4.1}$$

где $k_{\text{отр1}}$ – коэффициент отражения УВ от пористого экрана; P_+ и τ_+ - амплитуда и длительность фазы сжатия УВ; $\rho_{\text{в}}$ – начальная плотность материла экрана; H – толщина пористого экрана.

Нагружение защищаемой конструкции происходит в результате торможения на её поверхности уплотненного экрана. Возникающее при этом максимальное давление P_{max} в акустическом приближении можно определить из соотношения (4.2).

$$P_{max} = \rho \cdot u \cdot c = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{k_{\text{orp1}} \cdot P_+ \cdot \tau_+ \cdot c}{2H},$$
(4.2)
где *p* – плотность уплотненного материала экрана; *c* – скорость звука в уплотненном материале экрана.

Сравнить давление P_{max} с давлением $P_{\text{отр}}$ отраженной от поверхности конструкции УВ в отсутствие экрана можно с помощью коэффициента K_p :

$$K_{p} = \frac{P_{max}}{P_{opp}} = \frac{\rho}{\rho_{0}} \frac{k_{opp1} \cdot \tau_{+} \cdot c}{k_{opp2} \cdot 2H},$$
(4.3)

где $k_{orp2} = P_{orp}/P_+ - коэффициент отражения УВ от жесткой преграды. В зависимости от параметров нагружающей УВ и характеристик экрана коэффициент <math>K_p$ может быть как больше (усиление УВ), так и меньше (ослабление УВ) единицы.

Критическую толщину экрана, начиная с которой экран ослабляет УВ можно найти из предыдущего соотношения, приняв *K*_p=1:

$$H_{\rm Kp} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{k_{\rm orp1} \cdot \tau_+ \cdot c}{k_{\rm orp2} \cdot 2},\tag{4.4}$$

Согласно полученной зависимости критическая толщина экрана линейно зависит от длительности фазы сжатия УВ τ_+ . Этот вывод подтверждается экспериментальными данными, приведенными в таблице 4.2, в соответствии со значениями, указанными в работах [65, 67]: при увеличении значения τ_+ со 130 до 1300 мкс значение $H_{\rm kp}$ возрастает с 87 до 850 мм. Что касается зависимости критической толщины экрана от амплитуды УВ, то она оказывается нелинейной: при увеличении амплитуда УВ в 10 раз значение $H_{\rm kp}$ увеличивается примерно в 6 раз.

Таблица 4.2 – Значения критической толщины защитных экранов из поролона в зависимости от значений параметров нагружающей УВ

№	Пара	Критическая	
п/п	Амплитуда, МПа	Длительность фазы сжатия, мкс	толщина экрана, мм
1	6,6	130	87
2	6,6	1300	850
3	10,0	130	18
4	6,6	130	112

Более плотная по сравнению с поролоном древесная стружка эффективнее уменьшает максимальное давление нагружения (таблица 4.1).

Хорошими защитными свойствами обладают многослойные экраны из стального листа и слоя поролона (таблица 4.1). Они существенно уменьшают максимальное давление нагружения и увеличивают длительность фазы сжатия УВ τ_+ . Это обстоятельство позволяет в некоторых случаях трансформировать нагрузку на конструкцию из импульсной (T >> τ_+ , где T – период собственных колебаний конструкции) в квазистатическую силовую (T < τ_+) и тем самым повысить взрывоустойчивость конструкции [68].

В работе [69] 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 [70].

4.2 Разработка конфигурации модели защитного устройства

Расположение в непосредственной близости от опасных объектов зданий и сооружений, в которых находится персонал, предопределяет необходимость повышения взрывоустойчивости таких зданий. Одним из эффективных средств защиты от воздействия взрыва будет возведение на пути действия ударной волны защитной преграды. Ключевой стратегией уменьшения последствий взрыва при таком способе защиты будет создание защитного устройства в виде комбинированного гасителя: "Аттенюатор ударной волны взрыва". Главная функция аттенюатора – удерживать взрывную энергию от достижения ею объекта защиты. Термин «устройство»¹ в данном случае применим в качестве конструкции с определенным расположением, входящих в него элементов, их соотношения.

Устройство аттенюатора ударной волны взрыва (далее - АУВВ) представляет собой защитный барьер - стена 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 представляет собой многослойную 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 ударной волны. По своей конфигурации модель АУВВ представляет собой пространственную конструкцию с лабиринтным расположением одиночных энергопоглощающих экранов.

¹ Толковый словарь С.И. Ожегова.



Рисунок 4.1 – Конфигурация модели аттенюатора ударной волны взрыва

За счёт 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 её фронте. Иными словами пластические деформации каждого экрана обеспечивают достаточную ударную вязкость для поглощения энергии взрыва. За счёт демпфирующих свойств поглощающего материала в слое диссипативных вставок, происходит ослабление амплитуды давления, в виду чего значительно снижается ударное нагружение на конструкцию, в совокупности двух факторов обеспечивается устойчивость здания и как следствие безопасность персонала.

Опытом предыдущих исследований было установлено, что при исследовании звуковых волн, догоняющих УВ вместе с энтропийными и вихревыми возмущениями, наблюдается эффект усиления УВ за счет относительно слабых звуковых волн [71, 72, 73, 74]. В работе [75] экспериментально установлено, что вблизи критического угла падения амплитуда колебаний УΒ под действием акустических возмущений достигает максимальных значений. Вышеуказанные утверждения и известные положения об уменьшении амплитуды УВ на расстояниях и её переходе в слабый (звуковой) сигнал [76] подчеркивают целесообразность применения на последующих стенках гасителя методов энергопоглощения, применяемых в подробнее Далее технической акустике. рассмотрим энергопоглощающие свойства диссипативных вставок.

75

4.3 Исследование эффективности диссипативных вставок

В рамках проведения работ по разработке модели комбинированного глушителя шума¹ энергетических установок экспериментально были исследованы свойства различных видов диссипативных вставок.

Исследования проводились на экспериментальной установке, генерирующий искусственный шум (белый шум) в широком диапазоне частот. Изображение и схема установки представлены на рисунке ниже.



Рисунок 4.2 – Схема экспериментальной установки

1 – генератор белого шума; 2 – громкоговоритель; 3 – 3П вставка; 4 – резонатор Гельмгольца; 5 – микрофон; 6 – усилитель микрофонный; 7 – третьоктавный фильтр.



Рисунок 4.3 – Фото стенда экспериментальной установки

Комбинированный глушитель шума содержит цилиндрический корпус большего диаметра, чем газо-воздушный канал, ограничен торцевыми стенками. Образовавшаяся полость разделена поперечными перегородками, и возникшие таким образом камеры, две и более, соединяются с пространством канала поясками отверстий, образующие последовательный ряд резонаторов Гельмгольца и в сечении поясков отверстий каждого резонатора располагаются

¹ Патент на полезную модель, РФ №154807 «Комбинированный глушитель шума энергетических установок» Терехин А.С., Смирнов С.Г., Невская Е.Е., Нестеров Н.С.

соосно в канале цилиндрические диссипативные вставки из листового перфорированного материала, заполненные звукопоглощающим материалом. В конструкции глушителя 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 > 0,2) и заполненные звукопоглощающим материалом рисунок 4.4.



Рисунок - 4.4 Диссипативные вставки

Экспериментально были проверены вставки 4-х видов, отличающиеся по размерам и звукопоглощающему материалу. Звукопоглощающий материал выбран исходя из значений коэффициента звукопоглощения а. Эффективность звукопоглощения тем больше, чем ближе значение звукопоглощения к единице.

На рисунке 4.4 представлены диссипативные вставки, следующих образцов: 1 – вставка из базальтового волокна; 2 – вставка из базальтового волокна меньшего размера; 3 – вставка из поролона; 4 – вставка для снижения влияния звука на громкоговоритель.



Рисунок 4.4 – Коэффициент поглощения α в октавных полосах со среднегеометрическими частотами

В состав экспериментальной модели входит резонаторная камера. Резонатор был рассчитан на частоту 320 Гц, камера имела объем 0,0026 м, 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 ниже (рисунок 4.5).



3П вставка №1 вставка из базальтового волокна; 3П вставка №2 вставка из базальтового волокна меньшего размера; 3П вставка №3 вставка из поролона.



Результаты проведенного 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, было проведено численное моделирование процесса диссипации энергии при использовании вставок из базальтового волокна. Метод конечно-элементного моделирования позволяет представить дискретное пространство в виде конечного числа элементарных объемов.

Исследования проводились в программных комплексах ANSYS и SYSNOISE. В первом из них создавалась геометрия модели, объем которой разбивался на элементы. Затем конечноэлементная 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 были определены значения звукового давления в канале до и после камеры резонатора со вставками из звукопоглощающего материала (ЗПМ), по которым вычислены значения потерь передачи звуковой энергии в канале во всем рассматриваемом диапазоне частот.



Рисунок 4.6 – Цветовые схемы распределения звукового давления в сечении

резонатора



Рисунок 4.7 – Цветовые схемы распределения скоростей в 3-х направлениях

Таким образом, экспериментально и с помощью методов численного моделирования было проведено исследование свойств диссипативных материалов, способных перевести энергию звуковой волны в тепловую энергию в результате трения частиц воздуха о поверхность пористого материла. 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 аттенюатора ударной волны взрыва вставки из базальтового волокна.

4.4 Результаты оценки эффективности аттенюатора ударной волны взрыва

4.4.1 Численное моделирование воздействия ударной волны на здание операторной

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

Сценарий взрыва облака моделировался в аварийном модуле, с размерами в плане 9x4,5x4,5 м и который находится на открытом пространстве. В 40 м. от взрывоопасного модуля находится здание операторной габаритные размеры которого 9x6x4,6 м (рисунок 4.8). Внутри модуля размещено 40 труб, моделирующих загроможденность пространства. Толщина стен модуля 0,02 м, на передней стороне модуля по центру имеется вентиляционное отверстие размером 3,18x3,18 м через которое будет выходить волна давления. В таблице 4.3 указано расположение датчиков, фиксирующих значение избыточного давления, импульса и числа Маха в определенных пространственных точках на пути движения УВ.

Рассматриваем наихудший сценарий, когда концентрация взрывоопасного облака пропана равна стехиометрической, а само облако заполняет весь объем модуля. Результаты расчета давления и импульса, приходящие на здание операторной, при взрыве облака пропана внутри модуля на рисунке 4.9. В таблице 4.3 указаны координаты расположения датчиков, фиксирующих давление и импульс на пути действия УВ.



Рисунок 4.8 – Расположение взрывоопасного модуля и здания операторной

Название датчика	Позиция в координатах <x,y,z></x,y,z>
MP-1	<0.75,2.25,0.75> м
MP-2	<5.75,2.25,0.75> м
MP-3	<18.55,2.25,0.75> м
MP-4	<22.75,2.25,0.75> м
MP-5	<23.20,2.25,0.75> м
MP-6	<24.75,2.25,0.75> м
MP-7	<34.75,2.25,0.75> м
MP-8	<36.75,2.25,0.75> м
MP-9	<39.95,2.25,0.75> м

Таблица 4.3. – Координаты расположения датчиков

Ниже (рисунок 4.9- 4.10) приведены результаты численного моделирования воздействия УВ на фронтальную стену здания операторной без использования защитного АУВВ.



б)

Рисунок 4.9 – Визуализация результатов расчета давления УВ при взрыве ТВС, оказываемого на здание операторной без АУВВ; характерный профиль УВ а), цветовая схема распределения избыточного давления б)



Рисунок 4.10 – Визуализация результатов расчета импульса УВ при взрыве ТВС, оказываемого на здание операторной без АУВВ; изменение значений импульса в зависимости от времени – (а), цветовая схема распределения импульса в координатах (x,y) – (б)

Из результатов расчетов значений давления и импульса, приходящих на здание, фиксируемых датчиком MP-9 видно, что максимальное отраженное давление от фронтальной стены здания составляет 0,4 бар или 40 кПа. Значение импульса волны давления составляет – 380 Па·с или 0,38 кПа·с. Т.к. задачи упруго-пластического деформирования и динамического поведения конструкции под действием ударной нагрузки в данном примере не рассматриваются, то степень повреждения операторной возможно оценить, используя «*P-I* диаграмму для оценки уровня разрушения промышленных зданий» [3, с. 20]. Получим следующие результаты (рисунок 4.11):



«1-граница минимальных разрушений; 2-граница значительных повреждений; 3-разрушение зданий (50-75% стен разрушено)» [3, с. 20].

Ось абсцисс – давление, кПа; ось ординат –

импульс, кПа·с

Рисунок 4.11 – Оценка уровня разрушения здания операторной по *P-I* диаграмме

Таким образом, при расположении здания операторной на расстоянии 40 м от потенциального источника взрыва, здание попадает в зону значительных повреждений.

4.4.2 Численное моделирование воздействия ударной волны на здание операторной при использовании АУВВ

Рассмотрим результаты численного моделирования воздействия ударной волны на здание операторной, при реализации сценария взрыва облака пропана, рассматриваемого в п.4.4.1, с учетом размещения защитного барьера – АУВВ высотой 5 м и на расстоянии 8 м. от взрывоопасного модуля (рисунок 4.11). Расстояние между экранами модуля принято 0,5 м. Моделирование проводилось для 4 и 5 слоев экранирующих барьеров, расположенных в лабиринтном порядке.



Рисунок 4.12 – Расположение взрывоопасного модуля, АУВВ (4 сл.) и здания операторной

Таблица	4.4. –	- Коорлинаты	расположения	латчиков
тионици		поординаты	pachonomennin	Aut mixob

Название датчика	Позиция в координатах <x,y,z></x,y,z>	Расположение датчика относительно объекта
MP-1	<6.75,2.25,0.75> м	внутри модуля
MP-2	<8.75,2.25,0.75> м	внутри модуля
MP-3	<16.95,2.25,0.75> м	перед АУВВ
MP-4	<18.65,2.25,0.75> м	после АУВВ
MP-5	<23.20,2.25,0.75> м	за 16 м до операторной
MP-6	<24.75,2.25,0.75> м	за 15 м до операторной
MP-7	<34.75,2.25,0.75> м	за 5 м до операторной
MP-8	<36.75,2.25,0.75> м	за 3 м до операторной
MP-9	<39.95,2.25,0.75> м	на операторной

Ниже на рисунках приведены результаты численного моделирования воздействия УВ на фронтальную стену здания операторной при использовании АУВВ.



Рисунок 4.13 – Визуализация результатов расчета давления при установке АУВВ



Рисунок 4.14 – Визуализация результатов расчета давления при установке АУВВ на датчиках (MP 3, MP 4, MP 9)



Рисунок 4.15 – Зависимость импульса от времени при установке АУВВ



Рисунок 4.16 – Визуализация результатов расчета числа Маха при установке АУВВ

Далее представлены цветовые схемы распределения максимального отраженного давления в зависимости от времени в координатах (X;Z).



Рисунок 4.17 – Цветовая схема распределения избыточного давления на 0,410 сек



Рисунок 4.18 – Цветовая схема распределения избыточного давления на 0,425 сек



Рисунок 4.19 – Цветовая схема распределения избыточного давления на 0,429 сек



Рисунок 4.20 – Цветовая схема распределения избыточного давления на 0,453 сек



Рисунок 4.21 – Цветовая схема распределения избыточного давления на 0,475 сек



Рисунок 4.22 – Цветовая схема распределения избыточного давления на 0,499 сек

Ниже на рисунках (рисунок 4.23- рисунок 4.24) представлены 3d визуализации распределения максимального давления в зависимости от времени для 5-ти слойного АУВВ.



Рисунок 4.23 – 3d визуализация распространения избыточного давления на 0,440 сек



Рисунок 4.24 – 3d визуализация распространения избыточного давления на 0,475 сек

Ниже на рисунках (рисунок 4.25- рисунок 4.26) представлены 3d визуализации распределения максимального давления в зависимости от времени для 4-х слойного AУBB.



Рисунок 4.25 – 3d визуализация распределения избыточного давления на поверхности 0,525 сек



Рисунок 4.26 – 3d визуализация распространения избыточного давления на 0,530 сек



Рисунок 4.27 – 3d визуализация распространения избыточного давления на 0,530 сек

Из результатов расчетов значений давления и импульса, приходящих на здание операторной после прохождения УВ защитного барьера в виде АУВВ, фиксируемых датчиком MP-9 видно, что максимальное отраженное давление от фронтальной стены здания составляет 0,11 бар или 11 кПа. Значение импульса волны давления составляет – 218 Па·с или 0,22 кПа·с. Значение избыточного давления во фронте УВ перед прохождением АУВВ, фиксируется датчиком MP-3 и составляет 1,64 бар или 164 кПа, после, после прохождения АУВВ, датчиком MP-4 зафиксировано избыточное давление во фронте 0,21 бар или 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, т.к. выбранный для расчета программный комплекс FLACS (CMR Gexcon Hopberuя) не учитывает проницаемость среды. Влияние диссипативных вставок шириной 100 мм, расположенных на каждом экране АУВВ можно оценить, используя соотношения (4.1 и 4.2) и данные таблицы 4.1 п.4.1 настоящей главы, а также учитывая коэффициент поглощения для базальтового волокна из экспериментальных данных п.4.3. Таким образом, в ходе проведенных исследований, давление, приходящее на здание операторной составит 0,018 бар или ≈2 кПа.

Т.к. задачи упруго-пластического деформирования и динамического поведения конструкции АУВВ под действием ударной нагрузки в данной задаче не рассматриваются, то степень повреждения операторной возможно оценить, используя «*P-I* диаграмму для оценки уровня разрушения промышленных зданий» [3, с. 20]. Получим следующие результаты (рисунок 4.28):



«1-граница минимальных разрушений; 2-граница значительных повреждений; 3-разрушение зданий (50-75% стен разрушено)» [3, с. 20]. A – воздействие без использования AУBB; A' – воздействие с использованием 4x слойного AУBB; A'' – воздействие с использованием 4x слойного AУBB в комбинации с диссипативными вставками;



Рисунок 4.28 – Оценка уровня разрушения здания операторной по *P-I* диаграмме

Таким образом, при расположении здания операторной на расстоянии 40 м от потенциального источника взрыва при использовании в качестве защитного барьера конструкцию АУВВ, с расположенными в лабиринтном порядке экранами, усиленными слоем диссипативных вставок из базальтового волокна, здание не попадает в зону минимальных разрушений и испытывает нагрузку от действия УВ < 2 кПа.

4.5 Выводы по главе 4

В данной главе рассмотрены способы уменьшения значений избыточного давления во фронте падающей ударной волны с помощью физических барьеров, 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. Исходя из возможного подбора по значению проницаемости пористого материала, а также применением нескольких защитных экранов можно варьировать параметры падающей ударной волны, оказывающей воздействие на здания и сооружения.

Разработана конфигурация модели устройства по снижению интенсивности падающей ударной волны при взрывах топливно-воздушных смесей на ОПО в виде комбинированного гасителя: "Аттенюатор ударной волны взрыва". Главная функция аттенюатора – удерживать взрывную энергию от достижения ею объекта защиты. Модель АУВВ 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 АУВВ представляет собой несколько экранов, расположенных лабиринтным образом, усиленных слоем легких, энергопоглощающих материалов. Экспериментально установлено, что лучшими энергопоглощающими свойствами обладает пористый материал и базальтового волокна.

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

Заключение

Исследование воздействия ударных волн на производственные объекты, расположенные вблизи источника взрыва, имеет важное практическое значение при решении вопросов промышленной безопасности и защиты людей и сооружений от действия взрыва. Анализ аварийности показывает, что большинство крупных аварий произошли вследствие взрыва топливно-воздушных смесей с последующим разрушением зданий и сооружений на опасных производственных объектах. Стратегия борьбы со взрывами и реализация мер по смягчению последствий взрыва требуют внимания и решения с этапа планирования и проектирования ОПО, поскольку впоследствии при эксплуатации объекта, решение данного круга задач становится либо всё более трудным, либо невозможным.

В данной диссертационной работе были решены следующие задачи:

 Проанализированы данные по аварийности и производственному травматизму на отечественных объектах нефтехимии, нефтепераработки, нефтепродуктообеспечения и нефтегазодобычи для выявления общего числа аварий, связанных с видом «взрыв».

 Изучены отечественные и зарубежные подходы в оценке параметров ударных волн, показаны на расчетном примере для конкретного сценария безопасные расстояния для зданий по критерию максимально возможной взрывной нагрузки при внешнем взрыве.

 Исследованы параметры пределов деформации конструкции при взрыве.
 Обобщены принципы взрывоустойчивого проектирования и основные подходы к повышению взрывоустойчивости зданий и сооружений.

 Разработана модель анализа эффектов взрывного воздействия для количественной оценки нагрузок отраженного давления и импульса падающей ударной волны на здания, расположенные за взрывозащитными барьерами.

 Разработан алгоритм, позволяющий визуализировать процент повреждения зданий и сооружений в результате воздействия взрывных нагрузок.

– Разработана новая конфигурация специального защитного устройства оптимального типа – «Аттенюатор ударной волны взрыва», способного максимально снизить воздействие ударной волны на здание.

 Методами численного моделирования доказана эффективность разработанного взрывозащитного устройства.

Список сокращений и условных обозначений

В настоящей диссертации применены следующие сокращения:

AM3	-	активные меры защиты;
AYBB	-	аттенюатор ударной волны взрыва;
ΓФ	-	газовая фаза;
ЖФ	-	жидкая фаза;
ЗПМ	-	звукопоглощающий материал;
3П	-	звукопоглощающая вставка;
КВВ	-	конденсированное взрывчатое вещество;
НКПР	-	нижний концентрационный предел распространения пламени;
OB	-	опасное вещество;
ОПВБ	-	Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств
ОПО	-	опасный производственный объект;
ПАЗ	-	противоаварийная защита;
ПМЗ	-	пассивные меры защиты;
СУГ	-	сжиженный углеводородный газ;
TBC	-	топливно-воздушная смесь;
УВ	-	ударная волна;
YB3	-	усиление взрывозащиты;
ФАП	-	фиброармированные полимерные композиты;
ФНП	-	Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности;
ΦП	-	фронт пламени;
ЭАЭ	-	энергопоглощающими анкерными элементами.

Список использованной литературы

- 1. Годовой отчет деятельности федеральной службы 0 по экологическому, технологическому В 2016 URL: И атомному надзору году. http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения 25.09.2017 г).
- Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МГСУ, 2001. – 460 с.
- Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 31 марта 2016 г. № 137. – Сер.27. – Вып. 15. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 44 с.
- Попов Н. Н. Динамический расчет железобетонных конструкций / Н. Н. Попов, Б. С. Расторгуев. – М.: Стройиздат, 1974. – 207 с.
- 5. Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. -М.: Пожнаука, 2007. -266 с.
- Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991.
 432 с.
- Маршалл В. Основные опасности химических производств: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
 672 с.
- 8. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М.: РАО «Газпром», 1996. 208 с.
- Kingery C.N. and Bulmash G., «Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst», Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984.
- CONWEP (1991) Conventional weapons effects program, Version 2.00 US Army Engineer Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS, USA.
- Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПБ: Издво Политехн. ун-та, 2009. — 594 с.
- 12. Мартынюк В.Ф. Лекции по теории горения и взрыва: учеб. пособие. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2014. — 184 с.
- Рашитов Р. Ф. Обеспечение защищенности обслуживающего персонала установок нефтеперерабатывающих предприятий от воздействия ударной волны: дис. канд. тех. наук. – Уфа, 2008. – 150 с.
- 14. Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований. – В кн.: Физика взрыва, – М.: АН СССР. 1952. №1 С.20 – 110.

- Bajić, Z. Determination of TNT equivalent for various 15. Explosives. University of Belgrade, Belgrade, 2007. Master's Thesis.
- 16. Расчет зон разрушения зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах/ К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 9. — С. 70–77.
- Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. – Саратов: СГТУ, 2002. — 178 с.
- 18. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: рук. по безопасности. Сер. 27. Вып. 16. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. 56 с.
- 19. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ: рук. по безопасности. Сер. 27. Вып. 11. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. 130 с.
- 20. Методы обоснования взрывоустойчивости зданий и сооружений при взрывах топливновоздушных смесей на опасных производственных объектах: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 13 мая 2015 г. № 189. — Сер. 27. — Вып. 17. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. — 78 с.
- 21. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. — Сер. 09. — Вып. 37. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. — 132 с.
- 22. СНиП 20.13330.2011 (СНиП 2.01.07—85*). Нагрузки и воздействия. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200084848 (дата обращения: 29.07.2017).
- 23. Расторгуев Б.С, Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. М.: изд-во ACB, 2007. 152с.
- 24. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200069775 (дата обращения: 30.07.2017).
- American Society of Civil Engineers «Design of blast resistant buildings in petrochemical facilities». — New York, 2010. — 318 p.
- 26. Невская Е.Е., Глебова Е.В. Анализ способов и средств повышения уровня защиты зданий и сооружений от действия ударных волн// Безопасность труда в промышленности. 2017. № 2. С. 73–78
- Uddin N. Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites. New York, 2010. — 488 p.

- 28. ГОСТ 31438.1-2011(EN 1127-1:2007) «Взрывоопасные среды. Взрывозащита и предотвращение взрыва. Часть 1. Основополагающая концепция и методология».
- 29. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия: РБ Г-05-039-96/ ПТЦ ЯРБ Госатомнадзора России. М., 2000.
- 30. Грановский Э.А., Норка З.М. Принятие решений о достаточной устойчивости производственных зданий к аварийным взрывам на основе анализа риска поражения находящихся в них людей. — Донецк: ООО «Научный центр изучения рисков «РИЗИКОН».
- 31. Русских В.В., Яворский А.В., Яворская Е.А. Параметры взрывозащитных устройств для гашения ударных воздушных волн при подземной добыче руд: моногр. Днепропетровск: НГУ, 2012. 93 с.
- 32. Исаев И.Р. Обоснование рациональных параметров средств локализации взрывов метана и пыли с целью повышения безопасности труда в угольных шахтах: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 245 с.
- 33. Убежища гражданской обороны. Конструкции и расчет/ В.А. Котляревский, В.И. Ганушкин, А.А. Костин, В.И. Ларионов. М.: Стройиздат, 1989. 606 с.
- 34. Технические средства защиты стен зданий и сооружений от взрывов повышенной мощности. URL: http://www.vst-st.ru/tszs.html/ (дата обращения: 26.12.2016).
- 35. Goel, M. D., and Matsagar, V. (2014). "Blast-resistant design of structures." Pract. Period. Struct. Des. Constr., 10.1061/(ASCE) SC.1943-5576.0000188, 04014007.
- 36. ASCE. (2011). "Blast protection of buildings." ASCE/SEI 59-11, Reston, VA.
- 37. Kingery, C. N., and Bulmash, G. (1984). "Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst." Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD.
- 38. Crepeau, J. (1998). SHAMRC second-order hydrodynamic automatic mesh refinement code: User's manual, Vol. 2, Applied Research Associates, Inc., Albuquerque, NM.
- 39. Beyer, M. E. (1986). "Blast loads behind vertical walls." URL: http://www.dtic.mil/cgibin/GetTRDoc?AD=ADP005331> (дата обращения 25.06.2017 г).
- 40. Jones, P. S., Vitaya-Udom, K. P., and Watt, J. M. (1987). Design of structures to resist terrorist attack: Report 1, Structures Laboratory, Dept. of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, MS.
- 41. Chapman, T. C., Rose, T. A., and Smith, P. D. (1995b). "Reflected blast wave resultants behind cantilever walls: A new prediction technique." Int. J. Impact Eng., 16(3), 397–403.

- 42. Rose, T. A., Smith, P. D., and Mays, G. C. (1995). "The effectiveness of walls designed for the protection of structures against airblast from high explosives." Proc. Inst. Civ. Eng., 110(1), 78–85.
- 43. Rose, T. A., Smith, P. D., and Mays, G. C. (1997). "Design charts relating to protection of structures against airblast from high explosives." Proc., ICE-Struct. Build., 122(2), 186–192.
- 44. Rose, T. A., Smith, P. D., and Mays, G. C. (1998). "Protection of structures against airburst using barriers of limited robustness." Proc. Inst. Civ. Eng., 128(2), 167–176.
- 45. Hulton, F. G., Smith, P. D., and Rose, T. A. (1995). "Blast resultants behind cantilever walls: Comparison between full-scale and model-scale experiments." Proc., 14th Int. Symp. on Military Aspects of Blast and Shock, Dept. of Civil and Mechanical Systems Engineering, Cranfield Univ., Cranfield, U.K.
- 46. Bogosian, D., and Piepenburg, D. (2002). "Effectiveness of frangible barriers for blast shielding." Proc., 17th Int. Symp. on Military Aspects of Blast and Shock, Science Applications International Corporation, McLean, VA.
- 47. Scherbatiuk, K., and Rattanawangcharoen, N. (2008). "Experimental testing and numerical modeling of soil-filled concertainer walls." Eng. Struct., 30(12), 3545–3554.
- 48. Chen, L., Zhang, L., Fang, Q., and Mao, Y. (2015). "Performance based investigation on the construction of anti-blast water wall." Int. J. Impact Eng., 81, 17–33.
- 49. Chapman, T. C., Rose, T. A., and Smith, P. D. (1995a). "Blast wave simulation using AUTODYN2D: A parametric study." Int. J. Impact Eng., 16(5–6), 777–787.
- 50. Ngo, T., Nguyen, N., and Mendis, P. (2004). "An investigation on the effectiveness of blast wall and blast-structure interaction." Developments in mechanics of structures and materials, Perth, Australia, 961–7.
- 51. Rickman, D. D., Murrell, D. W., and Armstrong, B. J. (2006). "Improved predictive methods for airblast shielding by barrier walls. "ASCE Structures Congress 2006, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- 52. Zhou, X. Q., and Hao, H. (2008). "Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier." Int. J. Impact Eng., 35(5), 363–375.
- 53. Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И. Особенности распространения ударных волн в пенах // ФГВ. 1981. №4.
- 54. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко, О. Е. Попов. Исследование особенностейраспространенияиотраженияволндавлениявпористойсреде. ПМТФ, 1975. №6. С. 74-77.
- 55. Гельфанд Б.Е., Губанов А.Б., Тимофеев Е.И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном// Известия АНСССР, МЖГ, 1983, №4. С. 54-79.

- 56. Б. Е. Гельфанд, С. П. Медведев, А. Н. Поленов, С. М. Фролов. Передача ударноволновой нагрузки насыпными средами. ПМТФ, 1988. №2. С. 115-121.
- 57. С.П. Медведев, С.М. Фролов, Б.Е. Гельфанд. Ослабление ударных волн насадками из гранулированных материалов. Инженерно-физический журнал. 1990. Т. 58 №6.С. 924-928.
- 58. С. М. Фролов, Б. Е. Гельфанд Ослабление ударных волн в газовзвесях // ПМТФ. 1991.
 №1. С. 130–136.
- 59. Бузуков А.А. Снижение параметров воздушной ударной волны с помощью воздушноводяной завесы // ФГВ. 1990. № 3.
- 60. Осавчук А.Н., Глазова Е.Г., Митрофанов С.С., Дикий А.А., Куликов В.Н. Экспериментально-расчетные исследования процесса распространения ударной волны через цилиндрический пакет из металлической сетки. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. Вып. 4(4). С. 1436–1438.
- 61. Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, С.В. Крылов, С.С. Митрофанов, А.Н. Осавчук, А.А. Дикий, В.Н. Куликов Численно-экспериментальное исследование распространения ударных волн через цилиндрические пакеты металлических сеток. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. Вып. 5(1). С. 122–129.
- 62. Moré, J. J., Garbow, B. S., and Hillstrom, K. E. (1980). User guide for MINIPACK-1. Argonne National Laboratory, Argonne, IL.
- 63. Swisdak, M. (1994). "Simplified kingery airblast calculations." URL: http://www.dtic.mil/cgibin/GetTRDoc?AD=ADA526744. (дата обращения 25.09.2017 г).
- 64. Nichols, J. F., and Doyle, G. (2014). "Current engineering models and capabilities in the vulnerability assessment and protection option (VAPO) software." ASCE Structures Congress 2014, Applied Research Associates, Raleigh, NC, 176–187.
- 65. Гельфанд, М.В. Сильников. Фугасные эффекты взрывов. СПб.: ООО «Издательство «Полигон», 2002. –272 с.
- 66. Турыгина И.А. Численное моделирование взаимодействия ударных волн с проницаемыми преградами: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н., 2016. 131 с.
- 67. Взрывные технологии : учебник для вузов / В. В. Селиванов, И. Ф. Кобылкин, С. А. Новиков. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 519 с.
- 68. Нестеренко В. Φ. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. - 200 с.
- 69. Киселев С. П. Структура ударных волн сжатия в пористых упругопластических материалах // ПМТФ. 1998 Т. 39, N6 С. 27–32.

- 70. ГубайдуллинА.А., ДудкоД.Н., УрманчеевС.Ф. Воздействие воздушных ударных волн на преграды, покрытые пористым слоем // Вычислительные технологии, 2001, т. 6, №3, с. 7-20.
- 71. Ландау Л. Д. Об ударных волнах на далеких расстояниях от места их возникновения // Прикладная математика и механика. 1945. т.9. -№ 4. с. 286-292.
- 72. Ландау, Л.Д. Механика сплошных сред : Гидродинамика и теория упругости / Л. Ландау и Е. Лифшиц. М. ; Л. : ОГИЗ : Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1944. 624 с.
- 73. Lighthill, M. J. 1956 Viscosity effects in sound waves of finite amplitude. In Surveys in Mechanics (ed. G. K. Batchelor & R. M. Davies), pp. 250–351. Cambridge University Press.
- 74. Султанов А.Ш. К акустической теории взаимодействия ударной волны с пористой средой: автореферат дис. ... кандидата физ. мат. наук. Уфа, 2014. 26 с.
- 75. McKenzie J. F., Westphal K. O. Interaction of linear waves with oblique shock waves // Phys. Fluids. — 1968. V. 11, p. 2350 — 2362.
- 76. Наугольных К.А. «О переходе ударной волны в акустическую» // Акустический журнал.
 1972. т.8. -№ 4. с. 579-583.
- 77. Gebbeken, N., and Döge, T. (2010). "Explosion protection: Architectural design, urban planning and landscape planning." Int. J. Protective Struct., 1(1), 1–21.
- 78. Количественный анализ риска при обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений/ Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.А. Швыряев// Безопасность труда в промышленности. 2013. № 6. С. 82–89.
- 79. Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Permanent Buildings. API Recommended practice 752. Washington., 2009. 40 c.
- 80. Невская Е.Е. Основные методы оценки параметров ударных волн при аварийных взрывах. Принципы проектирования взрывоустойчивых зданий и сооружений. Безопасность труда в промышленности. 2017. № 9. С. 20-29.
- 81. СП 88.13330.2014 «Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77. URL: http://files.stroyinf.ru/data1/5/5006/ (дата обращения 30.11.2017).
- 82. Федотов В.Н. Основные факторы, определяющие нагрузки на строительные конструкции при аварийных взрывах газовых смесей дис. канд. техн. наук: 05.26.01 / В. Н. Федотов; МИСИ им. В.В. Куйбышева. М., 1987. 167 с.
- 83. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2 кн./ У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др.: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986.
- 84. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений: пер. с англ. М.: Стройиздат, 1980. 342 с.

- 85. Тропкин С. Н. Обеспечение защищенности обслуживающего персонала установок нефтеперерабатывающих предприятий от воздействия ударной волны: дис. канд. тех. наук. – Уфа, 2013. – 154 с.
- 86. Пилюгин Л.П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. Ассоциация «ПожНаука», М., 2000. 224 с.
- 87. Пилюгин Л.П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств. М., Стройиздат, 1988 г. – 316 с.
- 88. Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Permanent Buildings. API Recommended practice 752. Washington., 2009. – 40 c.
- 89. Britt, J. R., Ranta, D. E., and Ohrt, A. P. (1999). A user's manual for the BLASTX code, version 4.1, United States Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- 90. Dillon, R. L., Liebe, R. M., and Bestafka, T. (2009). "Risk-based decision making for terrorism applications." Risk Anal., 29(3), 321–335.
- 91. DoD (Department of Defense). (2002). "Design and analysis of hardened structures to conventional weapons effects." UFC 3-340-01, Washington, DC.
- 92. DoD (Department of Defense). (2008a). "DoD security engineering facilities planning manual." UFC 4-020-01, Washington, DC.
- 93. DoD (Department of Defense). (2008b). "Structures to resist the effects of accidental explosions." UFC 3-340-02, Washington, DC.
- 94. DoD (Department of Defense). (2012). "DoD minimum antiterrorism standards for buildings." UFC 4-010-01, Washington, DC.
- 95. Орлов Г.Г. Легкосбрасываемые конструкции для взрывозщиты промышленных зданий.
 М.: Стройиздат, 1987. 202 с.

Приложение 1

Акт внедрения

Приложение 2

Перечень аварий, связанных с взрывами облаков ТВС на ОПО, по данным из чек-листов Ростехнадзора, в период с 2014 по 2017 год

Nº	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
1	26.02.20	000	В нижней части	1. Технические причины аварии	Не
	14	«Ставролен».	колонны произошла	1.1. Разгерметизация алюминиевого пластинчатого теплообменника вследствие	определен
		Узел	разгерметизация	разрушения гофрированной пластины левой теплообменной секции из-за	
		разделения	теплообменника с	коррозионно-структурных изменений гофрированных пластин теплообменных	
		пропан-	выбросом паров	секций и нижнего коллектора теплообменника, находившихся в контакте с кубовым	
		пропиленово	пропан-	продуктом колонны.	
		й фракции	пропиленовой	2. Организационные причины аварии:	
		«Разделения	фракции с	2.1. В технических условиях на поставляемое углеводородное сырье не предусмотрен	
		пирогаза и	последующим	контроль за содержанием в нем агрессивных компонентов и примесей.	
		получения	взрывом	2.2. Отсутствие паровой изоляции печей с открытым огневым процессом установки	
		бензола»	парогазовой смеси	«Пиротол» от взрывоопасной среды, образующейся при авариях на наружных	
		производства	и пожаром на	установках - печи должны быть оборудованы паровой завесой, включающейся	
		этилена.	территории узла	автоматически или дистанционно и обеспечивающей предотвращение контакта	
			выделения	взрывоопасной среды с огневым пространством печи.	
			пропилена.	2.3. Высокая температура наружных поверхностей оборудования узлов	
				предварительного и пиротолового реакторов установки получения бензола	
				«Пиротол» цеха «Разделения пирогаза и получения бензола», превышающая	
				температуру самовоспламенения наиболее взрывопожароопасного вещества и	
				послужившая источником возгорания парогазовой смеси с последующим взрывом.	
				2.4. Недостаточный контроль за скоростью коррозии технологического оборудования	
				и трубопроводов производства этилена.	
2	07.04.20	OAO	Взрыв газо-	1. Технические причины аварии:	624000
	14	«Электростал	воздушной смеси	1.1 Неисправность запорной газовой арматуры установленной на газопроводе перед	
		ьский	при розжиге котла.	горелкой №1 котла ПТВМ-30М.	
		химико-		2. Организационные причины:	
		механически		2.1. Не проводятся работы по техническому обслуживанию и ремонту внутренних	
		й завод».		газопроводов, газового оборудования и арматуры на котле.	
		Паросиловой		2.2 Производственный контроль за эксплуатацией ОПО систем газопотребления не	
		цех № 17,		осуществляется.	
		газифициров		2.3 Производственные инструкции для операторов котельной, обслуживающих	
		анная		водогрейные котлы не содержит описание последовательности действий операторов	

N⁰	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
		котельная с двумя водогрейным и котлами марки ПТВМ-30 м		по подготовке к розжигу, продувке, разжигу, выводу котла на рабочие режимы горения	
3	05.06.20 14	ОАО «Ростовская газонаполнит ельная станция». Насосно- компрессорн ое отделение	Взрыв газо- воздушно в насосно- компрессорном отделении.	 Технические причины аварии: Разгерметизация одного из фланцевых соединений стального коллектора жидкой фазы сжиженного углеводородного газа (СУГ) насосов с последующей загазованностью помещений цеха реализации газа (ЦРГ): насосно-компрессорного отделения (НКО). Не срабатывание аварийной вентиляции, в следствии внештатной работы (неисправных) стационарных сигнализаторов загазованности СТХ-3. Организационные причины: Не организован на должном уровне производственный контроль за соблюдением требований промышленной безопасности при эксплуатации объектов, использующих сжиженные углеводородные газы (СУГ) ОАО «Ростовская ГНС». Че создана система управления промышленной безопасностью. Отсутствия на фундаментах компрессоров и насосов устройств, гасящих вибрацию. Отсутствие герметичности стены между помещением насосно-компрессорного отделения (НКО) и помещениями электрощитовой, воздушной компрессорной и проходящих через эту стену коммуникаций. 	8440448
4	15.06.20	ОАО «Ачинский НПЗ Восточная нефтяная компания». Секция 400 газофракцио нирования установки ЛК-6у	В верхней части колонны деэтанизации произошла разгерметизация горизонтальных участков шлемового трубопровода колонны с выбросом смеси углеводородов, загазованностью территории с	 1.Технические причины аварии: разгерметизация горизонтальных участков шлемового трубопровода, вызванная низкотемпературной сероводородной коррозией в присутствии хлористого водорода. 2. Организационные причины аварии: нарушения, допущенные экспертными организациями при проведении экспертизы промышленной безопасности технологического оборудования и проектной документации на техническое перевооружение, связанные с отсутствием анализа и учета скорости коррозионного разрушения участков трубопровода, работающих в особо сложных условиях, где наиболее вероятен максимальный износ, и отсутствием оценки оснащённости технологических процессов средствами контроля, управления и противоаварийной защиты и их действий в период пуска и останова технологического оборудования секции С 400. 	62000000
Не определен					

Не определен					
Не определен					
Не определен					
Не определен					
определен					
1 1 1					
.M					
)T					
1					
12074000					
13974000					
3					
_					
3					
22201000					
32391000					
ны і і) і а і пе : во					

№	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
		Уфимский	трубопровода	2.1. отсутствие контроля за степенью коррозионного износа трубопровода с учетом	
		НПЗ».	«гидрогенизат из	конкретных условий его эксплуатации;	
		Установка	сепаратора в	2.2. несоответствие параметров температуры стенки элементов трубопровода,	
		гидроочистк	теплообменник»	указанных в паспорте, с параметрами, установленными проектной документацией	
		и дизельного	установки	2.3. неудовлетворительное осуществление производственного контроля за	
		топлива	гидроочистки	соблюдением требований промышленной безопасности за техническим состоянием	
		газокаталити	произошел взрыв	при эксплуатации, ремонте, испытании, ревизии технологического трубопровода на	
		ческого	газовоздушной	опасном производственном объекте.	
		производства	смеси с		
			последующими		
			возгорание		
			продукта.		
8	21.10.20	АО «Газпром	В результате	1. Технические причины аварии:	64800
	15	газораспреде	коррозионного	1.1. Коррозионные повреждения (свищи) на теле подземного распределительного	
		ление	повреждения	газопровода среднего давления,	
		Назрань».	подземного	в 2 местах, размером 6х2мм.	
		Подземный	распределительного	1.2. Нарушение целостности подземного распределительного газопровода среднего	
		стальной	газопровода	давления, в результате перекладки, засыпки песчано-гравийной смесью и	
		газопровод	среднего давления	заасфальтированием данного участка газопровода, повлекшее за собой коррозионное	
		низкого	(до 0,3 MПа)	повреждение газопровода.	
		давления, в	диаметром 76мм по	2. Организационные причины:	
		районе дома	ул. Фестивальная,	2.1. Невыполнение сотрудниками АО «Газпром газораспределение Назрань» своих	
		по ул.	произошла утечка	должностных и производственных инструкций, связанных с проведением	
		Новая. 6, пос.	газа, вследствие	регламентных работ (при проведении обхода трасс надземных газопроводов и	
		Змейка,	чего в погребе	проведении обследования надземного газопровода).	
		Минераловод	жилого дома	2.2. Несанкционированная перекладка распределительного газопровода сторонними	
		ского района,	образовалась	лицами, без согласования с эксплуатирующей организацией.	
		Ставропольс	газовоздушная	2.3. Несоблюдение органом местного самоуправления охранных зон сети	
		кого края	смесь. Произошел	газораспределения.	
			взрыв.		
9	21.10.20	OOO «PH-	Взрыв	Технические причины аварии:	201431401
	15 в 7:48	Юганскнефте	парогазовоздушной	1. Повреждение изоляции греющего кабеля в результате нарушения монтажа.	
		газ». «Пункт	смеси	Организационные причины аварии:	
		подготовки и	углеводородов	1. Производство работ по монтажу устройства КДС без оформления в установленном	
		сбора нефти	внутри PBC № 2 в	порядке наряда-допуска и выполнения обязательных мероприятий по подготовке и	
		<u>№</u> 6	результате	безопасному проведению газоопасных работ.	
		Приразломно	повреждения		

Nº	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
		ГО	участка греющего		
		месторожден	кабеля с		
		ИЯ»	последующим		
			выходом		
			остаточной		
			нефтесодержащей		
			жидкости и		
			возгоранием.		
10	27.10.20	АО «Газпром	В результате	1. Технические причины аварии:	216600
	15	газораспреде	коррозионного	1.1. Механическое повреждение неустановленными лицами подземного	
		ление	повреждения	распределительного газопровода низкого давления, при производстве земляных	
		Ставрополь».	подземного	работ.	
		Подземный	распределительного	1.2. Нарушение целостности подземного распределительного газопровода низкого	
		стальной	газопровода	давления, в результате механического повреждения изоляционного покрытия	
		газопровод	низкого давления	подземного газопровода, повлекшее за собой коррозионное повреждение	
		низкого	(до 0,005 МПа)	газопровода.	
		давления, в	диаметром 76мм по	1.3. Нарушение герметичности газового оборудования варочной плиты (ПГ-4) в	
		районе дома	ул. Новой,	квартире 1 д. № 6 по ул. Новой.	
		по ул.	произошла утечка	2. Организационные причины:	
		Новая. 6, пос.	газа, вследствие	2.1. Не выполнение сотрудниками АО «Минераловодская газовая компания» своих	
		Змейка,	чего в помещении	должностных и производственных инструкций, связанных с проведением	
		Минераловод	жилого дома № 6	регламентных работ на системах газораспределения, обеспечивающих их	
		ского района,	образовалась	безаварийную работу (при проведении обхода трасс подземных газопроводов и	
		Ставропольс	газовоздушная	проведении приборного обследования подземного газопровода.	
		кого края	смесь. Произошел	2.2. Не выполнение собственником домовладения требований по обеспечению	
			взрыв.	надлежащего технического состояния внутридомового газового оборудования, не	
				заключение договора о техническом обслуживании и ремонте внутридомового	
				газового оборудования.	
11	11.11.20	OAO	При розжиге котла	1. Технические причины аварии:	197400
	15	«Теплосеть».	произошел	Несоответствие положения рисок («открыто», «закрыто») на пробковых кранах	
		Котельная №	неконтролируемый	газогорелочных устройств котла № 1 по отношению к ручкам управления кранов	
		4,	взрыв	(возможность перестановки ручек управления пробковых кранов газогорелочных	
		расположенн	газовоздушной	устройств без применения специального инструмента).	
		ая по адресу:	смеси в топке	2. Организационные причины:	
		Ставропольс	котла. В результате	Невыполнение должностными лицами и оперативным персоналом ОАО «Теплосеть»	
		кий край,	чего были	требований законодательных и нормативных правовых документов, должностных и	
		Г.	разрушены	производственных инструкции предъявляемых к эксплуатации тепловых	

№	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
		Кисловодск, Островского ул., 35	фронтальная, боковые и потолочная обмуровки котла, выбиты стекла и рамы в здании котельной № 4 ОАО «Теплосеть». Возгорания не произошло.	энергоустановок, а именно: п.2 ст 9 Федерального закона № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектах»; п. 137 ФНП «Правила безопасности сетей газораспределения и газопотребления»; п.п. 2.1, 2.2, 2.7, 3.1 производственной инструкции № 3 «По безопасному обслуживанию котельных агрегатов, трубопроводов и вспомогательного оборудования для операторов котельной»; п.п. 6.1.1, 6.2, 6.2.5, 6.5, 6.6 «Положения о производственном контроле ОАО «Теплосеть».	
12	08.11.20 15	ООО «Сургутавтог аз». «Станция газозаправоч ная (автомобильн ая)», расположенн ая по адресу: Тюменская область, ХМАО- Югра, г. Сургут, ул. Профсоюзов, 63.	В результате ремонта на линии подачи СУГ на топливораздаточну ю колонку № 1,2 технологического блока № 5 АГЗС, произошла разгерметизация технологической системы, и через негерметичные, подземные трубопроводы, в которых размещены электрокабели (управления, контроля, силовой), газ поступил в здание операторной. Произошел взрыв газовоздушной смеси с	 Технические причины аварии: 1. Не обеспечено перекрытие места выхода СУГ и его паров из резервуаров технологического блока № 5 с помощью установки заглушек при производстве газоопасных работ; 1.2. Не произведен сброс паровой фазы СУГ в атмосферу технологической линии блока № 5 через сбросную трубу; 1.3. Негерметичность вводов электрических кабелей в трубопроводы, в которые они уложены посредством кабельных уплотнительных втулок, вследствие невыполнения требований проектных решений и технико¬эксплуатационной документации технологической системы «КЗПМ» завода- изготовителя. 2. Организационные причины: 2.1. Не назначены лица, ответственные за подготовку и проведение газоопасных работ; 2.2. Не проведен инструктаж исполнителей о необходимых мерах безопасности перед началом работ; 2.3. Допуск к выполнению газоопасных работ одного рабочего; 2.4. Отсутствие, со стороны технического руководителя, координации и общего руководства при проведении газоопасных работ та АГЗС. 2.5. Выполнение работ по ремонту топливораздаточной колонки № 1,2 неаттестованным по промышленной безопасности по соответствующим областям (Б7.3., Б8.) и не являющимся работником (ремонтным персоналом) ООО «Сургутавтогаз» или специалистом специализированной организации. 	250000
13	28.04.20 16 в	ОАО «Улмуртнефт	При проведении зачистных работ на	Технические причины аварии: 1. Самопроизвольное возгорание пирофорных отпожений	Отсутству

Nº	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
	14:52	ь».	PBC-5000 № 2	Организационные причины аварии:	
		Установка	произошло	1. Нарушение технологии проведения работ;	
		предваритель	возгорание	2. Отсутствие контроля температуры внутри резервуара, при проведении зачистных	
		нои	пирофорных	раоот.	
		подготовки	отложении на		
		нефти	внутреннеи		
		т ремихинско	поверхности		
		10	резервуара с		
		месторожден	последующим		
		КИ	взрывом		
			паровоздушной		
14	10.05.20		Смеси.		01755170
14	10.05.20	Vonconori er		1. Технические причины аварии.	04733420
	10		водородсодержащег	разрушение технологического трубопровода в результате взрыва топливо-воздушной	
		ии ппъ». Блок осущини	0 газа при	смеси в технологическом контуре вследствие применения технического воздуха при	
			проведении	проведении пневматического испытания технологического осорудования,	
		водородеоде	пневматического	содержащего взрывопожароопасные вещества в технологической системе,	
		ржащеготаза	технологицеского	последуиощим за роспламенением от пирофорницу соединений железа, находящихся р	
		установки	оборудования и	последующим се воспламенением от пирофорных соединении железа, находящихся в	
			трубопроволов на	2 Организационные причины аварии:	
		риформинга	прусопроводов на	2. Организационные при ины аварии. 2.1 неуловлетворительная организация работ по провелению испытания	
		phipophinin a.	протность	технологического контура, выразившаяся в замене гидравлического (проектного)	
			произошел взрыв	способа испытания колони и трубопроволов их обвязки на пневматические	
			топливо-возлушной	испытания с использованием сжатого воздуха:	
			смеси во	2.2. неудовлетворительная организация подготовки и безопасного проведения	
			внутреннем объеме	пневматического испытания, выразившаяся в отсутствии ограждения охранной зоны	
			испытуемого	и нахождении людей в охранной зоне пневматических испытаний;	
			технологического	2.3. неудовлетворительное осуществление службой технического надзора контроля за	
			контура.	организацией и проведением испытания оборудования и трубопроводов.	
15	10.06.20	AO	При производстве	1 Технические причины аварии:	239000
	16	«Тамбовнефт	работ по зачистке	1.1. Образование электростатических зарядов на одежде из синтетических тканей	
		епродукт».	резервуара для	чистильщика при отсутствии заземления армированного шланга, проходящего через	
		Площадка	хранения бензина	люк резервуара, установки подачи воздуха.	
		нефтебазы по	работниками	1.2. Самовозгорание пирофорных соединений при контакте с воздухом.	
		хранению и	подрядной	2. Организационные причины аварии	
		перевалке	организацией	2.1. Отсутствие контроля за проведением газоопасных работ со стороны	

Nº	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
		нефти и	произошел взрыв	должностных лиц, ответственных за указанную работу.	
		тов	газовоздушной	2.2.Допуск к работе лиц, не прошедших обучение в установленном порядке.	
		100	послелующим	промышленной безопасности при провелении газоопасных работ	
			возгоранием.	npomblinien eesenaeneern npn npobedeinin rasconaenbin paceri	
16	21.06.20	000	При перекачке	1 Технические причины аварии:	Отсутству
	16	«Газэнергосе	донного остатка	Воспламенение паровоздушной смеси, образовавшейся вблизи резервуара при	ет
		ть розница».	нефтепродукта из	вскрытом люке-лазе от источника воспламенения при применении	
		Площадка	резервуара в	несанкционированной электроустановки и неисправного электрооборудования.	
		нефтебазы по	бензовоз произошел	2. Организационные причины аварии	
		хранению и	взрыв	2.1. Неудовлетворительная организация порядка подготовки и проведения	
		перевалке	газовоздушной	газоопасных работ.	
		нефти и	смеси с	2.2. Использование оборудования, не имеющего разрешительных документов.	
		нефтепродук	последующим	2.3. Неэффективность производственного контроля за соблюдением требований	
		тов	возгоранием.	промышленной безопасности при проведении газоопасных работ.	
17	08.07.20	МУП	Операторы	1. Технические причины аварии:	16746197
	16	«Теплосеть».	котельной	1. Неконтролируемый взрыв газовоздушной смеси в устье дымовой трубы котельной	
		Газифициров	услышали	в результате загазованности внутреннего пространства дымоотводящей трубы	
		анная	посторонний шум	вследствие нарушения последовательности действий операторами котельной по	
		котельная	электродвигателя	розжигу котла №3 котельной №3 г. Ликино-Дулево МУП «Геплосеть».	
		<u>N</u> <u>0</u> 3,	Hacoca Jvº11, B	2. Организационные причины:	
		расположенн	связи, с чем	2.1. Операторами котельной мули «теплосеть» Орехово- Зуевского муниципального	
		ая	приняли решение	раиона нарушены треоования производственной инструкции №11 «по эксплуатации	
		По адресу. Московская	М13 аварийно	«Теплосеть»:	
		обл г	отключили котел	7.2. В произволственной инструкции не отражено исходное состояние запорной	
		Пикино-	$N_{0}3$ при этом не	арматуры газового оборудования при проверке газового оборудования на	
		Лупево, 1-го	закрыли залвижку	серметичность перед розжигом котла:	
		Мая ул., л.	на опуске (№1)	2.3. Нарушены сроки провеления режимно-налалочных испытаний газового	
		14A	котла, дымосос	оборудования котельной №3 г. Ликино-Дулево МУП «Теплосеть».	
			котла №3 оставался		
			в работе после		
			аварийного		
			останова котла. При		
			повторном розжиге		
			котла №3		
			произошел взрыв		

№	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
			газовоздушной		
			смеси.		
18	07.09.20	000	Взрыв	Технические причины аварии:	39943
	15 в	«Нобель	газовоздушной	1. Образование газовоздушной смеси в результате попадания нефти из змеевика в	
	10:05	Ойл»	смеси внутри	внутреннюю полость путевого подогревателя;	
		Компания-	теплообменной	2. Использование оборудования для резки металла,	
		Оператор.	камеры путевого	не предусмотренного для выполнения данного вида работ.	
		Площадка	подогревателя ПП-	Организационные причины аварии:	
		насосной	1,6.	1. Нарушение технологии проведения работ;	
		станции		2. Недостаточный производственный контроль.	
		(ДНС			
		"Южно-			
		Ошская")			
19	16.11.20	МУП	В начальный	1 Технические причины аварии:	797000
	16	«Городские	момент слива	1.1 Образование взрывоопасной смеси паров углеводородов с воздухом в резервуаре	
		энергетическ	топочного мазута	с последующим воспламенением от газовой горелки.	
		ие системы».	из автоцистерны в	1.2. Наличие внешнего источника открытого огня.	
		Площадка	резервуар	1.3. Отсутствие устройств для разогрева мазута в цистерне мазутовоза.	
		хранения	произошел взрыв	2. Организационные причины аварии:	
		мазутного	газовоздушной	2.1. Отсутствие специальных сливных устройств, отдельных стояков на эстакаде	
		топлива	смеси ЛВЖ,	слива мазута.	
			содержащейся в	2.2. К операции слива нефтепродукта были допущены посторонние лица,	
			мазуте, с	необученные и не прошедших инструктаж.	
			последующим	2.3. Неудовлетворительная организация проведения газоопасных работ при сливе	
			пожаром.	нефтепродукта.	
				2.4. Отсутствие организации и осуществления производственного контроля за	
				соблюдением требований промышленной безопасности при проведении газоопасных	
				работ.	
20	28.01.20	АО «Газпром	В результате	1. Технические причины аварии:	72820
	17	газораспреде	оползневого	1.1. Нарушение целостности подводящего подземного стального газопровода	
		ление	процесса и	высокого давления II категории (0,6МПа) диаметром 76 мм, в результате наличия	
		Черкесск».	расширения	медленно текущего постоянно-переменного оползневого процесса	
		Подводящий	земляных масс при	и расширения земляных масс при воздействии низкой температуры, а так же	
		подземный	воздействии низких	сезонного промерзания грунта (0,83 м).	
		стальной	температур	2. Организационные причины:	
		газопровод	произошло	2.1. При эксплуатации наружных газопроводов эксплуатирующая организация не	

№	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
		высокого	нарушение	обеспечила мониторинг грунтовых условий (выявление пучения, просадки, оползней,	
		давления,	целостности	обрушения, эрозии грунта и иных явлений), которые могут повлиять на безопасность	
		расположенн	подводящего	эксплуатации наружных газопроводов.	
		ый в районе	подземного	2.2. Периодичность обхода трассы подземного газопровода в а. Жако установлена без	
		жилого дома	стального	учета состояния пучения, оползней, обрушения, эрозии грунта, времени года и других	
		№11, по ул.	газопровода	факторов.	
		Пушкина,	высокого давления	2.3. При проверке состояния промышленной безопасности опасных	
		аула Жако,	II категории	производственных объектов ответственными	
		Хабезского	(0,6МПа)	за организацию и осуществление производственного контроля не проверялись	
		района, КЧР	диаметром 76 мм. к	результаты контрольной проверки, проводимые мастерами служб по результатам	
			котельной ДК в	обхода наружных газопроводов.	
			районе жилого дома		
			№11, по ул.		
			Пушкина, а. Жако,		
			произошла утечка		
			газа, вследствие		
			чего по адресу а.		
			Жако, ул. М. Акова,		
			д. 6, образовалась		
			газовоздушная		
			смесь. Произошел		
			взрыв.		

Перечень аварий, связанных с взрывами облаков ТВС на ОПО, по данным публикуемым в информационных бюллетенях Ростехнадзора, в период с 2002 по 2017 год

№	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
1	27.03.20 17	Котельная (входит в состав ОПО «Система теплоснабжения г. Уфа», эксплуатируемог о Муниципальным унитарным предприятием «Уфимские инженерные сети» городского округа г. Уфа Республики Башкортостан)	В результате нарушения технологического процесса розжига котла КВГМ 20- 150 произошел взрыв газовоздушной смеси в топке котла. В результате аварии произошло обрушение обмуровки котла, в верхней части оголилась экранная система, частично повреждены оконные рамы и остекление, обшивка фасада, разрушений трубной системы не обнаружено.	Неконтролируемый взрыв газовоздушной смеси, накопившейся в топке котла, по причине нарушения технологического процесса пуска котла; недостаточная подготовка оперативного персонала к действиям по регулированию нагрузки на котле, действиям по растопке котла, приведшие к аварии, связанной с повреждением обмуровки котла; допущено отступление от требований правил при эксплуатации сетей газораспределения и газопотребления, эксплуатация котла осуществлялась с нарушением требований производственных инструкций; недостаточный уровень организации и осуществления производственного контроля за состоянием промышленной безопасности на ОПО; инструкция по эксплуатации котла КВГМ-20 не соответствует требованиям промышленной безопасности, в части выдачи разрешения на пуск котла (разрешение на растопку котла выдается начальником смены ЦДС МУП УИС не назначенным распорядительным документом организации в качестве специалиста, ответственного за исправное состояние и безопасную эксплуатацию)	230022
2	25.01.20	ОАО «Саханефтегазсб ыт». Резервуар РВС-3000.	Через 9 мин после начала откачки остатков топлива произошло его возгорание в резервуаре с последующим взрывом. В результате взрыва и пожара резервуар полностью разрушился.	Расследование установило, что технической причиной аварии явился взрыв газовоздушной смеси топлива с воздухом вследствие накопления потенциала статического электричества в процессе откачки нефтепродукта при отсутствии надёжного заземления бензовоза. Работы проводились на месте, не оборудованном специальными разъёмами для заземлителя автоцистерны. Организационными причинами аварии явились: нарушение порядка проведения операций по сливу остатка из резервуара, отсутствие контроля со стороны должностных лиц за производством работ повышенной опасности.	Не определе н
3	02.06.20	ООО «ЛУКОЙЛ- Нижневолжскне фтепродукт».	При заправке автоцистерны на базе КАМАЗ дизельным топливом у стояка № 1	При расследовании причины аварии комиссией было установлено, что в конструкцию транспортного средства были внесены изменения в части установки штуцера с краном в переднее днище цистерны. Комиссия на основании экспертного заключения установила технические и	Не определе н

№	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
4	23.04.20	Площадке налива автомобильных цистерн на Сулинской нефтебазе. ОАО «Тольяттикаучук ». Технологически й трубопровод «Линия изобутана-сырца в отделении И– 3», который находится на 8-м ярусе эстакады технологических трубопроводов на высоте 8 м от поверхности земли. Эстакада связывает отделение Д-1а с	произошёл взрыв паровоздушной смеси с после- дующим пожаром. Произошёл объёмный взрыв газовоздушной смеси с последующим пожаром. В результате взрыва разрушен находившийся в зоне взрыва распределительный пункт ввода линии электропередачи 110 кВ и нарушено энергообеспечение предприятия.	организационные причины аварии. Взрыв дизельного топлива произошёл по причине утечки топлива из переднего отсека цистерны из крана или шланга, подключенного к штуцеру с краном, проложенного через корпус электрических штепсельных розеток с нарушением герметичности корпуса с последующим замыканием и возникновением искры. Отсутствие заливной трубы в цистерне, не позволяющее осуществлять налив топлива под слой жидкости и без разбрызгивания. При монтаже трубопровода был использован нестандартный гнутый отвод, при изготовлении которого допущено су- щественное отклонение от округлости, что вызвало высокие напряжения в металле, способствующие ускорению процесса коррозии по нижней об- разующей отвода.	(руб.) Не определе н
		основнои площадкой предприятия			
5	28.05.20	ОАО	От буферной ёмкости	Технические причины аварии:	He
	10	«Орскнефтеоргс интез». Компрессорная технологической установки	цилиндра первого ряда компрессора ПК-2 оторвался патрубок, соединяющий ёмкости с продувочным	 взрыв газовоздушной смеси, предположительно, мог быть вызван следующими факторами: наличие пирофорных соединений в оборудовании; искрообразование в результате ударов оторвавшегося трубопровода о корпус компрессора; нагретые поверхности технологического оборудования; 	определе н
		гидроочистки Л- 24-Т6.	трубопроводом. Звуки вырвавшегося из буферной	2. разрушение патрубка буферной ёмкости из-за усталости материала возле зоны сплавления сварного соединения патрубка с буферной ёмкостью	

Nº	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
			ёмкости водород- содержащего газа и удара продувочного трубопровода о корпус цилиндра компрессора были слышны в операторной. В результате выделения водосодержащего газа в помещение компрессорной образовалась взрывоопасная смесь его с воздухом. Через 10–20 с после отрыва патрубка в помещении компрессорной произошёл взрыв	 вследствие воздействия длительных (более 60 тыс. ч) вибрационных нагрузок, возникающих при работе компрессора; а. использование на заводе-изготовителе для изготовления буферной ёмкости патрубка, выполненного из материала, применяемого для неответственных деталей и не соответствовавшего сведениям, указанным в паспорте буферной ёмкости; отсутствие экспертизы промышленной безопасности буферных ёмкостей, входящих в состав компрессорных установок, отработавших нормативный срок эксплуатации, с целью определить их техническое состояние, остаточный ресурс и возможность продлить срок безопасной эксплуатации технических устройств. Организационные причины: 1. недостаточный производственный контроль в ОАО «Орскнефтеоргсинтез» 	
6	02.07.20	ОАО «Салаватнефтео ргсинтез». Наружная эстакада межцеховых коммуникаций, в составе 50 трубопроводов завода «Мономер».	газовоздушной смеси Первичное разрушение произошло на трубопроводе пропилена и было спровоцировано разрушением его участка в месте утонения под опорой вследствие атмосферной коррозии. Последовавшее за этим быстрое испарение среды привело к образованию взрывоопасной газовоздушной смеси, взрыву и формированию ударной волны.	Разрушение двух трубопроводов: пропилена (диа- метром 150 мм) и этилена (диаметром 300 мм). Из-за погодных условий (высокая температура наружного воздуха) и длительного простоя (с 10.06.10 по 02.07.10), при отсутствии теплоизоляции трубопровода, не предусмотренной проектом, конструктивных особенностей прокладки данного участка трубопровода пропилена на 1,1 м и 1,2 м выше смежных участков, пропилен в аварийном трубопроводе нагрелся и при нагревании тела трубы выше 30° С начал испаряться, переходя в паровую фазу.	Не определе н
7	09.02.20 07	Корпус регулятора РДУК 2В 200/105 со стороны	Произошел взрыв газовоздушной среды (предположительно, от искрения элементов	 разрушение регулятора давления РДУК 2В 200/105, вызвавшее разгерметизацию технологической системы и залповое поступление природного газа в помещение регуляторов; применение в технологической схеме регулирования давления природного газа регулятора РДУК 2В 200/105, корпус которого выполнен из серого 	Не определе н

Nº	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
		коллектора с давлением 1,2 МПа на главном газорегуляторно м пункте (ГГРП) кислородно- газового цеха ОАО «Амурсталь»	электротехнических устройств станции управления), в результате которого дверь станции управления, отброшенная на 18 м, пробила отверстие в металлическом ограждении площадки ГГРП. Ударная волна разрушила капитальную разделительную стену, завал обломков которой внутрь помещения регуляторов привел к воспламенению находившейся там газовоздушной смеси и горению природного газа, поступавшего из разрушенного регулятора.	 чугуна СЧ 30, согласно паспорту разрешенного к применению на ГГРП для снижения и поддержания выходного давления газа; отсутствие в производственном помещении регуляторов естественной вентиляции (перекрыта на зимний период); нарушение герметичности разделительной стены, через неплотности которой природный газ проник в помещение станции управления, оснащенной электротехническими устройствами не во взрывозащищенном исполнении; отсутствие технических решений: по устройству аварийной вытяжной вентиляции с блокировкой ее автоматического включения от газоанализатора до взрывных концентраций при полном раскрытии технологической схемы; по оснащению ГГРП противоаварийными блокировками для автоматического закрытия запорной арматуры в газопроводе подачи природного газа в помещение регуляторов при раскрытии технологической схемы; недостаточный контроль со стороны технических служб предприятия, службы ПК за техническим состоянием здания ГГРП. 	
8	25.07.20 05	Газифицированн ая производственна я котельная на территории ОАО «Молоко» с четырьмя паровыми котлами типа ДЕ-10/14ГМ и ДКВР-6,5/13 в г. Ржеве	Взрыв газовоздушной смеси в топке при розжиге котла ДЕ-10/14 в ОАО «Молоко» (г. Ржев Тверской обл.).	 Технические и организационные причины аварии: загазована топка котла из-за открытой задвижки, установленной на газопроводе перед горелкой, во время подготовки котла к растопке (газ поступал в топку с момента открытия ПЗК до внесения в нее запальника) (нарушение оператором п. 2.1, 2.2.9, 2.7.2 Производственной инструкции по эксплуатации котлоагрегата ДЕ-10/14ГМ, утвержденной 29.04.96); не проверены: закрытие газовой задвижки перед горелкой и герметичность затвора этой задвижки (не выполнена контрольная опрессовка); растопка котла ручным переносным запальником по причине неисправности системы полуавтоматического розжига и без распоряжения начальника котельной или замещающего его лица. 	Не определе н
9	31.07.20 05	Котельная № 10/3 ОАО «Кировские коммунальные системы» (г.	Взрыв газовоздушной смеси в топке при повторном розжиге котла ДЕ-10/14 в котельной № 10/3. Факел запальника	На основании изучения технической документации, осмотра места аварии, опроса очевидцев и должностных лиц комиссия сделала вывод, что причиной аварии явились грубые нарушения производственной инструкции оператором котельной при повторной попытке растопить газовый котел в условиях недостаточной вентиляции топки.	Не определе н

Nº	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
		Киров, пос. Лянгасово).	оторвался, и в момент закрытия газовой задвижки слесарем по обслуживанию и ремонту газового оборудования котельной газовоздушная смесь в топке котла воспламенилась.		
10	26.09.20 05	Котел ОАО «НПО «Сатурн» (г. Рыбинск Ярославской обл.)	Взрыв газовоздушной смеси в топке котла при его повторном розжиге. После вентиляции топки котла в течение 4 мин оператор приступили к повторному розжигу. При внесении начальником котельной ручного запальника в топку в 15 ч 55 мин произошел взрыв газа.	 Техническая причина: неплотное закрытие рабочей задвижки перед правой горелкой при растопке котла вследствие западания затвора; Организационные причины: пуск котла после длительной остановки без предварительной контрольной опрессовки газопровода; невыполнение начальником и оператором котельной требований раздела «Растопка котла на газообразном топливе» производственной инструкции для машинистов парокотельных установок ДКВР-10/13, работающих на газовом и жидком топливе; отсутствие в производственной инструкции № 10 для машинистов парокотельных установок ДКВР-10/13, работающих на газовом и жидком топливе, полного описания технологической последовательности порядка растопки котла. 	Не определе н
11	28.02.20	Котел типа Е 1,6-0,9 в г. Ставрополе на предприятии ОАО «Ставропольпро ектстрой»	Взрыв газовоздушной смеси в топке котла Е 1,6- 0,9 произошел также в ОАО «Завод Исеть» (г. Каменск-Уральский Свердловской обл.). В результате разрушена обмуровка, и один работник травмирован фронтальной частью котла. Эти случаи указывают на несовершенство конструкции кот- ла Е 1,6-0,9 производства	Перед розжигом в течение длительного времени не была закрыта задвижка на опуске к котлу; заклиненный клапан защитно-запального устройства типа ВН (изготовитель СП «Термо- Брест», Республика Беларусь) находился в открытом нерабочем состоянии; время вентиляции топки сокращено. При этом схемой газопроводов не предусмотрена проверка герметичности клапанов. Сроки технического обслуживания автоматики котлов не соблюдались.	Не определе н

Nº	Дата	Место	Описание	Причины	Ущерб (руб.)
			ПО «Красный котельщик» (г. Таганрог), не обеспечивающей безопасность персонала при авариях.		
12	05.01.20 04	Котел на МУП «Уфимское предприятие тепловых сетей» (Башкирское управление) при растопке котла ТВГ-8М.	Взрыв газовоздушной смеси произошел при открытии задвижки на горелку № 1. В это время запальные горелки № 1 и 2 были в работе, а задвижка перед горелкой № 3 не была закрыта полностью по причине неисправности. Контрольную опрессовку запорных устройств перед розжигом операторы не произвели.	Техническая причина аварии – неисправность рабочей задвижки перед горелкой № 3. Организационные причины – отсутствие определенного в производственной инструкции порядка проверки перед розжигом запорных устройств на герметичность и неудовлетворительная организация производственного контроля.	Не определе н
13	25.01.20 02	Товарно- сырьевая база ОАО «Орскнефтеоргс интез» - хлопок внутри резервуара объемом 5000 м ³	При подаче воды в резервуар была прекращена подача пара. Это привело к образованию взрывоопасной паровоздушной среды и ее последующему взрыву внутри резервуара. Воспламенение произошло от искры, возникшей в результате нарушения порядка вскрытия люков на разогретом резервуаре.	Организационные причины аварии – нарушение порядка подготовки резервуара к ремонту, а именно отсутствие распоряжений, определяющих: - вывод резервуара из эксплуатации и подготовку к ремонту; - ответственных лиц и исполнителей работ; - разработку мероприятий по безопасной подготовке к ремонту и последовательности их выполнения.	Не определе н