

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ**

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

На правах рукописи



Швырков Александр Сергеевич

**НОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
К ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ОГРАЖДЕНИЙ
РЕЗЕРВУАРОВ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ»**

Специальность: 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»
(нефтегазовая отрасль, технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Горячев Станислав Анатольевич

Москва – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ РАЗРУШЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ И НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ».....	12
1.1 Анализ статистических данных о разрушениях резервуаров с нефтью и нефтепродуктами на объектах нефтегазовой отрасли в России.....	12
1.2 Характерные примеры разрушений резервуаров с нефтью и нефтепродуктами на производственных объектах за рубежом.....	27
1.3 Анализ нормативных требований в области промышленной безопасности для проектирования резервуаров типа «стакан в стакане».....	31
1.4 Цель и задачи исследования.....	45
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ.....	46
2.1 Анализ теоретических и экспериментальных исследований влияния потока жидкости при разрушении резервуара на ограждения различной конфигурации.....	46
2.2 Критерии подобия и условия моделирования гидравлических явлений для создания лабораторного стенда.....	67
2.2.1 Оценка параметров потока при разрушении натурального резервуара номинальным объемом 700 м ³	70
2.2.2 Оценка параметров потока при численном моделировании процесса разрушения натурального резервуара номинальным объемом 30000 м ³	72
2.3 Разработка лабораторного стенда для определения геометрических параметров ограждений резервуаров типа «стакан в стакане».....	75
2.3.1 Оценка параметров потока при разрушении резервуара в масштабе 1:30 к натурному резервуару номинальным объемом 700 м ³	78
2.3.2 Оценка параметров потока при разрушении резервуара в масштабе 1:130 к натурному резервуару номинальным объемом 30000 м ³	81

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ».....	90
3.1 Обоснование масштабных коэффициентов для модельных резервуаров и защитных стенок.....	90
3.2 Определение минимальной высоты защитной стенки для локализации потока жидкости при разрушении резервуара.....	92
3.3 Определение доли перелившейся через защитную стенку жидкости при оптимизации (снижении) ее высоты.....	96
3.4 Определение геометрических параметров дополнительного ограждения для резервуара с защитной стенкой.....	101
ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ С ЗАЩИТНОЙ СТЕНКОЙ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ».....	110
4.1 Общие положения.....	110
4.2 Метод определения геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения резервуаров типа «стакан в стакане».....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛИ ПЕРЕЛИВШЕЙСЯ ЧЕРЕЗ ЗАЩИТНУЮ СТЕНКУ ЖИДКОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ ВЫСОТЫ И РАССТОЯНИЯ ДО РЕЗЕРВУАРА..	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Для хранения нефти и нефтепродуктов на объектах нефтегазовой отрасли (НГО) как в России, так и за рубежом, наибольшее распространение получили резервуары вертикальные стальные цилиндрические (РВС), что обусловлено, прежде всего, наименьшим расходом металла на изготовление таких форм РВС по сравнению с расходом на изготовление резервуаров другой формы [1], [2]. Однако, несмотря на более чем столетний опыт проектирования, строительства и эксплуатации РВС, включая разработку и внедрение систем противопожарной защиты, время от времени на них происходят деструктивные события, связанные с авариями, взрывами и пожарами. При этом статистика отмечает, что особенно опасная обстановка возникала при полных разрушениях РВС [3]–[9]. Образующаяся в этом случае часто горящая волна нефтепродукта разрушала нормативные ограждения в виде земляных обвалований или ограждающих стен и, разливаясь на значительной территории, неоднократно приводила к каскадному, а иногда и к катастрофическому развитию аварии. Так, из зафиксированных за период с 1951 по 2010 гг. 150 случаев разрушений РВС на объектах НГО СССР, СНГ и России более 50 % характеризовались как крупномасштабные аварии, 32 из которых привели к гибели 126 человек, а 40 % аварий сопровождались каскадным развитием и травмами людей [9]. Важно отметить, что аналогичные аварии РВС неоднократно происходили и за рубежом [10]–[28], при этом общая тенденция аварий РВС сохраняется и сегодня [29]–[40].

К одной из основных причин каскадного развития аварий в резервуарных парках следует отнести невозможность удержания потока жидкости, образующегося при разрушении РВС, нормативными ограждениями, которые рассчитываются на гидростатическое давление разлившейся жидкости [9], [41]. Поэтому, наряду с актуальными вопросами обеспечения надежности РВС, не менее актуальны и разработки технических решений, направленных на гарантированное ограничение возможного разлива жидкости при аварии РВС.

Одним из перспективных конструктивных решений по ограничению возможного пожара разлива нефти или нефтепродукта в резервуарных парках является сооружение РВС с защитной стенкой типа «стакан в стакане» (далее РВСЗС). Такие резервуары состоят из внутреннего (основного) РВС для хранения нефти или нефтепродукта, и наружного резервуара (защитной стенки) для удержания продукта в случае нарушения герметичности внутреннего РВС [42].

В настоящее время требования к проектированию, монтажу и эксплуатации РВСЗС предъявляются в трех одновременно действующих нормативных документах в области обеспечения промышленной безопасности:

- ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия» (далее ГОСТ) [42];

- СТО-СА-03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» с изменениями и дополнениями от 2011 г. (далее СТО) [43], [44];

- «Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» (далее Руководство) [45].

Анализ требований, содержащихся в этих нормативных документах, показал, что между ними имеется ряд существенных несоответствий, непосредственно влияющих на обеспечение безопасности РВСЗС. В частности, во всех указанных документах отмечается, что высота защитной стенки должна составлять не менее 80 % от высоты стенки основного РВС при ширине межстенного пространства не менее 1,8 м, при этом не устанавливаются требования к максимальной ширине этого пространства, непосредственно влияющего на высоту защитной стенки.

Помимо этого, ГОСТ и СТО не предусматривают обустройство монолитной железобетонной стенки, рассчитанной на гидродинамическое воздействие волны при полном разрушении основного резервуара, а рекомендуют обычное ограждение для гидростатического удержания и отвода растекающейся жидкости, при этом в Руководстве отсутствуют требования к обустройству дополнительных ограждений РВСЗС.

Необходимо также отметить, что в соответствии с требованиями выше указанных документов установка РВСЗС в резервуарных парках, их взаимное расположение и обустройство системами противопожарной защиты должны соответствовать требованиям СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности» [41]. Однако в этом своде правил указано, что содержащиеся в нем требования не распространяются на склады нефти и нефтепродуктов с применением РВСЗС, при этом иные нормативные документы, регламентирующие требования пожарной безопасности к таким типам резервуаров, в настоящее время отсутствуют.

Таким образом, выявленные несоответствия в требованиях нормативных документов в области обеспечения промышленной безопасности, а также отсутствие нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности к РВСЗС, обуславливают актуальность проведения исследований, направленных на обеспечение пожарной безопасности таких типов резервуаров, и, в первую очередь, на нормирование требований к геометрическим параметрам защитной стенки, разработке которых и посвящена настоящая работа [46], [47].

Степень разработанности темы исследования.

Непосредственно разработке РВСЗС посвящены работы О.В. Дидковского, Э.Я. Еленицкого, А.А. Катанова, С.Г. Иванцова, Б.Ф. Беляева, Х.И. Ханухова, И.С. Ломкова и др. [48]–[57]. Важно отметить, что результаты этих работ использованы при разработке выше указанных нормативов [42]–[45], а также документации на проектирование и строительство РВСЗС различного номинального объема в резервуарных парках ОАО РПК-Высоцк «ЛУКОЙЛ-П» (Ленинградская область), ООО «РН-Туапсинский НПЗ» (Краснодарский край), ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез» (Ленинградская область), ОАО «Мозырский НПЗ» (Республика Беларусь) и др.

Анализ этих работ показал, что в них недостаточно уделено внимания вопросам обоснования геометрических параметров ограждений РВСЗС, при этом какие-либо результаты экспериментальных исследований в этой области в литературных источниках отсутствуют.

Вопросам разработки ограждений для РВС, в том числе определения их геометрических и прочностных характеристик, а также оценки доли жидкости, которая может через них перелиться при разрушении РВС, посвящены работы А.Ф. Притулы, З.О. Ляндреса, Д.М. Гордиенко, Ю.Н. Шебеко, И.А. Болодьяна, И.М. Смолина, Л.Н. Лебедевой, М.В. Лурье, С.А. Горячева, В.В. Воробьева, С.В. Батманова, А.А. Богача, Н.Р. Greenspane, R.E. Young и др. [9], [58]–[66], [87].

Однако результаты этих исследований невозможно распространить на рассматриваемые РВСЗС, что обусловлено конструктивными особенностями обустройства для них ограждений, сочетающих в себе систему, состоящую из защитной стенки и дополнительного ограждения в виде земляного обвалования или ограждающей стены, что и вызывает необходимость продолжения исследований в этой области. Важно также отметить, что в последнее время, в литературных источниках стали появляться статьи о подходах к проблеме тушения РВСЗС, в частности, работы Ф.В. Демехина, А.А. Таранцева, А.А. Цоя [67], [68].

Таким образом, **целью** диссертационной работы являлась разработка рекомендаций по определению геометрических параметров ограждений РВСЗС, необходимых для полной локализации возможного разлива нефти или нефтепродукта при разрушении основного (внутреннего) резервуара.

Для достижения цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

- проведение анализа нормативных требований к геометрическим параметрам РВСЗС для обеспечения пожарной и промышленной безопасности при полном разрушении внутреннего (основного) резервуара;
- разработка лабораторного стенда и методик проведения экспериментов по определению геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения;
- экспериментальное нахождение минимальной высоты защитной стенки в зависимости от ее расстояния до основного резервуара, обеспечивающей полную локализацию потока жидкости при разрушении основного резервуара; получение эмпирической зависимости для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку, от ее высоты; экспериментальное определение геометрических параметров дополнительного ограждения;

- разработка рекомендаций по определению геометрических параметров ограждений РВСЗС, необходимых для предотвращения каскадного развития аварии в резервуарном парке.

Объектом исследования являлись ограждения РВСЗС в виде защитной стенки (основное) и вертикальной ограждающей стены или земляного обвалования (дополнительное). **Предметом исследования** являлась минимальная высота ограждений в зависимости от удаленности до стенки основного резервуара, необходимая для полной локализации потока жидкости при его разрушении.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлено отсутствие научно обоснованных геометрических параметров РВСЗС, обеспечивающих пожарную и промышленную безопасность при полном разрушении внутреннего (основного) резервуара.

2. Разработан лабораторный стенд и методики проведения экспериментов по определению геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения.

3. Установлена минимальная высота защитной стенки РВСЗС в зависимости от ее удаленности до стенки основного резервуара, необходимая для полной локализации потока нефти или нефтепродукта при возможном разрушении основного резервуара.

4. Эмпирически определена доля жидкости, перелившейся через защитную стенку при ее возможном снижении до минимальной высоты, необходимой для гидростатического удержания продукта, в зависимости от расстояния до стенки основного резервуара.

5. Найдены геометрические параметры дополнительной ограждающей вертикальной стены, необходимой для полной локализации частично перелившегося продукта.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в использовании полученных экспериментальных данных для определения минимальной высоты защитной стенки РВСЗС, необходимой для полной локализации потока нефти или нефтепродукта при возможном разрушении основного резервуара;

- в использовании полученной эмпирической зависимости для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку при разрушении основного резервуара, с целью нахождения оптимальной высоты защитной стенки РВСЗС и дополнительной ограждающей стены;

- в разработке рекомендаций по определению геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения, обеспечивающих пожарную и промышленную безопасность при эксплуатации РВСЗС;

- в использовании в резервуарных парках с РВСЗС полученных данных при разработке планов локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, а также планов пожаротушения.

Разработанные рекомендации могут являться основой для создания нормативного документа по пожарной безопасности объектов защиты с эксплуатацией РВСЗС в части предотвращения каскадного развития аварии при разрушении основного резервуара с нефтью или нефтепродуктом.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы использованы методы теории подобия и математического моделирования, физического эксперимента, наблюдения, сравнения, нахождения эмпирической зависимости на основе математической обработки экспериментальных данных, описания, обобщения. Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные источники, нормативные документы, материалы разборов аварий и пожаров РВС на объектах НГО, а также научно-исследовательских работ в области разработки ограждений для РВС.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа статистики разрушений РВС и нормативных требований для проектирования РВСЗС;

- описание лабораторного стенда и методик проведения экспериментов для оценки высоты и скорости потока жидкости при разрушении резервуара, а также его воздействия на защитную стенку и дополнительное ограждение;

- результаты экспериментальных исследований геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения РВСЗС;

- эмпирическая зависимость для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку при разрушении основного резервуара;

- основные положения рекомендаций по определению геометрических параметров ограждений РВСЗС, необходимых для предотвращения каскадного развития аварии в резервуарном парке объекта защиты.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается обоснованностью выбора критериев подобия и соблюдением условий моделирования гидравлических явлений при разработке лабораторного стенда; удовлетворительной сходимостью параметров потоков, полученных при разрушении модельного резервуара на лабораторном стенде и ранее выполненном натурном эксперименте по разрушению РВС-700 м³ с водой; использованием поверенных измерительных приборов, апробированных методик измерения и обработки экспериментальных данных; внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с данными других исследователей.

Материалы диссертации реализованы при разработке:

- проекта приложения В «Метод определения геометрических параметров ограждений РВСЗС» в национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53324-2009 «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности»;

- учебника для бакалавров, лекции, практического и семинарского занятий по дисциплине пожарная безопасность технологических процессов в Академии ГПС МЧС России.

Основные результаты работы доложены на: 25-ой и 27-ой Международных научн.-технич. конф.: «Системы безопасности – 2016, 2018» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016, 2018); 6-ой Международной научн.-практич. конф.: «Проблемы техносферной безопасности» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017); IV и VI Всероссийских научн.-практич. конф.: «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017, 2019); Международной научн.-практич. конф.: «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (Иваново, Ивановская пожарно-

спасательная академия ГПС МЧС России, 2018); Международной научн.-практич. конф.: «Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018); I Международной научн.-практич. конф.: «Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли» (Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Содержание работы изложено на 141 странице машинописного текста, включает в себя 22 таблицы, 56 рисунков, список литературы из 117 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ РАЗРУШЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ И НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ»

1.1 Анализ статистических данных о разрушениях резервуаров с нефтью и нефтепродуктами на объектах нефтегазовой отрасли в России

Наиболее полные данные о разрушениях РВС с нефтью и нефтепродуктами, произошедших на объектах НГО в России, представлены в работах [3]–[9]. Авторами этих работ отмечается, что основными источниками информации о разрушениях РВС служили карточки учета аварий и пожаров, поступающие в единую государственную систему статистического учета пожаров во ВНИИПО МЧС России, а также использовались: информация управлений МЧС России, отраслевые материалы о пожарах и авариях, экспертные заключения по расследованию аварий и пожаров в резервуарных парках, опубликованные статьи, монографии. Так, в работе [9] приводятся и анализируются статистические данные о 150 случаях полных разрушений РВС, произошедших на объектах НГО СССР, СНГ и РФ за период с 1951 по 2010 гг. (рисунок 1.1).

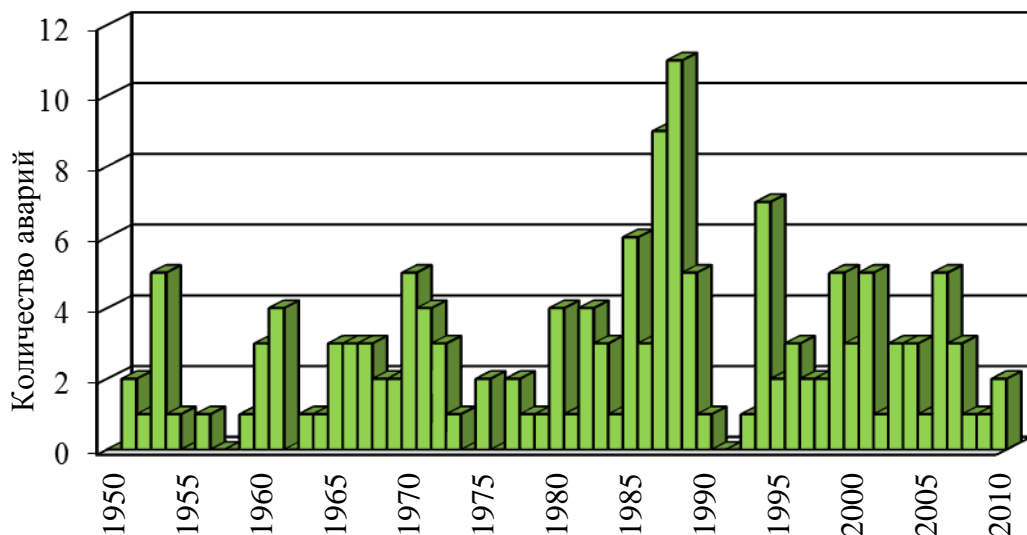


Рисунок 1.1 – Распределение разрушений РВС по годам

Также в работе [9] указывается, что к основным условиям, способствующим разрушению резервуаров, относятся: значительный износ находящихся в эксплуатации резервуаров, неравномерные проседания оснований, сложный характер нагружения конструкции, отсутствие достаточного контроля сплошности сварных соединений в зоне уторного шва, отступления от проектов, нарушения режимов эксплуатации, коррозия металла и др.

Рассмотрение причин разрушений РВС, отмеченных в работах [3]–[9], [21], [69]–[71], показало, что в большинстве случаев они являются следствием дефектов сварных соединений в сочетании с использованием некачественной стали с пониженными механическими свойствами (рисунок 1.2 [9]).

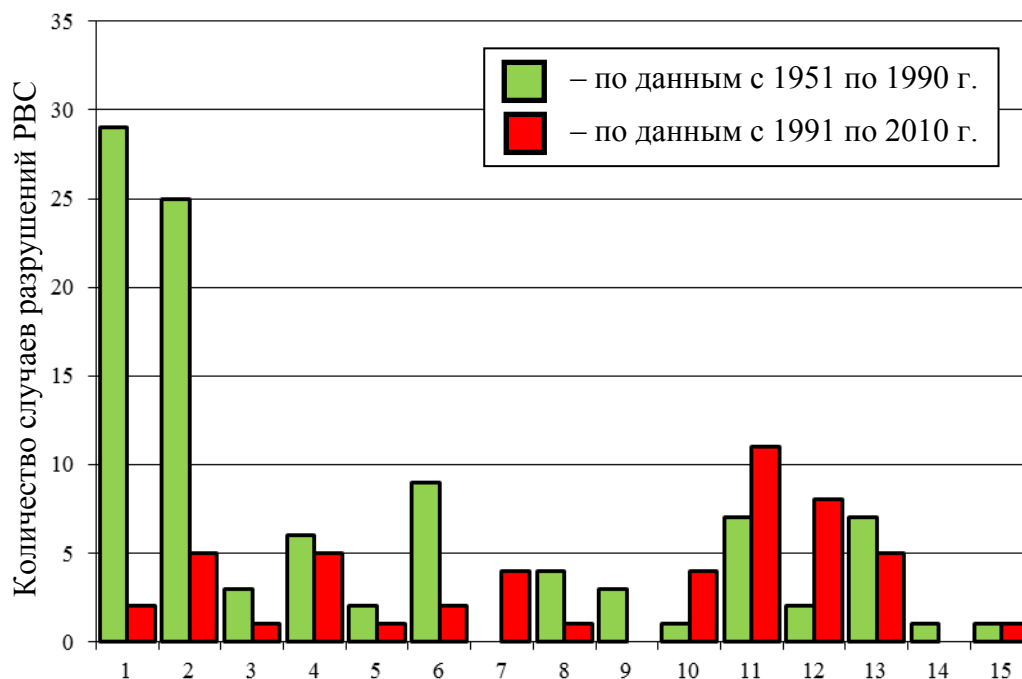


Рисунок 1.2 – Распределение причин разрушений РВС:

1 – хрупкое разрушение металла; 2 – дефекты сварочно-монтажных работ; 3 – неравномерная осадка основания РВС; 4 – воздействие высоких температур на пожаре; 5 – землетрясение; 6 – коррозионный износ; 7 – диверсионный акт; 8 – внешнее воздействие взрывной волны; 9 – внешнее механическое воздействие; 10 – взрыв внутри РВС от самовозгорания пиррофорных отложений; 11 – взрыв внутри РВС от статического электричества (при замере уровня жидкости); 12 – взрыв внутри РВС при производстве сварочных работ; 13 – упущения и просчеты при проектировании, строительстве, монтаже и др.; 14 – взрыв внутри РВС от удара молнии; 15 – взрыв внутри РВС при распространении огня по газоравнительной системе

При этом хрупкие трещины, приводящие к полному разрушению РВС, возникали наиболее часто в дефектах сварочных монтажных швов, что обусловлено склонностью некоторых марок стали к хрупкому разрушению при низких температурах (СтЗкп, СтЗпс, 09Г2С и т. п.). Однако, как показал опыт эксплуатации резервуарных емкостей, качественные стали также оказываются неустойчивыми к низким температурам. Так, например, в работах [8] и [9] приводится случай разрушения РВС-5000 м³ с газовым конденсатом в г. Дудинка при температуре минус 39 °С (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Общий вид разрушенного РВС-5000 м³

Причиной разрушения резервуара послужило воздействие ударной волны, образовавшейся вследствие взрыва паровоздушной смеси в помещении насосной станции, расположенной в 50 м от резервуара (рисунок 1.4). Разрушение корпуса резервуара произошло по сварному шву со стороны насосной. Большая часть обечайки резервуара оторвана от днища и сдвинута на гребень обвалования в сторону товарного парка, а полностью оторванная кровля резервуара смещена на 23 м от днища на земляное обвалование в сторону здания насосной станции (см. рисунок 1.3).

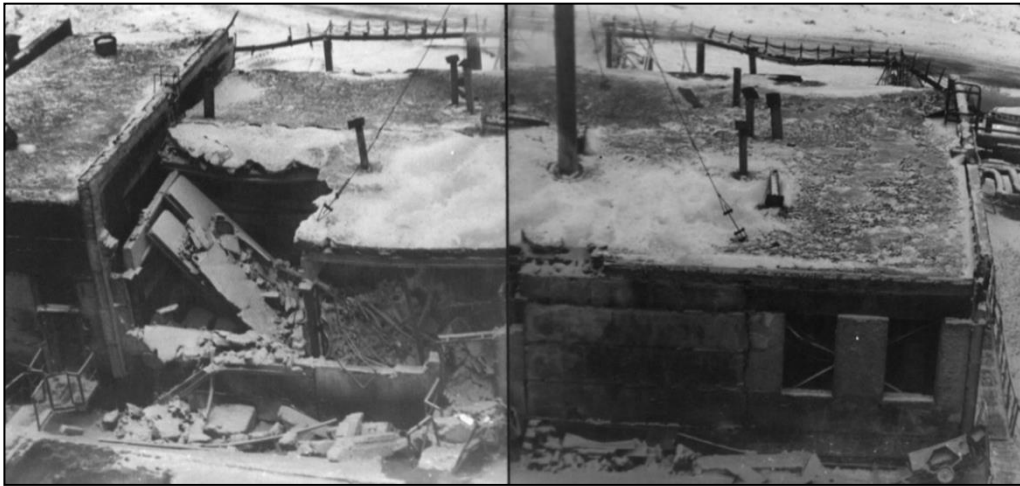


Рисунок 1.4 – Фрагмент разрушенного здания насосной

Сформировавшийся при аварии резервуара поток горящего газового конденсата перелился через обвалование, разрушив его вершину на глубину до 0,4 м, и разлился по уклону в сторону товарного парка, зданий манифольдной и насосной станции, и далее по всей территории производственного объекта с выходом за его границы (рисунок 1.5).

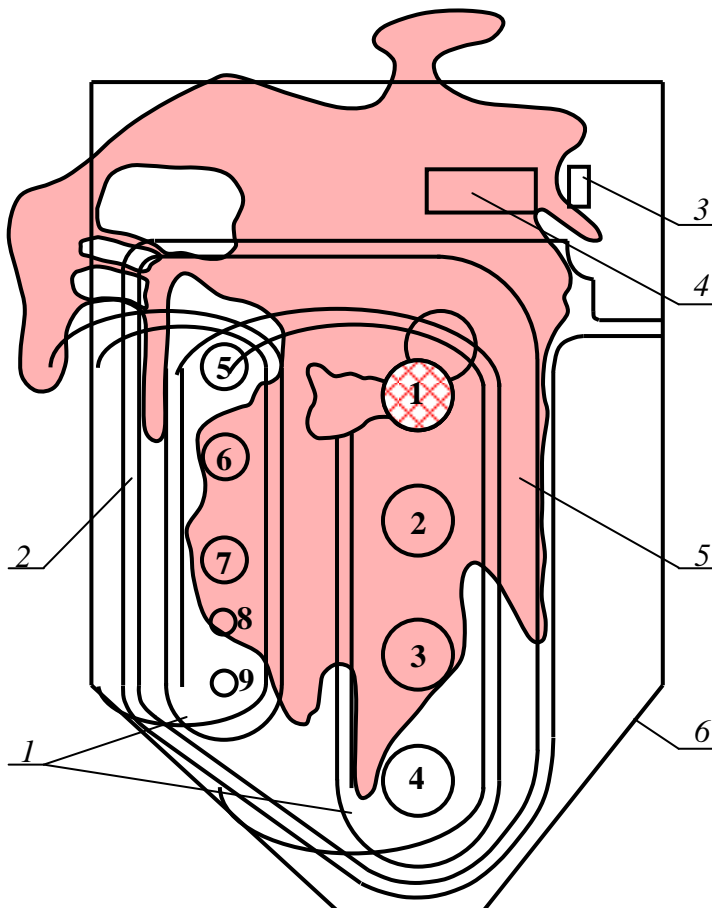


Рисунок 1.5 – Последствия разрушения РВС-5000 м³:
 1 – земляное обвалование, высотой 1,5 м; 2 – гравийная дорога; 3 – здание насосной дождевых и канализационных стоков; 4 – здание насосной перекачивающей станции; 5 – площадь пожара разлива газового конденсата, равная 30000 м²; 6 – ограждение территории нефтебазы; 1 – аварийный резервуар типа РВС-5000 м³; 2-4 – резервуары типа РВС-5000 м³; 5-7 – резервуары типа РВС-1000 м³; 8, 9 – резервуары типа РВС-400 м³

При тушении пожара (рисунок 1.6), продолжавшегося 28 ч, выполнялось укрепление обвалования со стороны группы товарных резервуаров, а также засыпка песком части территории объекта для предотвращения повторного воспламенения разлившегося газового конденсата (рисунок 1.7).



Рисунок 1.6 – Фрагмент каскадного развития пожара в резервуарном парке



Рисунок 1.7 – Фрагмент засыпки песком территории объекта

В ликвидации аварии и пожара участвовало более 200 человек, при этом два человека погибли.

Продолжая анализ последствий 150 случаев разрушений РВС [9], важно также отметить, что почти 50 % всех аварий характеризовались как крупномасштабные, 32 из которых привели к гибели 126 человек, при этом каждый третий случай разрушений РВС сопровождался каскадным развитием аварии. Почти все разрушения РВС произошли в резервуарных парках с нормативными земляными обвалованиями или ограждающими стенами. Однако, как показывает статистика, такие ограждения во всех случаях не выполнили своего функционального назначения. Волна по направлению своего движения либо разрушала стену или обвалование, выходя за границы территории объекта, что неоднократно приводило к катастрофическим последствиям с большим материальным ущербом, либо промывала и перехлестывала через них, разливаясь по территории объекта. При этом наиболее негативные последствия отмечались при авариях на объектах, расположенных непосредственно в населенных пунктах. Так, в 14 % случаев аварий возникали чрезвычайные ситуации, при которых производилась эвакуация населения с привлечением значительного количества личного состава пожарной охраны, специальной и другой техники (рисунок 1.8).

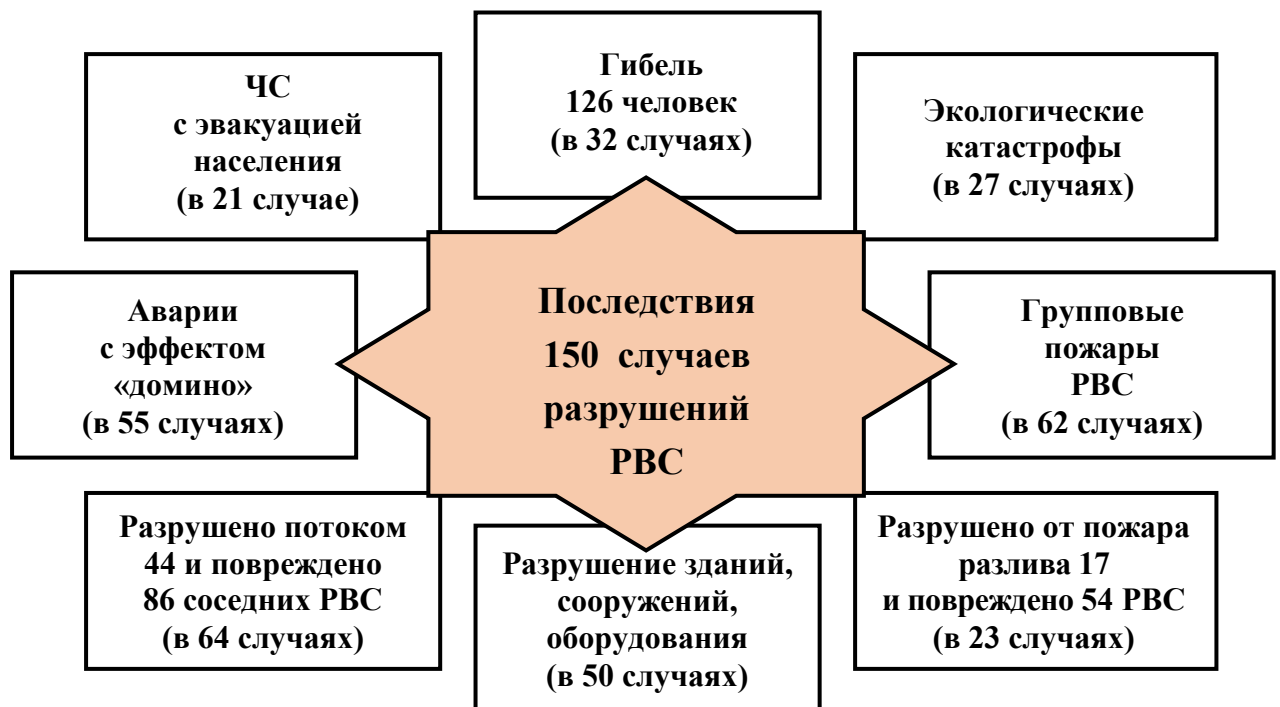


Рисунок 1.8 – Последствия квазимгновенных разрушений резервуаров

На основании рассмотренных материалов можно сделать вывод, что и сегодня проблема обеспечения надежности резервуарных конструкций остается до конца не решенной. То есть несмотря на определенный прогресс, достигнутый в области резервуаростроения, возможность разрушений РВС сохраняется, что и подтверждается как статистическими данными, представленными выше, так и случаями разрушений РВС, произошедшими после 2010 г. Так, в частности, 27 ноября 2014 г. на нефтебазе «Газпромнефть» в г. Нижний Тагил во время проведения слива остатков бензина из РВС-2000 м³ в нем произошел взрыв, в результате чего резервуар частично разрушился, а вышедший из него в обвалование бензин, воспламенился (рисунок 1.9) [29]–[31].



Рисунок 1.9 – Фрагмент тушения пожара разлива бензина в обваловании [29]

Следует отметить, что в результате взрыва паров бензина в РВС термические ожоги получил один из сотрудников нефтебазы, а от воздействия взрывной волны в близлежащих к нефтебазе домах были повреждены окна.

На этой же нефтебазе 27 июля 2015 г. в 11 ч 5 мин при проведении внутрибазовых перекачек бензина из железнодорожных цистерн в резервуары произошел объемный взрыв паров нефтепродукта в РВС-2000 м³. В результате взрыва резервуар был частично разрушен и более 70 т горящего бензина разлилось в пределах обвалования на площади 400 м² (рисунок 1.10) [32].



Рисунок 1.10 – Фрагмент пожара разлива бензина в обваловании

Причиной аварии явилось образование электростатических зарядов при наливке нефтепродукта из-за отсутствия заземления смонтированного уровнемера на корпусе РВС, а также наличие блуждающих токов выше допустимой нормы, приведшее к накоплению зарядов статического электричества и искрообразованию. Всего в ликвидации пожара на нефтебазе были задействованы более 80 человек, 25 единиц техники, в том числе пожарный поезд (рисунок 1.11 [32]).



Рисунок 1.11 – Фрагмент тушения пожара разлива бензина в обваловании и охлаждения соседних резервуаров нефтебазы

В результате аварии разрушены РВС, приемный и выпускной трубопроводы, ограждения кровли рядом стоящего РВС, деформированы участки трубопроводов, при этом экономический ущерб превысил 7,8 млн руб. (рисунок 1.12 [33]).

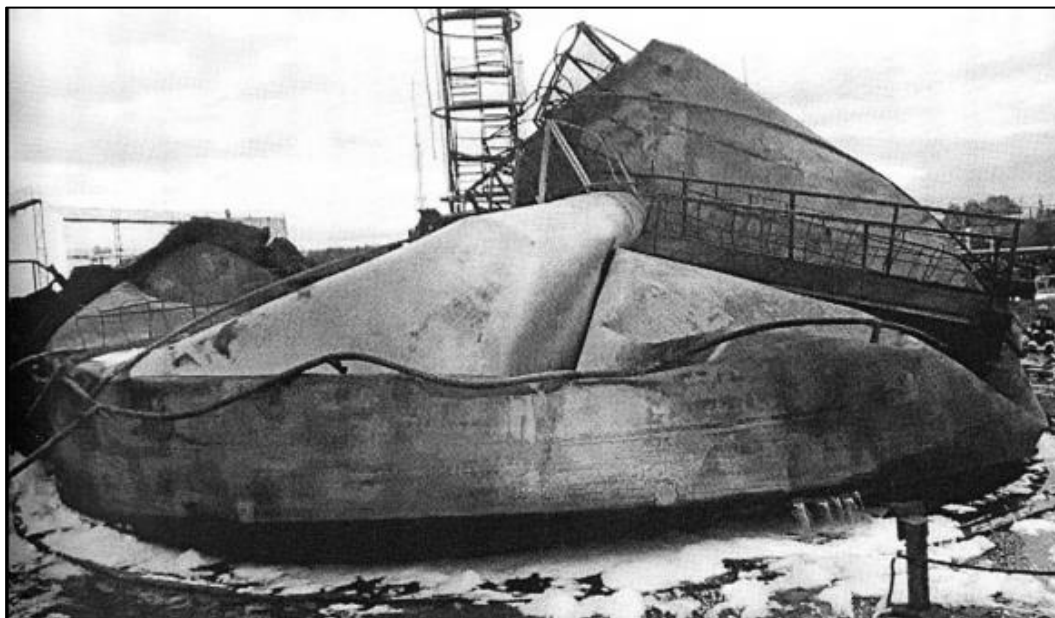


Рисунок 1.12 – Общий вид разрушенного РВС-2000 м³

21 мая 2014 г. в 15 ч 40 мин в резервуарном парке УПН «Уса» ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» ТПП «ЛУКОЙЛ-Усинскнефтегаз» произошел взрыв в резервуаре РВС-5000 м³, повлекший его разрушение и возгорание нефти. Пожар распространился еще на два рядом стоящих резервуара (рисунки 1.13, 1.14) [34]–[36].



Рисунок 1.13 – Фрагмент развития пожара в резервуарном парке УПН «Уса»



Рисунок 1.14 – Общий вид разрушенного РВС-5000 м³

Причиной взрыва паров нефти явилось интенсивное термическое воздействие, вызванное самовоспламенением пирофорных отложений в РВС. При ликвидации пожара один человек получил травмы. Общий ущерб – 53,9 млн руб.

20 августа 2013 г. в 07 ч 08 мин на ЗАО ПК «Дитэко» в Иркутской области под Ангарском произошел пожар в РВС-5000 м³, в котором находилось 3000 м³ сырой нефти (рисунок 1.15) [37]–[40].



Рисунок 1.15 – Пожар в РВС-5000 м³ на ЗАО ПК «Дитэко»

Для тушения пожара были направлены 35 боевых расчетов пожарной охраны, в том числе из г. Иркутска, а также пожарный поезд РЖД и сотрудники «Иркутскэнерго» (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Фрагмент тушения пожара в РВС-5000 м³ и охлаждения соседних РВС

С места инцидента были эвакуированы около 300 человек из ЗАО ПК «Дитэко» и близлежащих предприятий. К вечеру этого же дня под действием высокой температуры РВС разрушился, при этом семеро участников тушения пожара получили ожоги различной степени тяжести. Общая площадь пожара разлива нефти превышала 2000 м² (рисунок 1.17).



Рисунок 1.17 – Фрагмент тушения пожара разлива нефти в резервуарном парке

В общей сложности для тушения пожара были привлечены более 150 человек и свыше 50 единиц техники. Тушение пожара осложнялось нехваткой обязательных источников противопожарного водоснабжения и запасов пенообразователя на объекте, а также отсутствием подъездных путей для спецтехники к месту пожара. Пожарным пришлось проложить вдоль федеральной трассы «Байкал» (в 600 м от объекта) магистраль, по которой поступала вода. По договоренности с собственниками и руководителями соседних промышленных объектов к работам привлекались силы крупных региональных предприятий. Следует отметить, что с целью предотвращения распространения пожара в резервуарном парке, во время тушения пожара в РВС-5000 м³ также производилась откачка нефти из соседних РВС в железнодорожные емкости. Ликвидировать пожар оказалось возможным только к полудню 21 августа (рисунок 1.18).



Рисунок 1.18 – Последствия разрушения РВС-5000 м³ в резервуарном парке ЗАО ПК «Дитэко»

Из анализа рассмотренных аварий резервуаров следует, что механизм их разрушений достаточно сложный. Тем не менее, выявлено [3], [4], [6], [9], что раскрытие стенок РВС происходило преимущественно вследствие разрушения наиболее нагруженного элемента – узла сопряжения стенки с дном резервуара. При этом стенка РВС разрушалась на всю высоту и за счет больших радиальных

усилий, связанных с давлением жидкости при ее истечении из РВС, отрывалась от днища, а ее края разворачивались на 120-180 градусов. Обечайка РВС с силой отбрасывалась с основания в сторону, противоположную направлению истечения потока, а крыша обрушивалась на днище. Эти обстоятельства являются крайне важными и их необходимо учитывать при разработке модельного резервуара для проведения дальнейших исследований по определению геометрических параметров защитных ограждений РВС, в том числе и рассматриваемых в настоящей работе РВСЗС, с целью предупреждения каскадного развития пожара.

Учитывая, что настоящая работа посвящена разработке рекомендаций по определению геометрических параметров ограждений РВСЗС, ниже более подробно рассмотрен случай разрушения изотермического РВС-10000 м³ с жидким аммиаком, имеющего по сути аналогичную конструкцию, произошедший 20 марта 1989 г. на производственном объекте «Азот» в Литве [9], [10], [12].

Производственное объединение располагалось в 5 км от г. Ионава и в 32 км от г. Каунаса. Помимо производств карбамида, аммиака, аммиачной воды, аммиачной селитры и азотной кислоты, было налажено получение нитрофоски со складом на 60000 т, рядом с которым находился резервуар с жидким аммиаком (температура хранения минус 34 °С). Диаметр внутреннего резервуара составлял 30,3 м, диаметр внешнего корпуса – 31,5 м. Высота цилиндрической части резервуара составляла 19,9 м. Внешний корпус резервуара удерживал тепловую изоляцию и рассчитывался на давление осушенного азота, пропускаемого между стенками.

Резервуар опирался на сплошную фундаментную плиту и крепился к ней анкерными болтами. Фундамент вида «плита на плите» представлял собой монолитную железобетонную плиту диаметром 31,7 м и толщиной 0,4 м. Верхняя плита опиралась на железобетонные столбы, жестко соединенные с нижней фундаментной плитой. Для снижения интенсивности испарения аммиака и ограничения площади его пролива при аварии предусмотрена ограждающая стена толщиной 0,4 м и высотой 11,4 м, представляющая собой монолитный железобетонный кольцевой резервуар (рисунок 1.19).

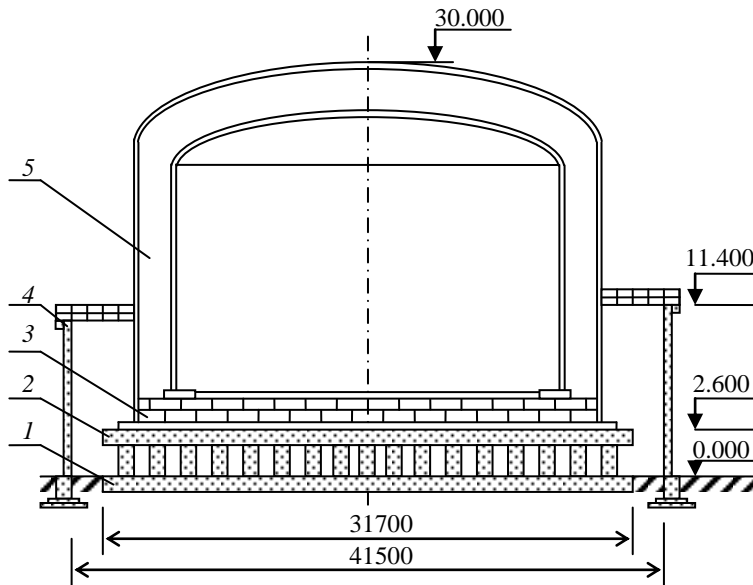


Рисунок 1.19 – Общий вид
РВС-10000 м³:

- 1 – фундаментная железобетонная плита;
- 2 – опорная железобетонная плита;
- 3 – теплоизоляция дна блоками из пеностекла;
- 4 – защитная железобетонная стена, толщиной 0,4 м;
- 5 – теплоизоляция стен и крыши резервуара перлитом

Авария резервуара произошла в 11 ч 08 мин, при этом основной (внутренний) резервуар был приподнят с отрывом дна от анкерных креплений, сместился с фундамента и опрокинулся на железобетонную защитную стену, что привело к ее разрушению и выходу жидкого аммиака на территорию объекта. В момент аварии в РВС находилось около 7000 т продукта, который разлился по территории объекта на площади более 10000 м², включая производственные и складские корпуса цеха нитрофоски. Образовавшееся в результате интенсивного испарения жидкого аммиака газозадушенное облако быстро распространилось по направлению ветра. Через 3-5 мин после разлива произошло возгорание аммиака. В огне оказались эстакада налива аммиака, цех и склады нитрофоски, изотермическое хранилище, временные строительные бытовки, различные коммуникации и другие объекты. Пожару был присвоен третий номер, включены системы объектового оповещения, отдано указание на остановку производства, эвакуацию рабочих и служащих. Действия пожарных затруднялись из-за ограниченной видимости и сильной загазованности большой территории. В результате попадания большого количества аммиака в отделение дообработки и склад нитрофоски произошло загорание электрооборудования, транспортерных лент, кабельных сетей, при этом образовалось множество очагов термического разложения нитрофоски.

В цехе производства нитрофоски потеряли несущую способность и ряд стальных колонн, обрушилась часть перекрытий, горели трансформаторные подстанции, центральный пункт управления, кабельные сети. Облако токсичного воздуха приобрело желто-коричневый цвет в результате попадания в атмосферу продуктов разложения нитрофоски и распространилось на большую часть территории производственного объекта и далее по направлению ветра в сторону г. Ширвинтос и г. Укмерге.

В связи с возникшей обстановкой по местному телевидению и радио было передано обращение к населению и проведена эвакуация около 34000 человек из близлежащих районов и г. Ионавы. Ликвидация чрезвычайной ситуации продолжалась до 13 ч 23 марта, в которой приняли участие более 800 работников пожарной охраны. Несмотря на принятые меры по оказанию медицинской помощи во время ликвидации последствий аварии один работник пожарной охраны погиб, 213 человек получили травмы. Таким образом, даже железобетонная защитная стена, предусмотренная для локализации аварийного разлива продукта при разрушении резервуара, не смогла стать препятствием к возникновению чрезвычайной ситуации.

Анализируя случаи разрушений РВС можно сделать общий вывод о том, что с целью предупреждения возможных негативных последствий необходимо при проектировании защитных ограждений, в том числе и защитной стенки для резервуаров типа «стакан в стакане», в первую очередь, уметь правильно определять их геометрические параметры. От этого, в свою очередь, будет зависеть выбор строительных материалов для изготовления ограждений, непосредственно влияющих на параметры их устойчивости к воздействию не только потока жидкости, образующегося при разрушении РВС, но и к нагрузке от разрушающихся конструкций резервуара.

Следует отметить, что аналогичные случаи разрушений РВС неоднократно происходили и в резервуарных парках производственных объектов за рубежом, основные сведения о которых, представлены ниже.

1.2 Характерные примеры разрушений резервуаров с нефтью и нефтепродуктами на производственных объектах за рубежом

К сожалению, в литературных источниках подробная информация об инцидентах, связанных с полным разрушением РВС на зарубежных производственных объектах, практически отсутствует. Наиболее полно приводятся описания только крупных аварий с катастрофическими последствиями, основные сведения о которых представлены в таблице 1.1 [10]–[28].

Таблица 1.1 – Основные сведения о разрушениях РВС за рубежом

Дата и место разрушения РВС	Объем РВС, м ³ (храняемая жидкость)	Последствия аварии
1	2	3
...1939 г. г. Норс Тивертон (США)	14500 (вода)	Потоком воды разрушены пять соседних РВС с 23000 м ³ нефтепродуктов, которые воспламенились. Пожар распространился на жилую застройку с катастрофическими последствиями
16.04.1947 г. г. Техас-Сити (США)	Резервуары (нефть)	Эффект «домино» с каскадным развитием пожара и разрушением многих РВС от попадания в них обломков судна с нитратом аммония, взорвавшегося в порту города. Продолжительность пожара четыре дня. В результате катастрофы погибли 1500 человек, из них 27 пожарных, более 3000 – травмированы, 300 – пропали без вести
Весна 1952 г. Нефтеочистительный завод «Де Нордике Фабрикен» (Норвегия)	6000 (вода, 5000 м ³)	Разрушение РВС при гидроиспытании вследствие неравномерной осадки грунта
...1955 г. г. Фоулей (Англия)	Неизвестно (вода)	Разрушение двух РВС при гидроиспытании вследствие больших локальных просадок оснований
...1964 г. г. Квебек (Канада)	Диаметр 21,3 м, высота 13,4 м (нефть)	Разрушение полностью заполненного РВС вследствие потери устойчивости основания с разливом нефти по территории объекта
...08.1966 г. Нефтебаза вблизи г. Лондона (Англия)	2000 5000	Разрушение двух РВС вследствие неравномерных осадок оснований
...1968 г. г. Роттердам (Голландия)	58000 (нефть)	Разрушение трех однотипных РВС. В каждом случае нефть разливалась за десятки секунд на большой площади с разрушением земляного обвалования

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
...1971 г. НПЗ в г. Чеховицы- Дзедзицы (Польша)	12500 (нефть)	Разрушение РВС при пожаре в резервуарном парке с перехлестом горящего потока через обвалование и разливом на площади более 47000 м ² . Пожар распространился на нефтяные ловушки, приемный участок нефти, цех подготовки масел, склад техники и продолжался двое суток
Начало 1970-х гг. г. Фоулей (Англия)	Три РВС, каждый диаметром 53,0 м (в одном – нефть, в других – вода)	Разрушение трех РВС. При разрушении одного из РВС с водой потоком в обваловании была проделана промоина окружностью более 20 м и глубиной до 5 м. В результате аварии повреждено различное оборудование
...1974 г. НПЗ (Япония)	38000 (сырая нефть)	Разрушение РВС с выходом сырой нефти в залив «Сето»
...10.1974 г. НПЗ (Япония)	80000	Разрушение РВС вследствие образования трещин в сварных швах опорных узлов
18.12.1974 г. НПЗ фирмы «Мицубиси Сэкие» (Япония)	50000 (мазут)	В результате разрушения РВС потоком нефтепродукта промыта в нескольких местах земляная дамба, что привело к пожару пролива 10000 м ³ мазута не только на территории НПЗ, но и в акватории
...1977 г. НПЗ вблизи г. Чикаго (США)	20000 (дизельное топливо)	Разрушение резервуара от прямого удара молнии с разливом жидкости и повреждением его осколками двух соседних РВС с бензином. Каскадное развитие пожара. Ущерб более 8 млн. долларов
...1979 г. НПЗ фирмы «Стандарт ойл Компани оф Индиана» (США)	От 5000 до 10000 (сырая нефть)	Каскадное развитие пожара в течение 30 ч. В течение первых 5 часов пожара взорвалось и разрушилось около 30 РВС. Распространение пожара разлива на объекты города, в том числе на жилые и общественные здания с массовым пребыванием людей. Эвакуация жителей г. Уайтинга (более 1400 человек). Пожаром уничтожено 60 резервуаров различной вместимости
...1970-1980 гг. (Англия)	От 8500 до 24000 (нефтепродукты)	Несколько разрушений РВС с выходом и разливом нефтепродуктов за пределы объектов. Анализ аварий резервуаров показал, что причинами их разрушений было возникновение трещин в швах крайков и уторном шве
Начало 1980-х гг. НПЗ в округе г. Валмадрера (Италия)	2000 (нефть)	Возникновение пожара в РВС, который через 40 мин разрушился с разливом нефти и частичным ее перехлестом через гребень обвалования. Угроза распространения пожара на соседние РВС. Ликвидация пожара через 7 ч с участием 149 пожарных, использованием 27 пожарных автомобилей, расходом пенообразователя в количестве 32 т

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
19.12.1982 г. г. Каракас (Венесуэла)	40000 (нефть)	Взрыв в РВС с его разрушением. Поток горячей нефти разрушил обвалование и разлился по территории объекта с выходом в городскую черту и акваторию моря. Каскадное развитие пожара с взрывом и разрушением соседнего РВС и пожаром на пришвартованном танкере. Погибли более 140 человек, более 500 – получили ранения, ожоги и отравления
30.08.1983 г. НПЗ компании «Амоко» г. Милфорд-Хейвене (Великобритания)	100000 (сырая нефть)	Пожар в РВСПК в течение 60 ч. Через 24 ч от момента возникновения пожара в течение 2 ч произошло два выброса нефти в виде огненного шара, в результате чего ожоги получили 40 человек. После третьего выброса обечайка резервуара оторвалась от основания и оставшаяся нефть вылилась в обвалование, объем которого при высоте в 5 м оказался достаточным для ее удержания. В тушении пожара задействовано 70 единиц пожарной техники
21.12.1985 г. Нефтехранилище «Ажил Петроли» г. Неаполь (Италия)	Неизвестно (нефть и нефтепродукты)	Нефтехранилище находилось в густонаселенном квартале и состояло из 33 РВС общей емкостью 100000 т. Территория обвалована земляной дамбой высотой 7 м. При перекачке бензина и дизельного топлива из танкера в резервуары произошла утечка бензина, что привело к загазованности парка и взрыву паров бензина. Произошло одновременное разрушение 20 РВС, многих зданий и сооружений с возникновением пожара на общей площади более 15000 м ² . Тушение пожара продолжалось более 4 суток, ущерб превысил 50 млрд лир
...1985 г. Нефтебаза (Япония)	РВС (нефть)	Разрушение 3 крупногабаритных РВС во время землетрясения, эпицентр которого находился в 140 км от объекта. Резервуары разрушились после прохождения основной ударной волны. Отмечался общий характер разрушений, что подтверждалось наличием трещин и разрывов в местах сварки окрайков со стенками РВС. В результате аварий резервуаров вся хранившаяся в них нефть вытекла за первые 20-80 с
...01.1988 г. Нефтебаза (Германия)	15000 (дизельное топливо)	Разрушение РВС с прорывом земляной дамбы и разливом топлива по территории объекта, при этом более 2600 м ³ топлива попало в реку

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
...1980-е гг. Склад предприятия (Германия)	Неизвестно (нефть)	Разрушение РВС через 1,5 ч после окончания сварочных работ. Разрушение горящим потоком нефти обвалования и соседнего РВС с нефтью. Каскадное развитие пожара с выходом нефти в акваторию, где потоком разрушены плавающий кран и эстакада
...1980-е гг. Склад предприятия (Германия)	Неизвестно (смесь мазутов)	Разрушение РВС после окончания сварочных работ. При взрыве резервуар оторвался от земли и пролетел по воздуху около 70 м. Вытекший мазут загорелся. При инциденте один человек погиб
...1994 г. ТЭЦ (Болгария)	5000 (мазут)	Разрушение РВС с прорывом мазутом земляной дамбы. От воздействия потока разрушено здание администрации ТЭЦ
12.11.1996 г. НПЗ компании «Пемекс» г. Мехико (Мексика)	Крупный РВС (бензин)	Разрушение РВС с образованием горящего потока, который разрушил соседний РВС. Огнем была охвачена огромная территория, в том числе и за пределами завода. Проведена эвакуация жителей из близлежащего района (более 1000 человек). При ликвидации аварии 4 человека погибли, из них 3 пожарных
26.09.2003 г. НПЗ компании «Идемиту» (Япония)	29 РВС (нефть)	В результате землетрясения 45 РВС получили повреждения, из которых 29 были разрушены с разливом и возгоранием нефти
11.07.2004 г. НПЗ компании «Маратон» (США)	10000 (нефть)	При попадании в РВС грозового разряда произошел взрыв паров нефти, в результате чего крыша была сорвана и отброшена. Через некоторое время от высокой температуры произошло разрушение РВС с разливом нефти в каре обвалования
04.02.2005 г. Химзавод компании «Кемира Кеми» г. Хельсинборг (Швеция)	20000 (серная кислота)	При разрушении РВС вытекло до 15000 т серной кислоты с образованием больших размеров токсичного облака, которое достигло границ города. Травмированы 13 человек
11.12.2005 г. Нефтехранилище «Бансфилд» Г. Хемпел-Хемпстед (Великобритания)	20 РВС (нефтепродукты)	В результате взрывов разрушено 20 РВС с нефтепродуктами, общим объемом хранения до 13500 м ³ . В результате инцидента погибло 8 человек, 43 человека были травмированы
04.09.2006 г. ТЭЦ в районе г. Эль-Дэкие (Ливан)	Неизвестно (мазут)	В результате бомбардировок произошло разрушение РВС ТЭЦ, что привело к экологической катастрофе. Загрязнение побережья на протяженности до 80 км. Последствия аварии затронули территории Сирии, Турции, Греции, для ликвидации которой потребуется более 100 млн долларов США

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
01.02.2007 г. НПЗ в г. Измит (Турция)	Неизвестно	Взрыв и разрушение РВС, в результате которого погибло 2 человека и еще 3 были травмированы. Проводилась эвакуация жителей из близлежащего района из-за опасности распространения токсичных паров с площади пролива

Анализ представленных в таблице 1.1 данных показывает, что нормативные ограждения, в том числе ограждающие стены из негорючих материалов, также нашедшие наиболее широкое применение в резервуарных парках производственных объектов за рубежом, практически во всех случаях разрушений РВС не смогли удержать образующийся поток жидкости. Последствия таких инцидентов неоднократно носили катастрофический характер, приводя к гибели и травмированию людей, а также к экологическим катастрофам.

С целью предотвращения возможных негативных последствий при авариях РВС в ряде зарубежных стран нормативно закреплены дополнительные требования к ограждениям резервуаров, в том числе, и сооружение РВС с защитной стенкой типа «стакан в стакане» [72].

1.3 Анализ нормативных требований в области промышленной безопасности для проектирования резервуаров типа «стакан в стакане»

Как уже отмечалось во введении, к одному из перспективных конструктивных решений по локализации возможного пожара разлива нефти или нефтепродукта в резервуарном парке является сооружение РВСЗС, общий вид которого представлен на рисунке 1.20 [42], [43], [54].

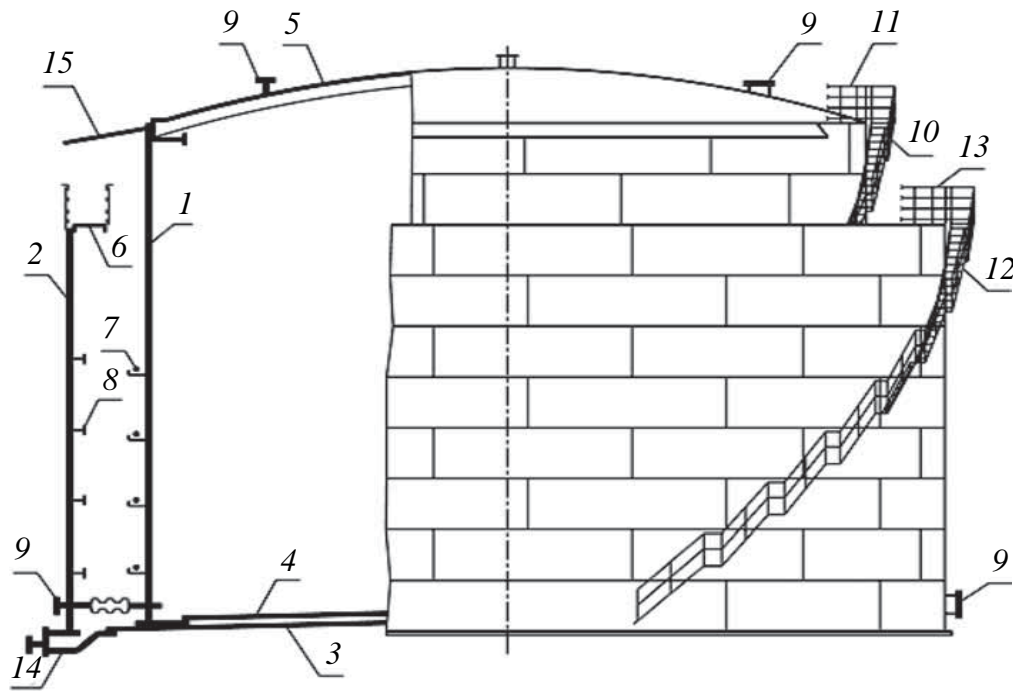


Рисунок 1.20 – Общий вид резервуара с защитной стенкой:

1 – основная стенка; 2 – защитная стенка; 3 – основное днище; 4 – защитное днище; 5 – стационарная крыша; 6 – ветровое кольцо на защитной стенке; 7 – аварийные канаты на основной стенке; 8 – кольца жесткости на защитной стенке; 9 – патрубки и люки; 10 – лестница на основной стенке; 11 – кольцевая площадка на крыше; 12 – лестница на защитной стенке; 13 – площадка по ветровому кольцу; 14 – лотковый зумпф; 15 – атмосферозащитный козырек

В Российской Федерации впервые нормативные требования к РВСЗС были сформулированы в ПБ 03-381-00 «Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [73], введенных в действие в 2001 г. в целях установления единых для всех производственных объектов требований к проектированию, монтажу, испытаниям и повышению надежности вновь сооружаемых РВС.

Следует отметить, что в этих правилах впервые были объединены и приведены в систему разрозненно действующие требования различных нормативных документов по РВС, что обеспечило упрощение и улучшение организации работ проектировщиков и изготовителей, а также учет требований промышленной безопасности. Кроме этого, при разработке документа были проанализированы и учтены требования действующей законодательной, нормативно-правовой и технической документации в области обеспечения промышленной безопасности

резервуаров, результаты экспертиз аварий на производственных объектах, а также опыт проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации резервуаров и инженерных решений на базе зарубежных документов, в том числе американского стандарта *API-650* [72].

Рассматриваемые правила [73] распространялись на вновь проектируемые РВС объемом от 100 до 50000 м³ для нефти и нефтепродуктов со стационарными или плавающими крышами, при этом в них отмечалось, что проектирование, изготовление и монтаж РВС большего объема должен выполняться по индивидуальным техническим условиям с учетом положений настоящих правил. В приложении Ж к правилам [73] сформулированы особенности устройства РВСЗС, к основным из которых относятся:

- РВСЗС состоят из основного (внутреннего) РВС, предназначенного для хранения топлива, и защитного (наружного) резервуара для удержания топлива в случае аварии (нарушения герметичности) основного РВС;

- наружный резервуар изготавливается по типу открытого «стакана», в котором установлен внутренний РВС;

- при наличии на защитном резервуаре атмосферозащитного козырька, перекрывающего межстенное пространство, необходимо обеспечение вентиляции этого пространства за счет установки вентиляционных патрубков, равномерно расположенных по периметру на расстоянии не более 10 м друг от друга;

- высота защитной стенки резервуара должна составлять не менее 80 % от высоты стенки основного РВС;

- диаметр наружного резервуара должен назначаться таким образом, чтобы в случае повреждения основного РВС и перетекания части жидкости в защитный резервуар, ее уровень был на 1 м ниже верха стенки защитного резервуара, при этом ширина межстенного пространства должна быть не менее 1,5 м;

- днище основного РВС может опираться непосредственно на днище защитного резервуара или, для лучшего контроля возможных протечек продукта, на разделяющие днища решетки, арматурные сетки или иные прокладки;

- уклон днищ РВСЗС должен быть только наружу;

- при размещении РВСЗС в составе резервуарных парков следует руководствоваться требованиями противопожарных норм для складов нефти и нефтепродуктов, при этом за диаметр РВСЗС следует принимать диаметр основного РВС;

- РВСЗС не требуют обвалования.

В 2003 г. правила [73] утратили свою силу в связи с введением в действие ПБ 03-605-03 «Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [74], которые устанавливали общие технические требования к конструкции, устройству, изготовлению, монтажу, испытаниям РВС для нефти и нефтепродуктов, а также требования, направленные на обеспечение промышленной безопасности, предупреждение аварий, случаев производственного травматизма. Правила [74] также распространялись на вновь проектируемые РВС объемом от 100 до 50000 м³ для нефти и нефтепродуктов со стационарными или плавающими крышами, при этом идентичные ранее рассмотренным требования к РВСЗС были сформулированы в подразделе 3.10 «Резервуары с защитной стенкой».

Необходимо отметить, что требования к РВСЗС нашли также отражение и во вступивших в действие в 2003 г. ПБ 09-560-2003 «Правила промышленной безопасности нефтебаз и складов нефтепродуктов» [75]. В правилах отмечалось, что РВСЗС допускается применять в резервуарных парках в обоснованных случаях, при этом должен быть обеспечен контроль наличия утечек продукта в межстенное пространство. Такой контроль может осуществляться по прямому (утечкам) или косвенному параметрам (загазованности). При обнаружении нарушения герметичности основного резервуара необходимо вывести его из эксплуатации. Иные требования к РВСЗС в этом документе не предъявлялись.

В дополнение к правилам [74] Российской Ассоциацией экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности (НО Ассоциация «Ростехэкспертиза») был разработан и впервые введен в действие в 2009 г. стандарт организации СТО-СА-03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [43], содержащий расширенные требования к РВСЗС.

При этом в [43] указывалось, что основные размеры РВС должны определяться генеральным проектировщиком по согласованию с заказчиком с учетом условий компоновки резервуарного парка и обеспечения минимального веса резервуаров. Помимо ранее установленных требований к РВСЗС в [74] в обязательном приложении П.17 стандарта [43] также указывалось, что:

- ширина межстенного пространства должна быть не менее 1,8 м;
- на основной стенке РВС должны быть установлены стальные аварийные канаты, сечение и места расположения которых определяются специальным расчетом. Канаты должны быть установлены без предварительного натяжения и без провисания между узлами их крепления к стенке. Вместо стальных канатов допускается применять синтетические монтажные полотенца, равнопрочные стальным канатам;
- на защитной стенке должны быть установлены кольца жесткости, рассчитанные на гидродинамический удар продукта при аварии РВС (рисунок 1.21 [76]);
- для удаления атмосферных осадков в межстенном пространстве должны быть установлены лотковые или круглые зумпфы зачистки;
- РВСЗС не требуют устройства железобетонного каре для защиты от гидродинамического удара продукта при мгновенном хрупком разрушении резервуара, а требуют обычной защиты для гидростатического удержания и организованного отвода растекающейся жидкости.



Рисунок 1.21 – Общий вид колец жесткости на защитной стенке

Кроме этого, в стандарте [43] приводятся основные положения расчета РВСЗС, который должен выполняться с учетом двух основных сочетаний нагрузок в условиях эксплуатации и гидроиспытаний, а также особого сочетания нагрузок в условиях аварии. Так, расчет стенки и крыши основного РВС следует выполнять так же, как для РВС без защитной стенки, при этом ветровое воздействие на стенку основного РВС из состава нагрузок исключается. Защитная стенка должна быть рассчитана на прочность и устойчивость для основных и особого сочетания нагрузок, при этом в условиях аварии следует учесть гидродинамические эффекты и неосесимметричный характер распределения нагрузки, прикладываемой к защитной стенке. Особое сочетание нагрузок предполагает следующий сценарий развития аварии:

- основная стенка получает мгновенное хрупкое разрушение вдоль образующей по всей высоте;

- в образовавшийся разрыв происходит выливание продукта с одновременным увеличением ширины разрыва;

- канаты (тросы), установленные на основной стенке, замедляют ее раскрытие до момента затекания продукта в межстенное пространство и обеспечивают сохранение формы основной стенки в зоне разрыва, предотвращая тем самым ударное взаимодействие основной и защитной стенок;

- гидродинамическая нагрузка от продукта на защитную стенку воспринимается установленными на ней кольцами жесткости.

Важно отметить, что применение приведенных в стандарте основных схем приложения нагрузок к защитной стенке РВС и ее фундаменту в условиях аварии основного РВС допускается для РВС объемом до 25000 м³ включительно. Для РВС большего объема требуется проведение расчетов на основе гидродинамической модели с подвижными границами, соответствующими движению разрушенной основной стенки РВС.

В этом же стандарте указывается, что устройства тушения и охлаждения резервуаров следует выполнять в соответствии с нормами проектирования резервуарных парков на складах нефти и нефтепродуктов или на основе инженерного

обоснования в зависимости от температуры вспышки хранимых нефти и нефтепродуктов, конструктивного вида и пожаровзрывоопасности резервуара, включая предварительное планирование тушения возможного пожара, объемов единичных резервуаров и общей вместимости резервуарного парка, расположения площадки строительства и характеристик операционной деятельности, организации пожарной охраны на предприятии размещения резервуаров, с учетом норм проектирования установок пенного тушения и водяного охлаждения, включая предварительное планирование тушения возможного пожара.

В 2010 г. впервые вступил в действие межгосударственный стандарт ГОСТ 31385-2008 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия» [77], устанавливающий требования к проектированию, изготовлению, монтажу и испытанию РВС номинальным объемом от 100 до 120000 м³, используемых при добыче, транспортировании, переработке и хранению нефти и нефтепродуктов.

Непосредственно требования к проектированию РВСЗС изложены в разделе 5.1.11 рассматриваемого стандарта, в том числе указывается, что такие резервуары необходимо устанавливать для обеспечения безопасности людей и окружающей среды в условиях стесненных производственных площадок при отсутствии обваловок групп резервуаров, а также при условии расположения резервуаров вблизи морей и рек. Минимальное расстояние между рабочим резервуаром и защитной стенкой должно быть не менее 1,8 м. Прочность защитной стенки должна определяться расчетом от воздействия потока жидкости при разгерметизации (аварии) рабочего резервуара, при этом необходимо предусматривать конструктивные мероприятия для предотвращения лавинообразного разрушения и полного раскрытия стенки рабочего резервуара. Иные требования к РВСЗС в данном стандарте не приводятся.

В 2011 г. вступили в действие изменения и дополнения ИД-2010 [44] к стандарту СТО-СА-03-002-2009 [43], разработанные на основании обсуждения вопросов его применения на международных научно-практических семинарах по резервуаростроению, в том числе, касающиеся и требований к РВСЗС.

Так, в новой версии стандарта существенно расширен раздел 12.3 «Устройства тушения пожара и охлаждения резервуаров», в котором отмечается, что системы противопожарной защиты на резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов должны проектироваться на основании двух возможных сценариев развития аварийной ситуации: 1) горение продукта и пожар резервуара происходят внутри его корпуса, то есть без разрушения стенки и днища; 2) для РВСЗС происходит разрыв основной стенки резервуара и разлив продукта в объем защитного резервуара. При этом обязательным условием рассмотрения первого сценария аварийной ситуации является наличие на РВС стационарной крыши взрывозащищенного исполнения или аварийных клапанов. Вторым сценарий предполагает наличие в проекте РВСЗС детальных расчетов защитной стенки на гидродинамическое воздействие и полное удержание волны жидкости, образующейся при разрушении основного РВС, в соответствии с приложением П.17 рассматриваемого стандарта.

Следует также отметить, что в этой версии стандарта впервые стали предъявляться требования к месту установки на РВСЗС пеногенераторов (пенокамер). Так, для основного РВС, в том числе оборудованного понтоном, стационарные установки пенного пожаротушения должны устанавливаться в верхнем поясе стенки или на крыше (при устройстве дополнительной защиты от повреждений при взрыве или опасных факторов пожара), для РВС с плавающей крышей – выше стенки, а для защитного резервуара – в верхнем поясе защитной стенки или выше нее. Кроме этого отмечается, что требования к размещению оборудования стационарных установок водяного охлаждения резервуаров аналогичны соответствующим требованиям для стационарных установок пенного пожаротушения.

Также в стандарте появились новые требования к контролю возможных утечек продукта в межстенном пространстве резервуара и доступу в него обслуживающего персонала. Так, для контроля возможных утечек продукта в межстенном пространстве по периметру основного резервуара должны быть установлены не менее четырех газоанализаторов, а также патрубки для контроля герметичности пространства между основным и защитными днищами.

Для оперативного доступа обслуживающего персонала в межстенное пространство на защитной стенке резервуара должны быть установлены не менее двух быстрооткрывающихся люков с затворами байонетного типа (рисунок 1.22 [78]).

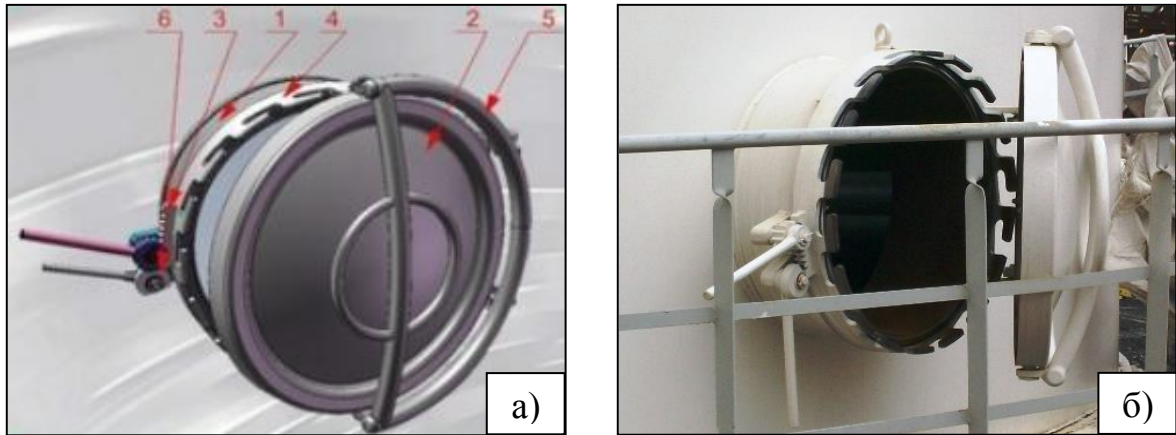


Рисунок 1.22 – Принципиальная схема (а) и общий вид (б) быстрооткрывающегося люка байонетного типа:

1 – патрубок, присоединяемый на сварке к стенке резервуара; 2 – штампованная сферическая крышка; 3 – механизм крепления и поворота; 4 – байонетное кольцо; 5 – механизм вращения; 6 – запирающий элемент

В целях содействия соблюдению федеральных норм и правил в области промышленной безопасности организациями, осуществляющими деятельность по проектированию, изготовлению и строительству РВС, в 2013 г. введено в действие «Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [45]. Руководство содержит рекомендации по обеспечению промышленной безопасности при проектировании, изготовлении, строительстве РВС, используемых на опасных производственных объектах нефтедобычи, транспортирования, переработки и хранения нефти и нефтепродуктов, и не является нормативным правовым актом.

Следует отметить, что при разработке руководства были проанализированы и учтены действующая нормативно-техническая документация по вопросам обеспечения промышленной безопасности Ростехнадзора, опыт проектирования, изготовления и эксплуатации РВС на базе российских стандартов организаций Ассоциации Ростехэкспертиза [43], ОАО «АК «Транснефть», американского стандарта *API 650* [72], европейского стандарта *EN 14015* [79] и др.

Руководство распространяется на РВС номинальным объемом от 100 м³ до 120000 м³ для нефти и нефтепродуктов со стационарными или плавающими крышами, при этом проектирование, изготовление и монтаж РВС большим объемом рекомендуется выполнять по индивидуальным техническим условиям специализированными организациями, с учетом рекомендаций руководства. Непосредственно требования к РВСЗС сформулированы в разделе 3.10.9 «Резервуары с защитной стенкой» рассматриваемого руководства. Однако анализ этих требований показал, что они в усеченном виде полностью идентичны требованиям, установленным в ранее рассмотренных документах [43], [44], [77].

В 2013 г. взамен ПБ 09-560-2003 [75] введено в действие «Руководство по безопасности для нефтебаз и складов нефти и нефтепродуктов» [80]. Однако анализ содержащихся в нем требований к РВСЗС также показал, что они приведены без существенных изменений по отношению к ранней версии этого документа.

Взамен ГОСТ 31385-2008 [77] в 2017 г. введена в действие его обновленная редакция ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия» [42], в которой впервые указывается, что стандарт устанавливает требования к проектированию, изготовлению, монтажу и испытанию РВС номинальным объемом от 100 м³ до 120000 м³, в том числе с защитной стенкой, используемых при добыче, транспортировании, переработке и хранении нефти и нефтепродуктов, а также требования, направленные на обеспечение механической и промышленной безопасности, предупреждение аварий и производственного травматизма. Кроме этого, требования стандарта распространяются на стальные конструкции резервуара, ограниченные первым фланцевым или сварным (резьбовым) соединением технологических устройств или трубопроводов снаружи корпуса (стальной защитной стенки) резервуара. В стандарте дается следующее определение РВСЗС – конструктивное решение резервуара, включающее в себя внутренний основной резервуар со стационарной или плавающей крышей и наружный защитный резервуар.

В отличие от предыдущей версии стандарта в подразделе 6.1.13 «Резервуары с защитной стенкой» [42] отмечается, что РВСЗС обеспечивают повышенный уровень безопасности людей и окружающей среды в случае аварии резервуара и разливов хранимого продукта. Использование РВСЗС рекомендуется при повышенных требованиях к безопасности, например, при расположении резервуаров вблизи жилых зон или по берегам водоемов, а также на производственных площадках, при недостаточности места для устройства обвалования или каре вокруг резервуаров. При этом РВСЗС не требуют устройства железобетонного каре для защиты от гидростатического удара продукта при мгновенном хрупком разрушении резервуара, а требуют обычной защиты для гидростатического удержания и организованного отвода растекающейся жидкости. Остальные требования стандарта к РВСЗС дублируют требования, предъявляемые в выше рассмотренных документах [43]–[45], при этом отмечается, что расчет несущей способности РВСЗС в аварийной ситуации, связанной с разрушением основного РВС, следует проводить в соответствии с требованиями специализированных стандартов.

Также важно указать, что в 2017 г. введены в действие федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности складов нефти и нефтепродуктов» [81], в подразделе 2.5.6 которых указывается, что при применении РВСЗС должен быть обеспечен контроль утечек продукта в межстенное пространство по прямому (утечки) или косвенному (загазованность) параметру. При обнаружении нарушения герметичности основного резервуара он должен быть выведен из эксплуатации, при этом иные требования к РВСЗС в данном документе не приводятся.

Анализируя выше рассмотренные нормативные требования к РВСЗС видно, что они существенно расширились с вводом в действие обновленных редакций стандартов или новых документов в области обеспечения промышленной безопасности резервуаров и резервуарных парков для хранения нефти и нефтепродуктов. В основу расширения требований к РВСЗС был положен опыт их проектирования и эксплуатации с учетом положений не только российских нормативных документов, но и ряда зарубежных стандартов.

При этом следует отметить, что наиболее полно требования к РВСЗС сформулированы в СТО-СА-03-002-2009 [43] с учетом вышедших к этому стандарту изменений и дополнений ИД-2010 [44].

Однако, анализ требований к РВСЗС, предъявляемых в основных действующих нормативных документах [42]–[45] показал, что ряд из них, непосредственно влияющих на обеспечение как промышленной, так и пожарной безопасности таких конструкций резервуаров, нуждаются в уточнении. Так, во-первых, нормативно закреплено, что ширина межстенного пространства должна составлять не менее 1,8 м при высоте защитной стенки не менее 80 % от высоты стенки основного РВС. При этом в нормах не предъявляются требования к максимальной величине этой ширины, хотя очевидно, что с ее изменением должна изменяться и высота защитной стенки, причем эта ширина будет влиять и на обустройство атмосферозащитного козырька и на возможность образования взрывоопасных концентраций в межстенном пространстве. Следует отметить, что результаты ранее выполненных в Академии ГПС МЧС России экспериментов по изучению волны прорыва, образующейся при разрушении РВС, и ее воздействию на ограждения различных конфигураций (вертикальная стенка, наклонная стенка, стенка с козырьком) [9], [63], [64], убедительно свидетельствуют о существенном влиянии на высоту ограждения расстояния от стенки РВС до ограждения.

Во-вторых, в СТО-СА-03-002-2009 [43] редакции от 2011 г., а также в ГОСТ 31385-2016 [42] указывается, что РВСЗС не требуют устройства железобетонного каре для защиты от гидростатического удара продукта при мгновенном хрупком разрушении резервуара, а требуют обычной защиты для гидростатического удержания и организованного отвода растекающейся жидкости. То есть помимо защитной стенки резервуара необходимо обустройство дополнительного земляного обвалования или ограждающей стены из негорючих материалов в соответствии с требованиями действующих нормативных документов в области обеспечения пожарной безопасности. При этом в остальных действующих нормативных документах требования к необходимости обустройства дополнительных ограждений для РВСЗС отсутствуют.

В-третьих, в [42]–[45] предъявляются требования к установке на основной стенке РВС стальных аварийных канатов для предотвращения удара о защитную стенку в случае возникновения аварий, сечение и места расположения которых, определяются специальным расчетом. Канаты рекомендуется устанавливать без предварительного натяжения и без провисания между узлами их крепления к стенке, при этом вместо стальных канатов могут также применяться синтетические монтажные полотенца, равнопрочные стальным канатам. Непосредственно на защитной стенке должны устанавливаться кольца жесткости, рассчитанные на гидродинамический удар продукта при аварии основного РВС.

Здесь важно отметить, что статистика отмечает ряд разрушений РВС непосредственно от воздействия высоких температур пожара в этом резервуаре [9]. При этом из анализа развития пожаров в резервуарных парках [8], [28], [82] известно, что свободный борт стенки РВС при отсутствии его охлаждения в течение первых 3–5 мин от момента возникновения пожара теряет свою несущую способность, то есть появляются визуально определяемые деформации из-за прогрева конструкции пламенем. В РВС с плавающими крышами полная потеря плавучих средств и затопление крыши в условиях реального пожара наступает, как правило, через один час. При пожаре в обваловании, в данном случае может рассматриваться межстенное пространство, после 10–15 мин воздействия пламени наступает потеря несущей способности лестниц, выходят из строя узлы управления коренными задвижками и хлопушами, происходит разгерметизация фланцевых соединений, нарушается целостность конструкции РВС. В связи с этим, возникает вопрос об устойчивости предлагаемых стальных канатов и, тем более, синтетических монтажных полотенец, к воздействию тепловых потоков пожара в РВС. Этот же вопрос возникает и к кольцам жесткости, устанавливаемым на защитной стенке РВС.

В-четвертых, в рассматриваемых документах отсутствуют требования к огнестойкости защитной стенки. С одной стороны, это может объясняться тем, что защитная стенка относится непосредственно к конструкции РВС и требование к ее огнестойкости является неправомерным.

С другой стороны, в редакции 2011 г. СТО-СА-03-002-2009 [43] указано, что при его разработке использованы также требования ГОСТ Р 53324-2009 «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности» [83], где к ограждениям резервуаров, выполненных из строительных материалов и предназначенных для ограничения площади разлива жидкости, в том числе, предъявляются требования и по огнестойкости (не менее $E 150$). Следует также отметить, что и в остальных нормативных документах [42], [45] сделаны ссылки на необходимость учета требований пожарной безопасности к РВСЗС, содержащихся в соответствующих нормативных документах в области обеспечения пожарной безопасности складов нефти и нефтепродуктов. То есть по сути в необходимости использования требований, установленных, в том числе, и в указанном выше ГОСТ Р 53324-2009 [83]. Очевидно, что выполнить требование по огнестойкости применительно к защитной стенке РВСЗС, проектируемой из той же конструкционной стали, что и основной резервуар, является весьма проблематичным.

В-пятых, во всех действующих нормативных документах в области промышленной безопасности указывается, что установка РВСЗС, их взаимное расположение и обеспечение системами противопожарной защиты должны соответствовать требованиям норм проектирования и безопасности резервуарных парков на складах нефти и нефтепродуктов. Однако, требования действующего СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности» [41] не распространяются на склады нефти и нефтепродуктов с применением РВСЗС.

Таким образом, отсутствие нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности к РВСЗС, а также необходимость уточнения ряда требований в действующих нормативных документах в области обеспечения промышленной безопасности к РВСЗС, обуславливают актуальность проведения исследований, направленных как на нормирование требований к геометрическим параметрам защитной стенки в зависимости от ее удаленности от стенки основного РВС, а в дальнейшем – на разработку нормативного документа в области обеспечения пожарной безопасности резервуаров типа «стакан в стакане» [46], [47].

1.4 Цель и задачи исследования

На основе рассмотренных в настоящей главе статистических материалов о разрушениях РВС с нефтью и нефтепродуктами как в России, так и за рубежом, критического анализа нормативных требований в области обеспечения промышленной безопасности, предъявляемых к проектированию РВСЗС, а также отсутствия нормативных документов в области обеспечения пожарной безопасности, в которых предъявлялись бы требования к таким конструкциям резервуаров, поставлена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Целью диссертационной работы являлась разработка рекомендаций по определению геометрических параметров ограждений РВСЗС, необходимых для полной локализации возможного разлива нефти или нефтепродукта при разрушении основного (внутреннего) резервуара.

Для достижения цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

- проведение анализа нормативных требований к геометрическим параметрам РВСЗС для обеспечения пожарной и промышленной безопасности при полном разрушении внутреннего (основного) резервуара;
- разработка лабораторного стенда и методик проведения экспериментов по определению геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения;
- экспериментальное нахождение минимальной высоты защитной стенки в зависимости от ее расстояния до основного резервуара, обеспечивающей полную локализацию потока жидкости при разрушении основного резервуара; получение эмпирической зависимости для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку, от ее высоты; экспериментальное определение геометрических параметров дополнительного ограждения;
- разработка рекомендаций по определению геометрических параметров ограждений РВСЗС, необходимых для предотвращения каскадного развития аварии в резервуарном парке.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ

2.1 Анализ теоретических и экспериментальных исследований влияния потока жидкости при разрушении резервуара на ограждения различной конфигурации

К одним из первых работ, посвященных изучению влияния потока жидкости, образующегося при разрушении РВС, на геометрические параметры ограждений различной конфигурации, следует отнести исследования, выполненные в Академии ГПС МЧС России, в том числе, совместно со специалистами РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, а также во ВНИИПО МЧС России.

Так, в работе [60] представлены результаты решения задачи о нахождении высоты вертикальной защитной стены при набегании на нее потока воды вследствие разрушения резервуара в следующей постановке. Рассматривалась плоская задача. Между двумя стенками $x = \pm R_p$ находится безграничный канал, заполненный жидкостью с постоянной глубиной $H_{ж}$. В начальный момент времени $t = 0$ стенки мгновенно разрушаются, и покоящаяся до того жидкость приходит в движение, растекаясь в обе стороны. На расстояниях $(L - R_p)$ справа и слева от стенок канала (в точках $x = \pm L$), расположены защитные преграды (стены), которые препятствуют проникновению жидкости в область $|x| > L$. Необходимо найти высоту преград с учетом полного удержания жидкости.

Для нахождения ответа на поставленный вопрос была решена следующая краевая задача:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\vartheta}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial h\vartheta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h\vartheta^2 + \frac{gh^2}{2} \right) = 0; \quad (2.1)$$

$$h(x,0) = \begin{cases} H_{\text{ж}} & \text{при } 0 \leq x \leq R_p \\ 0 & \text{при } R_p < x \leq L \end{cases} ;$$

$$\vartheta(x,0) = 0, \quad \vartheta(0,t) = \vartheta(L,t) = 0.$$

При этом высота H_c защитных преград находилась как максимальная высота подъема жидкости в точках $x = \pm L$, то есть $h(\pm L, t) = H_c$. Решение задачи осуществлялось численно с помощью метода С.К. Годунова [84], [85], в результате чего получены следующие значения (рисунок 2.1).

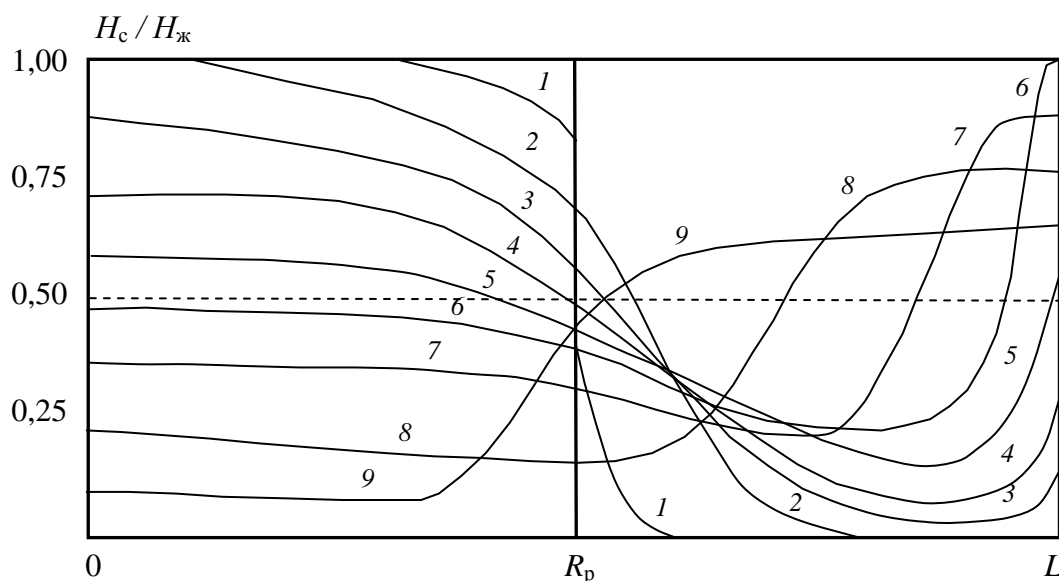


Рисунок 2.1 – Типичные кривые, определяющие профиль потока жидкости в последовательные моменты времени с шагом 0,5 с и взаимодействие его с преградой при разрушении РВС ($R_p = 10$ м; $H_{\text{ж}} = 10$ м; $L = 20$ м)

На рисунке 2.1 видны основные стадии процесса: распространение потока жидкости в направлении преграды с понижением уровня жидкости в резервуаре; воздействие волны на преграду и резкий подъем жидкости вверх, вдоль нее; образование обратного потока жидкости, отраженного от преграды и стремящегося к центру резервуара, где в это время образовался глубокая впадина. Максимальная высота подъема жидкости на преграде составляла в этом случае 5,3 м. Именно при такой высоте преграды должен исключаться перелив жидкости за нее. Аналогичный вид имела волна прорыва и в остальных случаях, как плоских, так и радиальных.

При расчетах изменялся единственный безразмерный параметр L/R_p , определяющий положение преграды по отношению к резервуару. На рисунке 2.2 сплошной линией представлена зависимость безразмерной высоты стены $H_c/H_{ж}$, необходимой для предотвращения перелива потока жидкости, от безразмерного расстояния L/R_p . Пунктирной линией обозначена зависимость безразмерной высоты преграды, рассчитанной на гидростатическое давление вылившейся из резервуара жидкости [41].

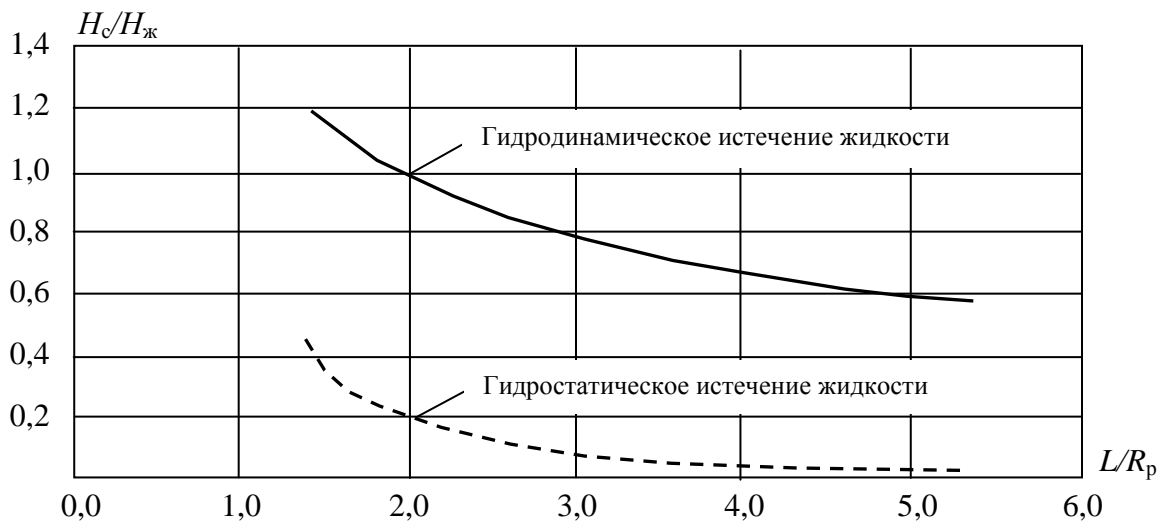


Рисунок 2.2 – Зависимость высоты стены от расстояния до места ее расположения от резервуара

В результате произведенных расчетов показано, что высота защитных преград должна быть значительно больше нормативных, а на малых расстояниях до резервуара ее высота может достигать уровня жидкости в резервуаре до аварии. Таким образом, сделан вывод об экономической нецелесообразности проектирования и строительства таких вертикальных преград, и дальнейшие исследования необходимо направить на уменьшение их высоты, в частности, за счет обустройства волноотражающего козырька.

Экспериментальная проверка обоснованности разработанной математической модели (см. систему уравнений 2.1) и полноты учета в ней основных факторов, определяющих характер изучаемого процесса, была произведена на разработанном лабораторном стенде, принципиальная схема которого показана на рисунке 2.3 [86].

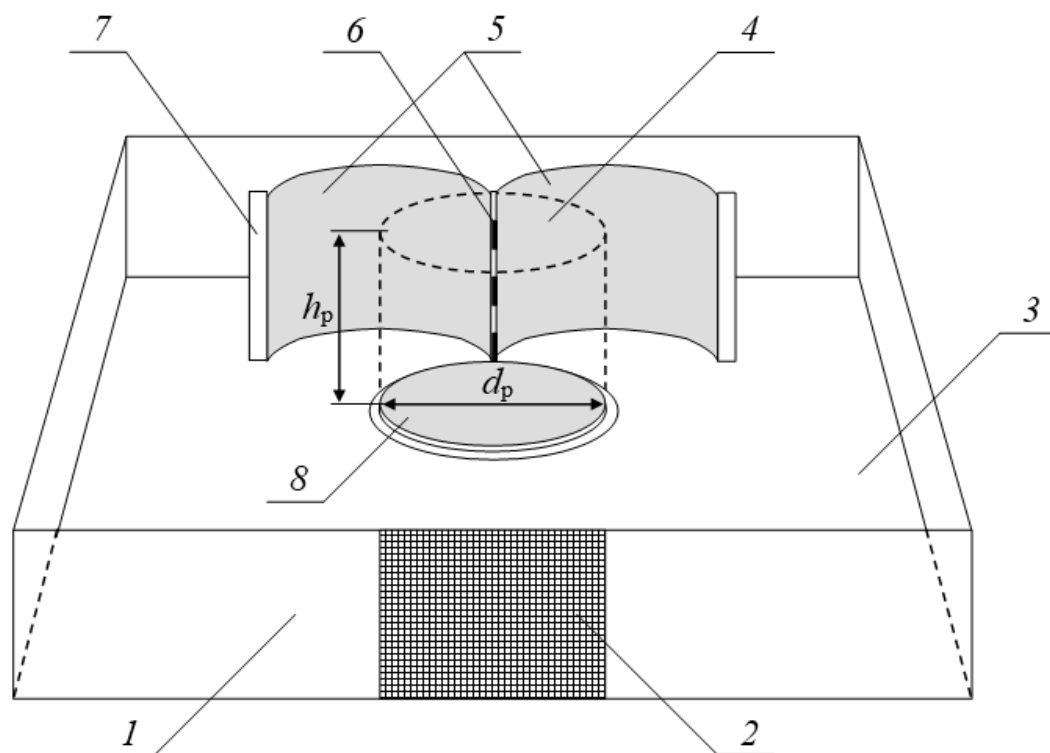


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема лабораторного стенда

Стенд имел неподвижное горизонтальное основание 3, по периметру которого была установлена скользящая опалубка (преграда) 1, имитирующая обвалование. Для измерения высоты поднятия жидкости на внутреннюю поверхность стены была нанесена координатная сетка 2. Внутри каре устанавливалась модель натурального резервуара 4. Боковые поверхности резервуара (стенки) 5 были изготовлены в виде двух полуцилиндров, соединенных между собой поворотным механизмом 6, обеспечивающим их раскрытие на 180° . Разъемное замковое устройство 7 воспроизводило разрушение резервуара по вертикали. В собранном виде элементы резервуара образовывали замкнутую цилиндрическую оболочку, установленную на круглое днище 8 и скрепленную с ним стержнем от поворотного механизма.

В качестве натурального был выбран резервуар типа РВС-2000 м^3 (диаметр $D_p = 15$ м; высота $H_p = 12$ м). При масштабе моделирования 1:30, параметры модельного резервуара 4 соответственно составили: $d_p = 0,5$ м; $h_p = 0,4$ м.

Модельный резервуар, предназначенный для многократного воспроизведения процессов и явлений, имеющих место при разрушении резервуара, обеспечивал: герметичность конструкции при заполнении ее жидкостью; имитацию разрушения резервуара по вертикальному шву с раскрытием стенок под действием напора жидкости на 180 градусов; образование потока жидкости и его воздействие на защитные преграды различной конфигурации.

Размер горизонтального основания стенда 3 составлял 3000×3000 мм, что позволяло устанавливать модельный резервуар на необходимом расстоянии L в диапазоне от 0,2 до 2 диаметров резервуара, то есть в области практического применения преград. Защитная стена, выполненная в виде скользящей опалубки, была способна перемещаться вверх и вниз, что позволяло определять искомую высоту H_c , при которой происходило полное удержание потока жидкости.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. Модель резервуара устанавливали на заданном расстоянии от преграды и заполняли жидкостью до определенного уровня. Имитировали разрушение резервуара. Процесс воздействия потока жидкости на защитную преграду фиксировали цифровой видеокамерой, а высоту ее подъема – с помощью координатной сетки. Если жидкость перехлестывала через защитную преграду, то высоту преграды увеличивали и эксперимент повторяли. Таким образом, находили минимальную высоту преграды, при которой полностью обеспечивалось удержание волны.

Каждый опыт повторяли не менее пяти раз, при этом относительная погрешность измерений не превышала 5 %. В качестве опытной жидкости использовали воду, так как по результатам анализа статистических данных было установлено, что взаимодействие потока с преградами при разрушении резервуаров при прочих равных условиях существенно не зависело от вида хранившейся в нем жидкости [86].

На рисунке 2.4 представлены графики зависимостей высот экспериментальной и теоретической вертикальных преград, необходимых для 100 % удержания потока при разрушении резервуара.

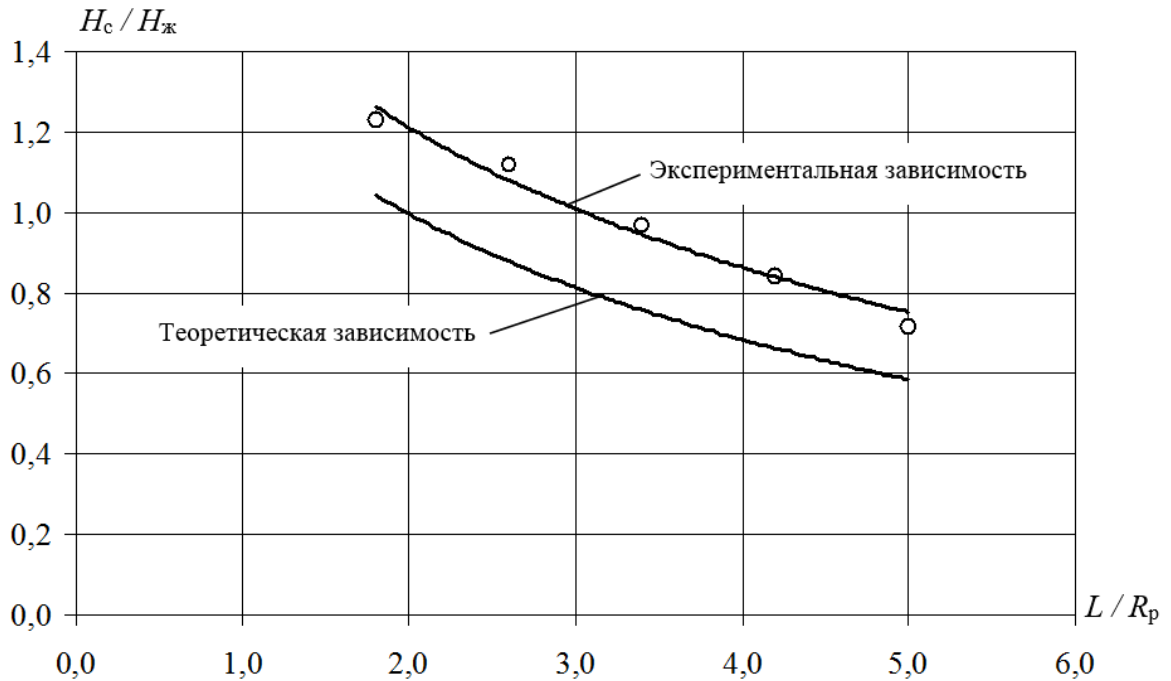


Рисунок 2.4 – График сравнения экспериментальных и теоретических данных

Представленные на рисунке 2.4 экспериментальные данные показали их удовлетворительную сходимость с расчетными значениями. Относительное расхождение одноименных величин не превышало 20 %. В тоже время из графиков видно, что все экспериментальные точки располагаются над одноименными расчетными точками, то есть полученная экспериментальная высота подъема жидкости превышала расчетное значение. Это обстоятельство объяснялось тем, что при проведении исследований имело место образование отраженной волны от раскрывшихся стенок модельного резервуара, движение которой вместе с основной волной прорыва в сторону обвалования приводило к увеличению энергии набегающего потока жидкости на преграду, и как следствие, к увеличению высоты подъема жидкости.

В дальнейшем для определения эффективности конструкции защитной преграды были проведены эксперименты со стенами, наклоненными под углами 45° и 60° к горизонту, что соответствует углам откоса нормативного (земляного) обвалования. Однако значительного эффекта от таких конструкций получено не было. Поэтому, для снижения высоты вертикальной стены было предложено оборудовать ее волноотражающим козырьком (рисунок 2.5).

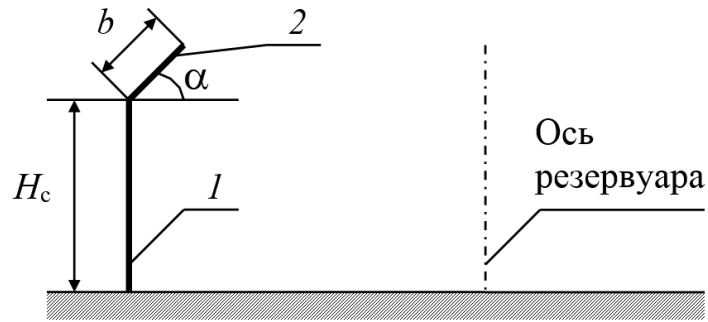


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема защитной стены (1) с волноотражающим козырьком (2)

При проведении исследований варьировали высоту стены ограждения H_c , угол наклона волноотражающего козырька к горизонту $30^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$ и длину его вылета $0,02 \text{ м} \leq b \leq 0,04 \text{ м}$. В результате выполненных экспериментов было установлено, что высота защитной стены меняется в зависимости от длины козырька, угла его наклона, а также от расстояния L . При угле наклона 75° высота защитной стены с козырьком близка к высоте вертикальной стены без козырька. При угле наклона 30° высота стены меньше, но остается достаточно большой для практического применения. Наиболее эффективный угол наклона козырька при фиксированной его длине находится в диапазоне от 45° до 60° (рисунок 2.6).

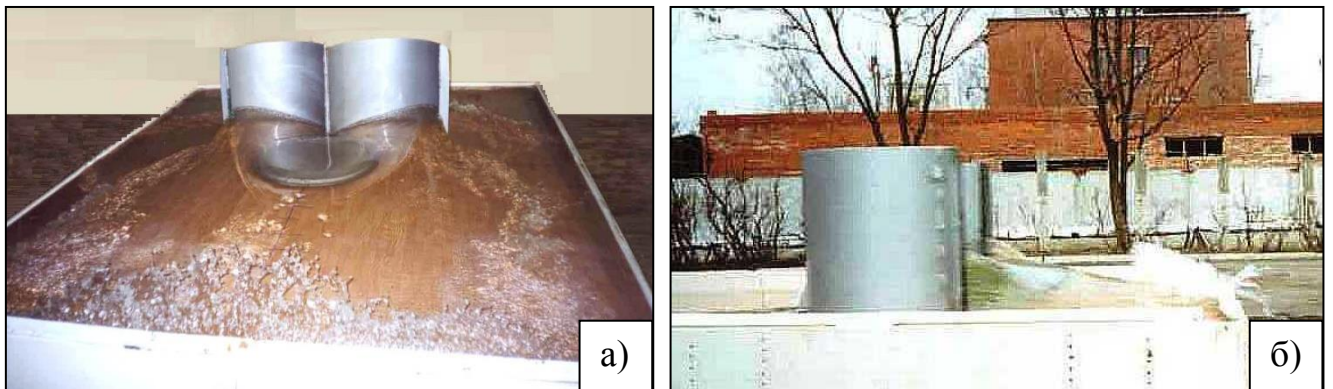


Рисунок 2.6 – Фрагменты удержания волны прорыва защитной стеной с волноотражающим козырьком: а) $\alpha = 45^\circ$; б) $\alpha = 60^\circ$

В результате обработки экспериментальных данных была найдена эмпирическая зависимость высоты защитной стены от длины волноотражающего козырька и угла его наклона вида:

$$\frac{H_c}{H_{ж}} = -0,0664 \frac{a_2^2}{\sqrt{a_3}} + 0,1967 \frac{1}{a_1^{1,5}} \sqrt{\frac{a_2}{a_3}} + 0,0371 \frac{a_1 a_2}{a_3}, \quad (2.2)$$

где $a_1 = f_1(\alpha)$, $a_2 = f_2(b/H_{ж})$, $a_3 = f_3(L/R_p)$ – переменные, зависящие от угла наклона козырька, его длины и расстояния от преграды до стенки резервуара соответственно.

Вследствие того, что наиболее эффективным с точки зрения отражения волны является угол наклона козырька в 45° , то для практического применения полученная зависимость (2.2) была трансформирована в зависимость вида:

$$\frac{H_c}{K_3 H_{ж}} = -0,0664 \frac{a_1^2}{\sqrt{a_2}} + 0,0871 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} + 0,0639 \frac{a_1}{a_2}, \quad (2.3)$$

где K_3 – коэффициент запаса, который рекомендуется принимать равным 1,1 для резервуаров вместимостью не более 5000 м^3 и равным 1,2 для резервуаров большей вместимости;

$a_1 = f_1(b/H_{ж})$, $a_2 = f_2(L_1/R_p)$ – переменные, зависящие от длины вылета волноотражающего козырька и расстояния от центра резервуара до ограждающей стены, соответственно равные:

$$a_1 = 15,2 \frac{b}{H_{ж}} + 0,485; \quad a_2 = \lg \left(\frac{L_1}{R_p} \right).$$

Длину вылета волноотражающего козырька рекомендуется принимать:

- для резервуаров вместимостью до 700 м^3 – не менее 0,5 м;
- для резервуаров вместимостью от 700 до 5000 м^3 – не менее 1,0 м;
- для резервуаров вместимостью от 5000 до 50000 м^3 – не менее 1,5 м.

Таким образом, зависимость (2.3) позволяет на основании эксплуатационных характеристик РВС объемом от 700 до 50000 м^3 найти оптимальную высоту ограждающей стены при соответствующей длине волноотражающего козырька (при $\alpha = 45^\circ$) в зависимости от расстояния до стенки резервуара в диапазоне от 3 до 30 м, то есть получить исходные данные для проектирования преграды.

Общая принципиальная схема ограждающей стены с волноотражающим козырьком приведена на рисунке 2.7.

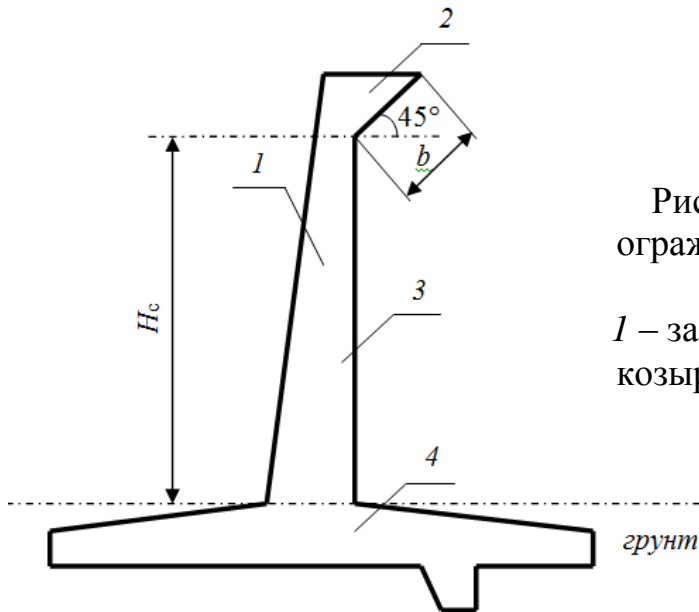


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема ограждающей стены с волноотражающим козырьком:
1 – защитная стена; 2 – волноотражающий козырек; 3 – площадка отражения потока; 4 – основание стены

Важно указать, что результаты работ [60] и [86] были использованы в дальнейшем при разработке ГОСТ Р 53324-2009 «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности» [83]. Однако, анализируя полученные в работах [60], [86] результаты применительно к рассматриваемым в настоящей работе РВСЗС необходимо отметить следующее. Защитная стенка таких типов резервуаров, как отмечалось ранее, должна располагаться на малых расстояниях от основной стенки резервуара (не менее 1,8 м). Тогда отношение L/R_p для большинства типов РВС (номинальной вместимостью от 1000 до 50000 м³) будет находиться в диапазоне от 1,06 до 1,35, то есть в неисследованной области (см. рисунок 2.4). Кроме этого, на высоту защитной стенки может оказывать существенное влияние особенность ее геометрической формы, а именно, вогнутость стенки по отношению к набегающему при разрушении РВС потоку жидкости, что в целом и требует проведения дальнейших исследований.

В другой работе [61] представлены результаты расчетов по влиянию обвалования на растекание горючей жидкости при разрушении резервуара. Математическая модель, позволяющая оценить долю жидкости, перелившейся через обвалование при разрушении резервуара, содержала следующие допущения:

рассматривалась плоская одномерная задача; время разрушения резервуара принималось много меньше характерного времени движения гидродинамической волны до обвалования; жидкость принята невязкой; трением жидкости о поверхность земли пренебрегали; поверхность земли являлась плоской, горизонтальной.

Система уравнений, описывающих движение жидкости, имела вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h - h_G)u] = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{u^2}{2} + gh\right) = 0, \end{cases} \quad (2.4)$$

где h – высота столба жидкости над фиксированным уровнем, м;

h_G – высота подстилающей поверхности над фиксированным уровнем, м;

u – средняя по высоте скорость движения столба жидкости, м/с;

x – координата вдоль направления движения жидкости, м;

t – время, с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Граничные условия с учетом геометрии задачи (рисунок 2.8) имели вид:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad u|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=b} = 0; \quad u|_{x=b} = \begin{cases} g^{1/2}(h-a)^{3/2}/h, & \text{если } h > a; \\ 0, & \text{если } h \leq a, \end{cases} \quad (2.5)$$

где a – высота обвалования.

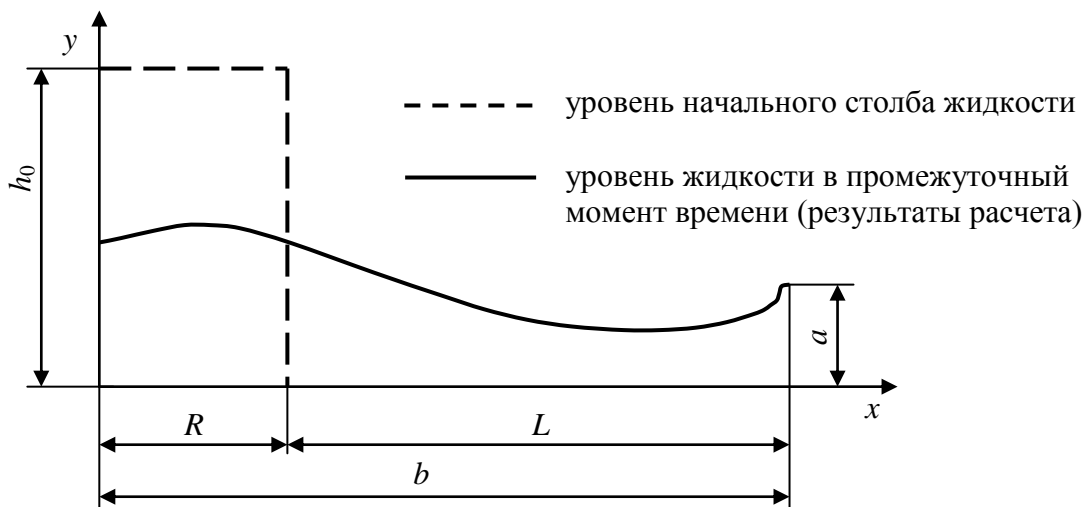


Рисунок 2.8 – Типичная картина движения жидкости в обваловании при разрушении резервуара

Массовая доля жидкости Q (%), перелившейся через обвалование к моменту времени T , описывается выражением:

$$Q = 100 \frac{\int_0^T u_N (h_N - a) dt}{h_0 R}, \quad (2.6)$$

где u_N – средняя по высоте скорость движения столба жидкости при $x = b$, м/с;

h_N – высота столба жидкости при $x = b$, м;

h_0 – начальная высота столба жидкости в резервуаре, м;

R – ширина резервуара, м.

Численное решение системы (2.4) с граничными условиями (2.5) было найдено с использованием схемы Мак-Кормака, представляющей собой частный случай явной схемы типа «предиктор – корректор».

На рисунке 2.9 представлен график указанной функции, который, по мнению авторов работы, является достаточным для использования в практических целях, а также аналогичный график, но полученный в результате экспериментальных исследований и заимствованный из работы [87].

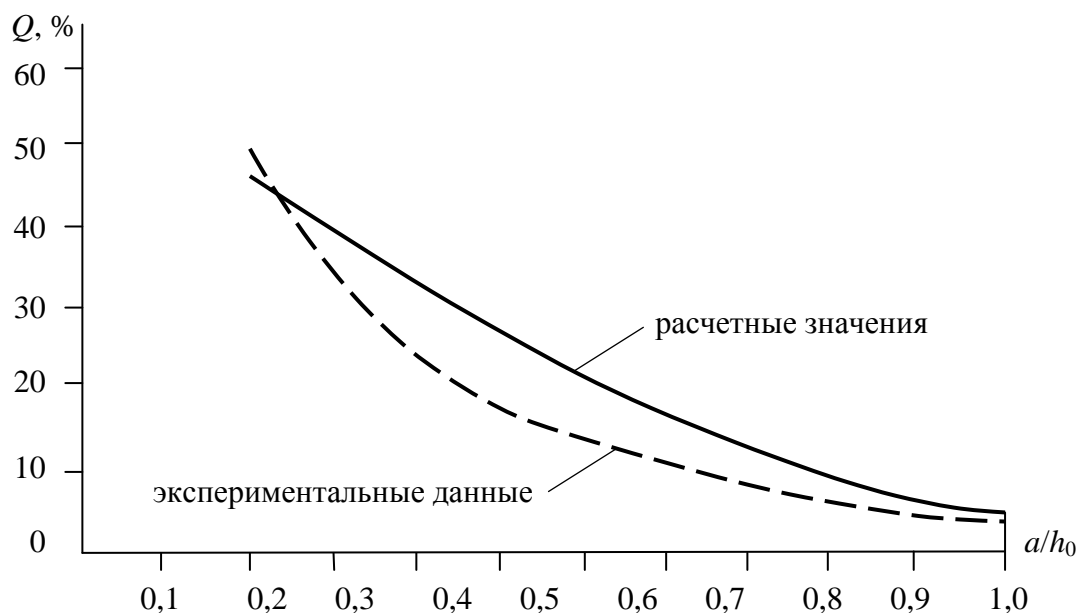


Рисунок 2.9 – Зависимость доли перелившейся через обвалование жидкости (Q) от параметров a/h_0

Важно отметить, что указанная на рисунке 2.9 зависимость нашла отражение в ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» [88] и в «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [89] и должна использоваться, в частности, при оценке пожарных рисков на объектах хранения нефти и нефтепродуктов в РВС. Однако анализируя данную зависимость можно видеть, что для оценки доли перелившейся через обвалование жидкости не используется такой важный параметр как расстояние от стенки резервуара до обвалования, который, безусловно, будет оказывать непосредственное влияние на искомую величину.

Кроме этого, при рассмотрении сценария разрушения крупногабаритного резервуара, например РВСЗС-20000 м³, с максимальным уровнем жидкости 18,0 м и высотой защитной стенки 14,4 м (80 % от первоначального уровня жидкости в резервуаре), то есть отношение $a/h_0 = 0,8$, доля перелившейся через обвалование жидкости составит $Q \approx 13$ % или 2600 м³. Очевидно, что перелив такого большого количества горючей жидкости через ограждающую стену может привести к значительной площади пролива (площади возможного пожара) и серьезным негативным последствиям. При этом увеличение высоты ограждения даже до первоначального уровня жидкости в резервуаре (18,0 м) не приведет к существенному изменению обстановки, поскольку сохраняется вероятность перелива около 8 % жидкости или 1600 м³. В этих условиях, по всей видимости, роль ограничения распространения возможного пожара пролива горючей жидкости должны сыграть дополнительные защитные мероприятия, например, дополнительное обвалование (стенка) или повышенная над уровнем пролитой жидкости планировочная отметка проезжей части автомобильных дорог в резервуарном парке. Однако требования к обустройству таких мероприятий при проектировании РВСЗС в настоящее время отсутствуют, что также указывает на необходимость продолжения исследований в этой области. Отметим также, что использование зависимости, представленной на рисунке 2.9, при рассмотрении аварийных ситуаций, связанных с РВСЗС, требует отдельного обоснования.

В другой работе [90], посвященной разработке дополнительных защитных преград в виде рвов различной конфигурации или вертикальных стен для снижения пожарной опасности разлива нефти и нефтепродуктов при разрушениях РВС, обустройстваемых за пределами нормативных земляных обвалований или ограждающих стен, также рассматривалась плоская одномерная задача о взаимодействии потока жидкости с защитной преградой.

Принималось, что между двумя створами $x = -r$; 0 имеется канал, заполненный жидкостью с постоянной глубиной H_p (рисунок 2.10). На расстоянии $x = L$ расположена вертикальная стена высотой a . В начальный момент времени $t = 0$ створ канала с координатой $x = 0$ мгновенно разрушается, и покоящаяся до этого жидкость приходит в движение в направлении вертикальной стены. Необходимо было определить степень перелива (долю жидкости, которая выйдет за пределы преграды при разрушении резервуара).

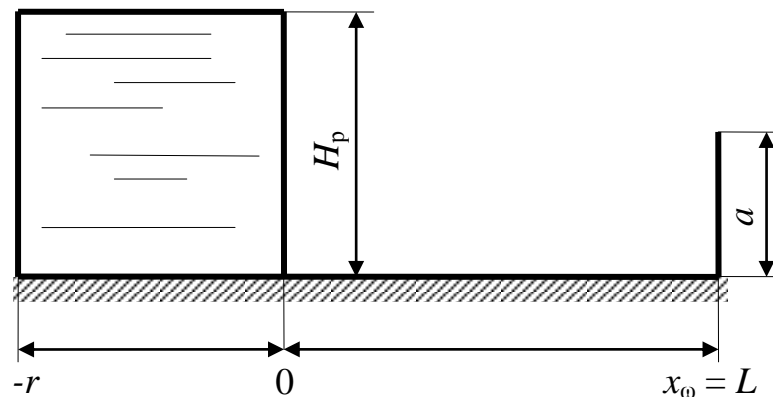


Рисунок 2.10 – Схема резервуара и вертикальной стены нормативной высоты

Система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих движение жидкости, имела вид:

$$\begin{cases} 2\left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x}\right) + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + 2c \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (2.7)$$

где u – осредненная скорость потока по глубине;

$c = \sqrt{gh}$ – местная скорость звука;

g – ускорение свободного падения;

h – глубина потока;

x – координата;

t – время.

При решении задачи были приняты следующие допущения: рассматривалась одномерная задача; движение жидкости происходит в канале прямоугольного сечения; время разрушения резервуара много меньше характерного времени движения потока жидкости до преграды; жидкость является невязкой; трение жидкости о подстилающую поверхность отсутствует; поверхность канала является плоской; уклон канала постоянен и равен нулю.

Начальные условия имели следующий вид:

$$\begin{aligned} u(x;0) &= 0; \\ -r \leq x &\leq 0 \\ c(x;0) &= \sqrt{gH_p}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} u(x;0) &= 0; \\ 0 < x &\leq L \\ c(x;0) &= 0. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Граничное условие на вертикальной стене ($x = L$):

$$u = \frac{(c^2 - c_0^2)^{3/2}}{c^2} H(c - c_0), \quad (2.10)$$

где $c_0 = \sqrt{ga}$, $H(c - c_0)$ – функция Хэвисайда, которая использовалась для включения различных граничных условий в одну формулу:

$$H(c - c_0) = \begin{cases} 1, & (c - c_0) > 0; \\ 0, & (c - c_0) \leq 0. \end{cases} \quad (2.11)$$

Граничное условие на левой створке канала ($x = -r$):

$$u = 0. \quad (2.12)$$

Для решения данной задачи был разработан алгоритм расчета, в основу которого положен метод характеристик с фиксированным шагом сетки по времени (схема Хартри), и программа для ЭВМ, позволяющая определять значения степени перелива, максимального подъема жидкости на стену, а также выводить графики местной скорости звука, осредненной скорости потока и его глубины во времени.

Теоретические расчеты были подтверждены результатами экспериментальных исследований с использованием модельного резервуара, который ранее использовался в работе [86]. В результате выполненных исследований был разработан метод определения геометрических параметров дополнительной защитной стены, который нашел свое применение при разработке ГОСТ Р 53324-2009 [83].

Важно также отметить работу [91], в которой описан уникальный эксперимент, связанный с квазимгновенным разрушением натурального резервуара типа РВС-700 м³ с водой на Филатовской нефтебазе ОАО «Липецк – Терминал», предназначенной для хранения и отпуска светлых нефтепродуктов.

На территории нефтебазы располагались: резервуарный парк, операторная, насосная станция, сливноналивная автомобильная эстакада, административное здание. Производственная площадка объекта частично заасфальтирована, резервуарный парк имел грунтовое покрытие и состоял из восьми РВС-700 м³, расположенных в два ряда. По периметру парка устроено замкнутое земляное обвалование шириной поверху от 0,8 до 1,0 м и высотой 1,5 м, рассчитанное на гидростатическое давление разлившейся жидкости. В качестве аварийного амбара на нефтебазе использовался вырытый внутри каре обвалования со стороны РВС № 8 котлован (рисунки 2.11–2.13).

Для разрушения был выбран РВС № 8, который перед проведением эксперимента заполнили водой на 0,95 % объема. Расстояние от стенки РВС до подошвы внутренних откосов обвалования составляло 12 м.



Рисунок 2.11 – Общий вид резервуарного парка нефтебазы



Рисунок 2.12 – Общий вид аварийного амбара со стороны РВС № 8



Рисунок 2.13 – Общий вид резервуаров в каре земляного обвалования

В целях получения эффекта квазимгновенного разрушения РВС его раскрытие проводилось путем взрыва шнурового заряда, проложенного вертикально на всю высоту стенки РВС. Для оценки последствий взаимодействия волны с преградой и площади пролива разрушение РВС произвели со стороны земляного обвалования парка (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Кадры видеосъемки полного разрушения РВС-700 м³ с водой

На кадрах видеосъемки (рисунок 2.14) отчетливо прослеживаются основные стадии процесса (1–8): распространение потока в направлении обвалования, сопровождающееся понижением уровня жидкости в РВС; удар волны об обвалование и резкий выброс жидкости вверх и вдоль него; образование частичного обратного вала жидкости, отраженного от преграды и распространяющегося по направлению к центру РВС; перехлест основной массы жидкости через обвалование с разливом на значительной площади (до 5200 м²).

Результаты проведенного эксперимента подтвердили характер взаимодействия образовавшегося потока жидкости с земляным обвалованием. Основная масса жидкости перехлестнула через обвалование, частично размыв его гребень. Следует отметить, что ширина потока, подходящего к обвалованию, примерно соответствует диаметру резервуара. Затем происходит резкое увеличение ширины потока, особенно в направлении наибольшего уклона площадки. По мере своего продвижения поток частично разрушил обвалование, опрокинул фундаментный блок ФБС 24-5-6 массой 1,63 т и плиту перекрытия ПК 60-12-8 массой 2,15 т, до эксперимента установленные на обваловании, повредил и сдвинул с фундамента соседние резервуары № 6 и № 7, разрушил ограждение и вышел за пределы территории объекта.

Эксперимент также подтвердил и выявленные в ходе анализа статистических данных [4], [92], [93] особенности разрушения конструкции РВС (рисунок 2.15). Так, после разрушения резервуара по вертикали на всю высоту стенка отрывается от днища и крыши, и разворачивается на 180°. Резервуар сдвигается с основания в противоположную от истечения сторону. Крыша резервуара обрушивается на фундамент, при этом потоком жидкости и стенками аварийного резервуара повреждаются соседние резервуары. Следует отметить, что воздействие опасных факторов при таком сценарии аварии (волна прорыва, тепловое излучение) проявляется за считанные секунды. Этого времени недостаточно для обнаружения персоналом объекта инцидента и, как следствие, принятия мер для собственной безопасности и, тем более, соответствующих действий по ограничению пролива часто горячей нефти или нефтепродукта.

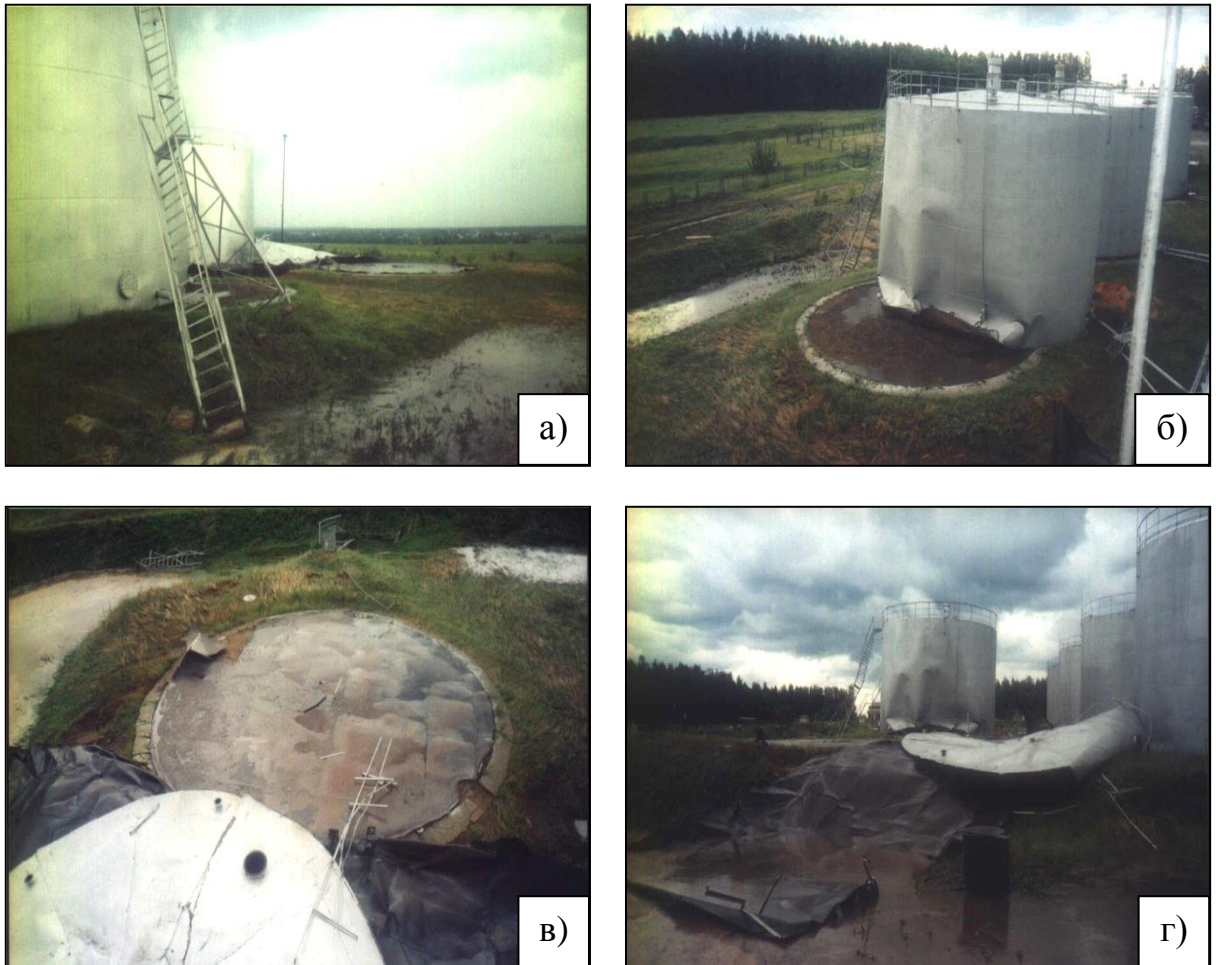


Рисунок 2.15 – Последствия полного разрушения РВС-700 м³ с водой:
 а) повреждение волной и стенками аварийного резервуара соседних РВС № 6 и 7;
 б) повреждение волной соседнего РВС № 6; в) положение дна РВС № 8
 после разрушения; г) положение стенок и крыши РВС № 8 после разрушения

По результатам исследований сделан общий вывод о том, что на объектах, в состав которых входят резервуары и резервуарные парки, должны быть заранее предусмотрены мероприятия противоаварийной и противопожарной защиты, адекватные рассматриваемой аварийной ситуации, разработке которых и должны быть посвящены дальнейшие исследования.

Из зарубежных исследований, непосредственно связанных с рассматриваемыми в настоящей диссертации вопросами, можно выделить работу [87], в которой приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению доли жидкости, перелившейся через защитную преграду при разрушении резервуара.

Авторами также рассматривалась плоская одномерная задача: между двумя створами $x = -r; 0$ имеется канал, заполненный жидкостью с постоянной глубиной H_p . На расстоянии $x_0 = L$ расположена вертикальная стенка определенной высоты a . В начальный момент времени $t = 0$ створ канала с координатой $x = 0$ мгновенно разрушается, и покоящаяся до этого жидкость приходит в движение в направлении вертикальной стенки. Решение сформулированной задачи достигалось с помощью использования основных положений теории «мелкой воды», которые успешно применяется для решения задач о разрушении плотин. Нелинейные уравнения «мелкой воды», в сущности, являются выражением законов сохранения массы и импульса. Система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих движение жидкости, имела аналогичный системе уравнений (2.7) вид, при этом граничные условия записывались несколько сложнее.

Лабораторная установка, на которой в работе [87] проводилось изучение процесса взаимодействия потока жидкости с преградами, обладала следующими характеристиками:

- емкость имела форму куба с размером грани равным 9 дюймам (22,86 см);
- разрушение резервуара имитировалось быстрым поднятием вверх одной из стенок куба;
- движение жидкости происходило в канале прямоугольного сечения.

Исходя из этого описания видно, что установка имела ряд существенных недостатков, в частности:

1) не обеспечивалось условие геометрического подобия исследуемых объектов: кубическая форма в экспериментах; цилиндрическая – у натуральных резервуаров;

2) жидкость приходила в движение под действием силы тяжести при резком подъеме вверх одной из граней кубической емкости. Такое движение жидкости хорошо изучено в гидравлике и имеет название «истечение из-под щита» [94]. Однако оно противоречит движению потока, образуемому при разрушении натурального цилиндрического резервуара, о чем говорилось ранее [4], [92], [93];

3) вследствие движения потока жидкости в прямоугольном русле не учитывалось характерное распластывание волны по трассе растекания.

Необходимо отметить, что, несмотря на утверждение авторов данной работы об удовлетворительной сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, возникают существенные сомнения в возможности их применения на практике при рассмотрении аварий резервуаров типа РВС.

В качестве общих выводов по данному разделу можно отметить:

1) вопросы движения потока жидкости при разрушении резервуара для решения частных задач достаточно успешно могут решаться как теоретически, так и экспериментально;

2) для получения численного решения задач о движении потока жидкости и его влиянии на защитные преграды необходимо введение в исходные системы уравнений большого количества допущений и упрощений, составление алгоритмов, реализация которых возможна только с применением ЭВМ, при этом необходимо иметь в виду, что могут наблюдаться значительные (до 50 %) расхождения между теорией и практикой;

3) для экспериментальных исследований изучаемого процесса, в первую очередь, необходимо соблюдение геометрического подобия резервуаров и условий моделирования гидравлических явлений, в противном случае, возникают сомнения о возможности применения полученных результатов на практике;

4) при создании лабораторного стенда необходимо использовать результаты натурного опыта по разрушению РВС-700 м³, в частности, для соблюдения критериев подобия для потоков в натуре и на модели, что, в конечном счете, и будет обуславливать достоверность полученных результатов.

На основании результатов анализируемых работ, а также с учетом выше изложенных критических замечаний, для достижения поставленной в настоящей работе цели принят лабораторно-экспериментальный метод исследования характеристик потока жидкости, образующегося при разрушении внутреннего резервуара, и его влияние на защитную стенку для установления ее оптимальных геометрических параметров.

2.2 Критерии подобия и условия моделирования гидравлических явлений для создания лабораторного стенда

Движение жидкости в природе совершается под действием различных сил: тяжести, давления, трения (сопротивления), поверхностного натяжения, упругости. Каждая из этих сил выражается через физические величины (размерные коэффициенты), характеризующие природу сил и жидкости [94]–[96].

Влияние указанных сил проявляется в неодинаковой степени в различных явлениях. Одни явления протекают под преобладающим действием сил тяжести и сопротивления, другие – сил тяжести, сопротивления и поверхностного натяжения и т.д. Условия гидродинамического подобия модели и природы требуют равенства в них отношений всех сил, под действием которых протекает явление. Однако, вследствие физических особенностей действующих сил, например, при рассмотрении установившегося одноразмерного движения жидкости необходимо одновременно выдержать масштаб:

$$\text{- массовых сил } \frac{u_M^2}{g_M l_M} = \frac{u_H^2}{g_H l_H} \text{ (число или критерий Фруда, Fr);}$$

$$\text{- масштаб сил давления } \frac{p_M}{\nu_M} : \frac{u_M^2}{2g_M} = \frac{p_H}{\nu_H} : \frac{u_H^2}{2g_H} \text{ (число или критерий Эйлера, Eu);}$$

$$\text{- масштаб сил вязкости } \frac{u_M l_M}{\nu_M} = \frac{u_H l_H}{\nu_H} \text{ (число или критерий Рейнольдса, Re),}$$

выполнить равенство отношений всех сил в модели и в природе практически невозможно (здесь и далее: индексы «н» и «м» относятся соответственно к природе и модели; u – скорость потока; g – ускорение свободного падения; l – характерный линейный размер; p – сила давления; ν – кинематическая вязкость жидкости). Поэтому, на основе соотношения сил, определяющих явление или преобладающих в данном явлении, находят частные условия подобия, для чего устанавливают так называемые критерии подобия, выражающие условия подобия в случае, когда в качестве преобладающих выступает одна из действующих сил.

Поскольку в исследуемых процессах, связанных с образованием и движением волны прорыва при разрушении резервуара, главную роль играют силы тяжести, то должно обеспечиваться соблюдение равенства критерия Фруда в соответствующих точках потоков по трассе растекания [97]–[102]:

$$\text{Fr} = \frac{u_{\text{м}}^2}{g_{\text{м}} h_{\text{м}}} = \frac{u_{\text{н}}^2}{g_{\text{н}} h_{\text{н}}}, \quad (2.13)$$

где $u_{\text{м}}$, $u_{\text{н}}$ – характерная скорость волны прорыва (местная скорость или скорость фронта волны), м/с;

$h_{\text{м}}$, $h_{\text{н}}$ – характерная высота (ширина) волны прорыва, м.

Этот критерий служит основой для получения расчетных формул подобия, по которым производится расчет модели на основе данных натуральных измерений и пересчет всех основных физических характеристик потока на натуре по результатам модельных исследований. Ниже представлены масштабные множители (a) для основных физических характеристик, отвечающих условиям гравитационного подобия, принимая во внимание, что на модели и в натуре жидкость одна и та же – вода (удельный вес $\gamma_{\text{н}} = \gamma_{\text{м}}$, плотность $\rho_{\text{н}} = \rho_{\text{м}}$, $a_{\gamma} = 1$, $a_{\rho} = 1$), а также $g_{\text{н}} = g_{\text{м}}$, $a_g = 1$:

для скоростей

$$a_u = \frac{u_{\text{н}}}{u_{\text{м}}} = \sqrt{\frac{g_{\text{н}} l_{\text{н}}}{g_{\text{м}} l_{\text{м}}}} = \sqrt{a_g} \sqrt{a_l} = \sqrt{a_l}; \quad (2.14)$$

для времени протекания подобных процессов

$$a_t = \frac{a_l}{a_u} = \frac{a_l}{\sqrt{a_g} \sqrt{a_l}} = \frac{\sqrt{a_l}}{\sqrt{a_g}} = \sqrt{a_l}. \quad (2.15)$$

Вследствие того, что процесс движения волны прорыва при разрушении резервуара представляет собой быстроизменяющееся неустановившееся движение жидкости, то необходимо соблюдение также тождественности критерия Струхалея (критерия гомохронности) [97]–[102]:

$$\text{Sh} = \frac{u_M t_M}{h_M} = \frac{u_H t_H}{h_H}, \quad (2.16)$$

где t_H, t_M – характерное время процесса, с.

При моделировании необходимо обращать особое внимание также на выбор масштаба модели, исходя из требований соблюдения следующих условий подобия гидравлических явлений, вытекающих из законов подобия [95], [98]:

- если поток в натуре турбулентный, то он должен быть турбулентным и в модели, то есть $\text{Re}_M > \text{Re}_{\text{кр}}$ (здесь Re_M – критерий Рейнольдса в модели; $\text{Re}_{\text{кр}}$ – критическое значение критерия Рейнольдса при моделировании открытых потоков, принимаемое, как правило, не менее 10^4 [94], [100]):

$$\text{Re}_M = \frac{u_M h_M}{\nu_M}, \quad (2.17)$$

где ν_M – кинематическая вязкость жидкости (в данном случае для воды при $20\text{ }^\circ\text{C}$ – $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [103]);

- при моделировании турбулентных потоков, основываясь на опытных исследованиях, минимально допустимый масштаб модели определяется по зависимости [95], [98]:

$$\lambda_{\text{мин}} = (30 \div 50) \sqrt[3]{u_H^2 h_H^2}; \quad (2.18)$$

- влияние поверхностного натяжения должно быть настолько малым, чтобы оно не препятствовало образованию волн, в связи с чем, скорость потока со свободной поверхностью на модели должна быть более 0,23 м/с. В противном случае необходимо увеличивать масштаб модели, так как иначе подобие не будет достигнуто [95].

Таким образом, соблюдение выше рассмотренных критериев подобия и условий моделирования позволит разработать лабораторный стенд для изучения волны прорыва и ее воздействия на защитную стенку с целью нахождения ее оптимальных геометрических параметров.

2.2.1 Оценка параметров потока при разрушении натурального резервуара номинальным объемом 700 м³

Для получения соответствующих критериев подобия необходимо, прежде всего, иметь данные о параметрах потока при натуральных измерениях. С целью нахождения этих параметров использовались имеющиеся на кафедре пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России видеоматериалы натурального эксперимента по разрушению РВС-700 м³ с водой (см. раздел 2.1), который, в дальнейшем, и был выбран за основу создания модельного резервуара и лабораторного стенда.

Так, имея в наличии видеоролик натурального эксперимента по разрушению РВС-700 м³ продолжительностью 90 с, была произведена его полная раскадровка (2700 кадров). Далее, на трассе растекания потока от стенки резервуара были выбраны характерные участки соответственно длиной $l_n = 6, 9, 12, 14,5$ и 16 м. По достижению фронтом волны соответствующего участка определяли количество кадров, что, в конечном счете, давало возможность оценить время и скорость фронта волны. На рисунке 2.16 представлены характерные кадры видеосъемки полного разрушения резервуара с образованием волны и ее перехлестом через земляное обвалование в соответствующие моменты времени.

В таблице 2.1 приведены результаты измерений основных параметров потока при разрушении натурального резервуара, а также вычислений по формулам (2.13), (2.16) соответствующих критериев подобия.

Таблица 2.1 – Параметры потока при разрушении РВС-700 м³ с водой и соответствующие критерии подобия

$l_n, \text{ м}$	$t_n, \text{ с}$	$u_n, \text{ м/с}$	Fr_n	Sh_n
6,0	0,533	11,25	12,90	6,00
9,0	0,733	12,27	15,35	9,00
12,0	1,200	10,00	10,19	12,00
14,5	1,600	9,06	8,37	14,50
16,0	2,000	8,00	6,52	16,00



№ кадра 226

$$l_{\text{H}} = 6,0 \text{ м}$$

$$t_{\text{H}} = 0,533 \text{ с}$$



№ кадра 232

$$l_{\text{H}} = 9,0 \text{ м}$$

$$t_{\text{H}} = 0,733 \text{ с}$$



№ кадра 246

$$l_{\text{H}} = 12,0 \text{ м}$$

$$t_{\text{H}} = 1,200 \text{ с}$$



№ кадра 258

$$l_{\text{H}} = 14,5 \text{ м}$$

$$t_{\text{H}} = 1,600 \text{ с}$$



№ кадра 270

$$l_{\text{H}} = 16,0 \text{ м}$$

$$t_{\text{H}} = 2,000 \text{ с}$$

Рисунок 2.16 – Характерные кадры видеосъемки полного разрушения РВС-700 м³ с водой в соответствующие моменты времени

Следует отметить, что при вычислении критериев подобия (см. таблицу 2.1) в качестве характерного линейного размера принята ширина потока в 1 м, так как установить на кадрах видеосъемки высоту потока на соответствующих расстояниях от стенки резервуара не представлялось возможным вследствие его сильной турбулентности. При этом прослеживалось, что на рассматриваемом участке по трассе растекания параметры потока на принятой ширине практически остаются неизменными.

Таким образом, представленные в таблице 2.1 значения параметров потока и соответствующих критериев подобия при разрушении натурального резервуара типа РВС-700 м³ с водой могут быть приняты в качестве исходных данных для проведения сравнительного анализа с одноименными величинами при изучении волнового процесса на лабораторном стенде при разрушении модельного резервуара. При удовлетворительной сходимости этих величин можно будет сделать вывод о подобии волновых процессов в натуре и на модели и, следовательно, о достоверности результатов лабораторных экспериментов.

2.2.2 Оценка параметров потока при численном моделировании процесса разрушения натурального резервуара номинальным объемом 30000 м³

С целью возможности использования разрабатываемого лабораторного стенда для нахождения оптимальных геометрических параметров защитных стенок резервуаров номинальным объемом до 30000 м³, как наиболее широко распространенных на объектах НГО, было выполнено численное моделирование процесса разрушения типового РВС-30000 м³ с водой в программном комплексе *LSDYNA*. Подробное описание модели, в основе которой лежит численное решение систем уравнений гидродинамики и уравнений деформируемого твердого тела в связанной пространственной постановке, представлено, в частности, в работах [9], [65], [66].

На рисунке 2.17 представлены характерные кадры при моделировании процесса разрушения рассматриваемого типа резервуара (внутренний диаметр 45,6 м; высота стенки 18,0 м; степень заполнения 0,95; уровень жидкости 17,1 м [42]).

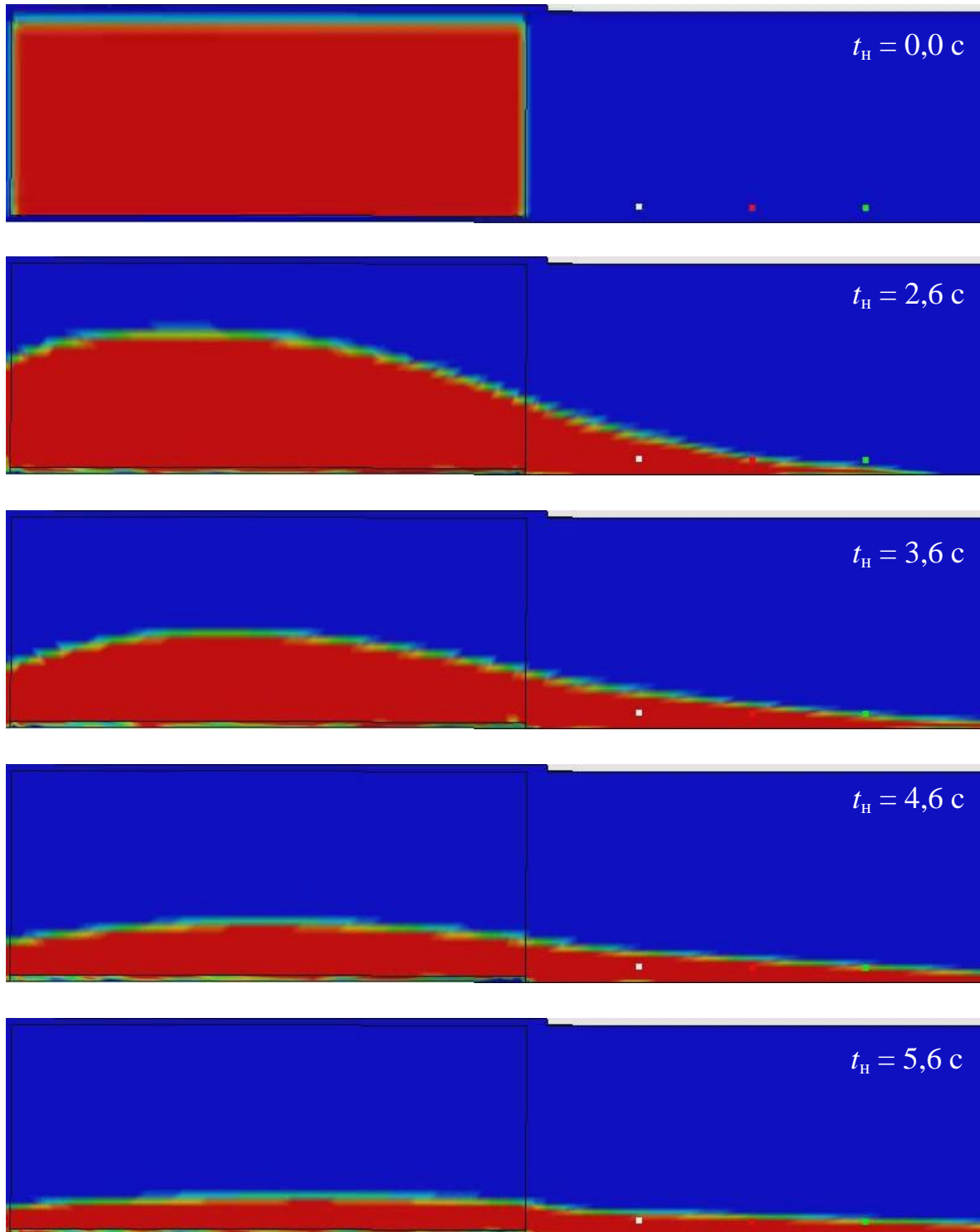


Рисунок 2.17 – Характерные кадры течения воды при моделировании процесса разрушения РВС-30000 м³

Фиксация основных параметров потока (h_n , u_n) в определенный момент времени от начала разрушения резервуара (t_n) проводилась соответственно на расстояниях $l_n = 10, 15, 20, 25$ и 30 м по трассе растекания от стенки резервуара на постоянной высоте в $1,3$ м от нулевой отметки. В таблице 2.2 приведены результаты измерений основных параметров потока при разрушении натурального резервуара, а также вычислений по формулам (2.13), (2.16) соответствующих критериев подобия.

Таблица 2.2 – Параметры потока при разрушении РВС-30000 м³ с водой и соответствующие критерии подобия

l_n , м	t_n , с	h_n , м	u_n , м/с	Fr_n	Sh_n
10	2,60	3,00	12,20	5,06	10,57
	3,60	2,60	10,80	4,57	14,95
15	3,10	2,20	12,90	7,71	18,18
	4,10	2,00	11,60	6,86	23,78
20	4,70	1,80	12,40	8,71	32,38
	5,70	1,40	10,20	7,58	41,53
25	4,60	1,50	12,60	10,79	38,64
	5,60	1,35	11,60	10,16	48,12
30	4,50	1,30	13,00	13,25	45,00
	5,50	1,20	11,40	11,04	52,25

Таким образом, представленные в таблице 2.2 значения параметров потока и соответствующих критериев подобия при разрушении натурального резервуара типа РВС-30000 м³ с водой, могут быть приняты в качестве исходных данных для проведения сравнительного анализа с одноименными величинами при изучении волнового процесса на лабораторном стенде при разрушении модельного резервуара. При удовлетворительной сходимости этих величин также можно будет сделать вывод о подобии волновых процессов в природе и на модели и, следовательно, о достоверности результатов лабораторных экспериментов. Кроме этого, можно будет сделать вывод о возможности проведения экспериментов на лабораторном стенде и с другими модельными резервуарами в диапазоне изменения номинального объема натуральных резервуаров от 700 до 30000 м³.

2.3 Разработка лабораторного стенда для определения геометрических параметров ограждений резервуаров типа «стакан в стакане»

С целью возможности проведения экспериментов по удержанию волны прорыва защитной стенкой, установленной на различных расстояниях от основного резервуара типа «стакан в стакане», с учетом обоснованных критериев подобия и условий моделирования гидравлических явлений (см. раздел 2.2), был разработан лабораторный стенд, принципиальная схема которого представлена на рисунке 2.18 [104]–[106].

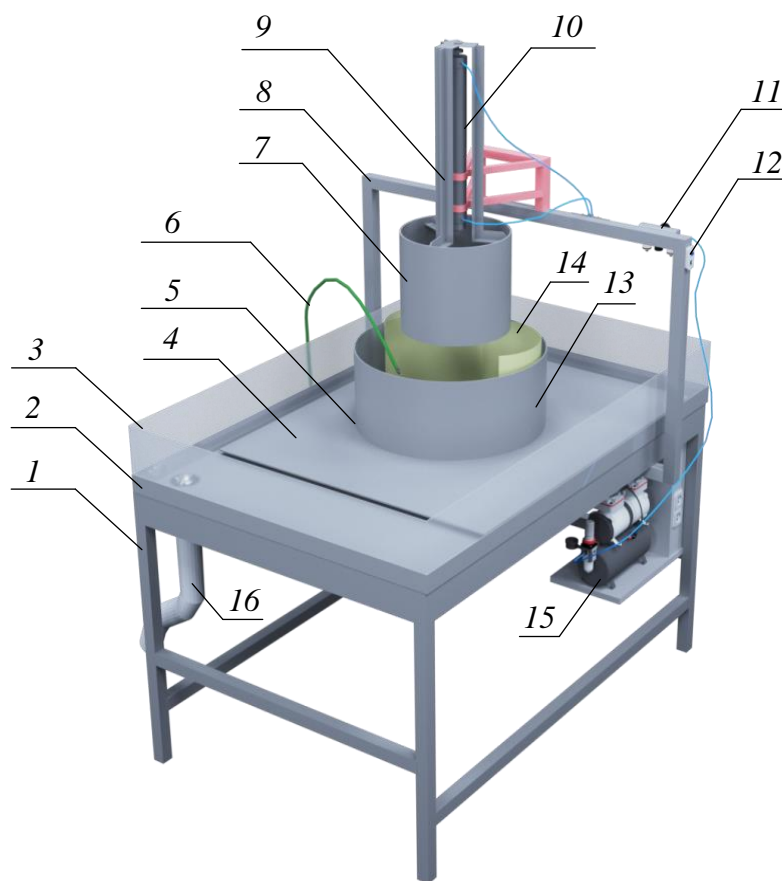


Рисунок 2.18 – Принципиальная схема лабораторного стенда для исследования геометрических параметров ограждений резервуаров

Основой лабораторного стенда является каркас *1*, конструктивно выполненный из стального профиля прямоугольной формы, с общими габаритными размерами $B \times Ш \times Г$: $0,9 \times 1,6 \times 1,1$ м.

В качестве столешницы используется поддон 2, конструктивно выполненный из нержавеющей стали, с высотой борта 0,05 м. В углу поддона смонтирована сливная арматура для удаления воды в систему канализации 16 после проведения эксперимента. Для предотвращения перелива воды за борта поддона при проведении эксперимента, с внутренней их стороны по периметру установлены экраны из прозрачного органического стекла 3, высотой 0,025 м. Непосредственно в поддоне 2 на жестко закрепленных к нему четырех регулируемых вручную по высоте опорах из нержавеющей стали установлено основание 4, конструктивно выполненное из листового алюминия, толщиной 0,01 м. В это основание встроены два пузырьковых горизонтальных уровня, а также уплотнительное резиновое кольцо 5, на которое под давлением, создаваемым поршнем 10, устанавливается модельный резервуар 7. С целью идентичности воспроизведения разрушения стенок натурального резервуара, непосредственно перед проведением каждого опыта, внутрь модельного резервуара устанавливается вкладка из монолитного поликарбоната 14, толщиной 0,0006 м и высотой 0,3 м, которая плотно прижимаясь к стенкам модельного резервуара, повторяет его оболочку. Разрушение модельного резервуара имитируется посредством его резкого поднятия поршнем, к штоку которого на болтовом соединении прикреплены три направляющие 9, жестко закрепленные на обечайке резервуара. Поршень жестко закреплен на раме 8, которая также имеет жесткое соединение с каркасом лабораторного стенда 1. Высота рамы подобрана таким образом, чтобы при поднятии поршнем модельного резервуара, установленный внутри него лист монолитного поликарбоната свободно раскрывался на 180° под действием гидростатического напора воды, моделируя разрушение резервуара. Нагнетание воздуха в поршень обеспечивает воздушный поршневой компрессор с ресивером 15, размещенный на площадке каркаса лабораторного стенда. На раме 8 установлены манометр с датчиками давления 11 и кнопки управления 12, посредством нажатия которых возможно осуществлять резкий подъем модельного резервуара при проведении эксперимента и его плавное опускание на уплотнительное резиновое кольцо с целью создания герметичности при заполнении его из шланга 6 водой перед экспериментом.

В качестве защитных стенок используются стальные цилиндрические обечайки 13, имеющие с внутренней стороны выступы с прорезями для болтового соединения с основанием 4. При постоянной высоте в 0,3 м обечайки имеют разный диаметр (от 0,45 до 0,55 м), что позволяет их устанавливать на необходимом для изучения расстоянии от модельного резервуара. В качестве натурального объекта, как уже отмечалось, был выбран резервуар типа РВС-700 м³ (внутренний диаметр 10,4 м; высота стенки 9,0 м; степень заполнения 0,95; уровень жидкости 8,55 м). Масштаб моделирования был принят равным 1:30, при этом параметры модельного резервуара 7 составили: внутренний диаметр 0,35 м; высота стенки 0,3 м; степень заполнения 0,95; уровень жидкости 0,285 м).

Таким образом, модельный резервуар, предназначенный для гидродинамических опытов (многократного воспроизведения процессов и явлений, имеющих место при разрушении натуральных РВС), обеспечивал: герметичность конструкции при заполнении ее водой; имитацию разрушения РВС по вертикальному шву со свободным раскрытием стенок резервуара под действием напора жидкости на 180°; образование волны и ее воздействие на защитные стенки. Общий вид лабораторного стенда показан на рисунке 2.19.



Рисунок 2.19 – Общий вид лабораторного стенда с модельным резервуаром и защитной стенкой

2.3.1 Оценка параметров потока при разрушении резервуара в масштабе 1:30 к натурному резервуару номинальным объемом 700 м³

С целью подтверждения возможности проведения экспериментов на разработанном лабораторном стенде по изучению влияния волны прорыва на защитную стенку резервуаров типа «стакан в стакане» выполнена серия опытов по свободному истечению потока жидкости (без защитной стенки) при разрушении резервуара, выполненного в масштабе 1:30 к натурному РВС-700 м³.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. В ресивере компрессором создавалось давление в 4 кг/см². С помощью кнопок управления модельный резервуар под этим давлением поршнем опускался на уплотнительное резиновое кольцо, встроенное в основание лабораторного стенда, тем самым обеспечивая герметичность конструкции. Внутри модельного резервуара устанавливалась вкладка из монолитного поликарбоната. Модель резервуара заполнялась водой до уровня 0,285 м, при этом вкладка плотно прижималась к стенкам резервуара, повторяя его оболочку. В ресивере компрессором создавалось рабочее давление в 6 кг/см². С помощью кнопок управления модельный резервуар под этим давлением поршнем резко поднимался вверх при этом, под гидростатическим давлением столба воды, вставка раскрывалась на 180°, имитируя разрушение стенок резервуара с образованием волны прорыва и ее свободным истечением по трассе растекания.

Выравнивание основания лабораторного стенда относительно горизонта выполнялась с помощью встроенных в него двух пузырьковых уровня с точностью $0,057^\circ = 1$ мм на 1 м каждый. Уровень воды в модельном резервуаре измерялся линейкой с точностью 0,001 м. Процесс образования и распространения волны прорыва по трассе растекания регистрировался цифровой фотокамерой марки *Nikon 1J1*, позволяющей создавать 5-ти секундные видеоролики с замедленной съемкой формата *HVGA 640x240/400* кадров/с. На рисунке 2.20 представлены характерные кадры видеосъемки при проведении эксперимента.

№ кадра 644

$$l_{\text{н}} = 0,2 \text{ м}$$

$$t_{\text{н}} = 0,098 \text{ с}$$



№ кадра 660

$$l_{\text{н}} = 0,3 \text{ м}$$

$$t_{\text{н}} = 0,138 \text{ с}$$



№ кадра 690

$$l_{\text{н}} = 0,4 \text{ м}$$

$$t_{\text{н}} = 0,213 \text{ с}$$



№ кадра 722

$$l_{\text{н}} = 0,483 \text{ м}$$

$$t_{\text{н}} = 0,293 \text{ с}$$



№ кадра 750

$$l_{\text{н}} = 0,533 \text{ м}$$

$$t_{\text{н}} = 0,363 \text{ с}$$



Рисунок 2.20 – Характерные кадры видеосъемки разрушения резервуара в масштабе 1:30 к натурному РВС-700 м³ в соответствующие моменты времени

В результате выполненных экспериментов были получены следующие данные (таблица 2.3), необходимые для сравнительного анализа с аналогичными данными, полученными при проведении натурального опыта (см. таблицу 2.1).

Таблица 2.3 – Параметры потока при разрушении резервуара в масштабе 1:30 к натурному РВС-700 м³ и соответствующие критерии подобия

$l_M, \text{ м}$	$t_M, \text{ с}$	$u_M, \text{ м/с}$	Fr_M	Sh_M	Re_M
0,200	0,098	2,051	13,00	6,06	67692
0,300	0,138	2,182	14,70	9,09	72000
0,400	0,213	1,882	10,95	12,12	62118
0,483	0,293	1,652	8,43	14,65	54530
0,533	0,363	1,471	6,69	16,16	48552

В таблице 2.4 представлена сравнительная характеристика критериев подобия, полученных соответственно при обработке данных натурального опыта и лабораторного эксперимента.

Таблица 2.4 – Сравнительная характеристика критериев подобия

Натурный опыт (см. таблицу 2.1)			Лабораторный эксперимент (см. таблицу 2.3)		
$l_H, \text{ м}$	Fr_H	Sh_H	$l_M, \text{ м}$	Fr_M	Sh_M
6,0	12,90	6,00	0,200	13,00	6,06
9,0	15,35	9,00	0,300	14,70	9,09
12,0	10,19	12,00	0,400	10,95	12,12
14,5	8,37	14,50	0,483	8,43	14,65
16,0	6,52	16,00	0,533	6,69	16,16

Анализ данных, представленных в таблице 2.4, позволяет сделать общий вывод о тождественности рассматриваемых критериев подобия ($Fr_M \approx Fr_H = idem$; $Sh_M \approx Sh_H = idem$), следовательно, поток, образующийся при разрушении модельного резервуара является подобным потоку, образующемуся при разрушении натурального резервуара. Кроме этого, из данных таблицы 2.3 видно, что числа Рейнольдса в рассматриваемом диапазоне изменения параметров модельного потока больше критического значения ($Re_M \geq Re_{кр} = 10000$), следовательно модельный поток также как и натуральный находится в турбулентном состоянии.

Необходимо также отметить, что при разработке лабораторного стенда масштаб модельного резервуара принят 1:30 по отношению к натурному резервуару типа РВС-700 м³. Наименьший допустимый масштаб модели, исходя из зависимости (2.18), составляет:

$$\lambda_{\text{мин}} = (30 \div 50) \sqrt[3]{u_n^2 h_n^2} = 30 \sqrt[3]{8^2 \cdot 1^2} = 120.$$

Таким образом, условие масштаба моделирования соблюдается.

Наконец, вследствие того, что скорость потока воды при проведении экспериментов на лабораторном стенде (см. таблицу 2.3) более чем в 6 раз превышала критическое значение, равное 0,23 м/с, то можно утверждать о незначительном влиянии сил поверхностного натяжения и отсутствии необходимости увеличивать масштаб модели, то есть условие волнообразования соблюдается.

Таким образом, соблюдение выше рассмотренных критериев подобия и условий моделирования гидравлических явлений позволяет сделать общий вывод о том, что изучаемый процесс находится в автомодельной области, а разработанный лабораторный стенд может использоваться для нахождения оптимальных геометрических параметров защитной стенки резервуаров номинальным объемом 700 м³ [104]–[106].

2.3.2 Оценка параметров потока при разрушении резервуара в масштабе 1:130 к натурному резервуару номинальным объемом 30000 м³

С целью подтверждения возможности использования разработанного лабораторного стенда для изучения влияния волны прорыва на защитную стенку резервуаров номинальным объемом до 30000 м³ выполнена серия опытов по свободному истечению потока жидкости (без защитной стенки) при разрушении резервуара, выполненного в масштабе 1:130 (предельный для данной конструкции стенда масштаб) по отношению к натурному РВС-30000 м³ [107], [108].

Поскольку исходный модельный резервуар лабораторного стенда имеет диаметр 0,35 м и высоту 0,30 м и жестко закреплен на направляющих стенда, то при моделировании натурального резервуара типа РВС-30000 м³ с сохранением базового диаметра (0,35 м) соблюдение условия геометрического подобия обеспечивали соответствующим уровнем жидкости в модельном резервуаре. С учетом заполнения натурального резервуара на 95 % (уровень жидкости 17,1 м) в масштабе 1:130 уровень жидкости в модельном резервуаре составит 0,132 м.

Методика проведения экспериментов первой серии опытов по оценке высоты потока заключалась в следующем. На основании лабораторного стенда непосредственно от стенки модельного резервуара по трассе растекания потока обустроивалась вертикальная стенка, конструктивно выполненная из листового алюминия высотой 0,3 м и длиной 0,5 м. Стенка имела толщину 0,0005 м, что не препятствовало при проведении опытов прохождению вдоль нее потока. Для фиксации высоты потока в соответствующие моменты времени на стенку предварительно была нанесена миллиметровая разметка с выделенными участками на расстояниях $l_m = 0,077, 0,115, 0,154, 0,192$ и $0,231$ м, соответствующих в выбранном масштабе моделирования расстояниям l_n (см. таблицу 2.2), а также первоначальным уровнем жидкости в резервуаре, равным 0,132 м (рисунок 2.21).



Рисунок 2.21 – Общий вид участка лабораторного стенда перед проведением опытов по оценке высоты потока в соответствующие моменты времени на расстояниях l_m

Далее последовательность проведения экспериментов аналогична описанной в разделе 2.3.1 настоящей работы, при этом резервуар заполняли водой до уровня в 0,132 м, предварительно установив внутри его обечайки вкладыш для имитации разрушения резервуара также высотой 0,132 м (рисунок 2.22).

№ кадра 1041

$t_M = 0,228$ с



№ кадра 1076

$t_M = 0,316$ с



№ кадра 1111

$t_M = 0,404$ с



№ кадра 1146

$t_M = 0,491$ с



Рисунок 2.22 – Характерные кадры течения жидкости при разрушении резервуара в масштабе 1:130 к натурному РВС-30000 м³ в соответствующие моменты времени

Процесс образования и распространения потока по трассе растекания также регистрировался цифровой фотокамерой марки *Nikon 1J1*. Полная раскадровка видеороликов позволяла устанавливать начальный кадр разрушения модельного резервуара с образованием волны прорыва, а также фиксацию количества кадров при прохождении потоком соответствующих участков по трассе растекания (l_M), что в конечном счете давало возможность оценивать высоту волны (h_M) в любой момент времени (t_M) изучаемого процесса.

Важно отметить, что время от момента разрушения модельного резервуара до снижения уровня жидкости на основании лабораторного стенда в зоне возможной его инструментальной оценки (более 0,005 м) не превышало 0,5 с. Поэтому для оценки местной скорости потока использование приборного оборудования, например, микровертушки или трубки Пито с дифференциальным манометром, практически не представляется возможным. Данные обстоятельства обусловлены, во-первых, особенностями изучаемого процесса: быстроизменяющееся неустановившееся движение с растеканием на открытой поверхности, в данном случае, по основанию лабораторного стенда. Во-вторых, конструктивными особенностями этих приборов. Так, например, использование гидromетрической микровертушки позволяет определять только среднюю скорость в потоке за определенный промежуток времени, как правило, превышающий 1 с [109]. Время же отклика цифровых дифференциальных манометров, используемых в современных модификациях трубок Пито для измерений местной скорости, превышает 0,5 с [110]. Таким образом, в настоящих опытах для измерения местной скорости на соответствующих участках трассы растекания потока использовалась специально изготовленная динамическая трубка Пито, представляющая собой Г-образную трубку, конструктивно выполненную из органического стекла наружным диаметром 0,007 м и толщиной стенки 0,001 м. Вертикальная часть трубки имела высоту 0,3 м, а участок трубки загнутый под углом 90° имел длину 0,07 м.

Вычисление скорости в месте установки динамической трубки производилось по формуле [95]:

$$u_{TP} = K \sqrt{2gH_{TP}}, \quad (2.19)$$

где K – коэффициент, зависящий от вязкости жидкости и конструктивных особенностей трубки и определяемый при тарировании трубки;
 $H_{\text{ТР}}$ – скоростной напор, определяемый по уровню жидкости в трубке от поверхности потока, м.

С целью нахождения коэффициента (K) была выполнена тарировка изготовленной трубки посредством сравнения результатов измерений средней скорости потока, выполненных соответственно трубкой, и имеющейся в наличии тарированной гидрометрической микровертушкой цифровой модернизированной (ГМЦМ) типа «МИКРО-01» [109]. На рисунке 2.23 показан общий вид изготовленной трубки и гидрометрической микровертушки.

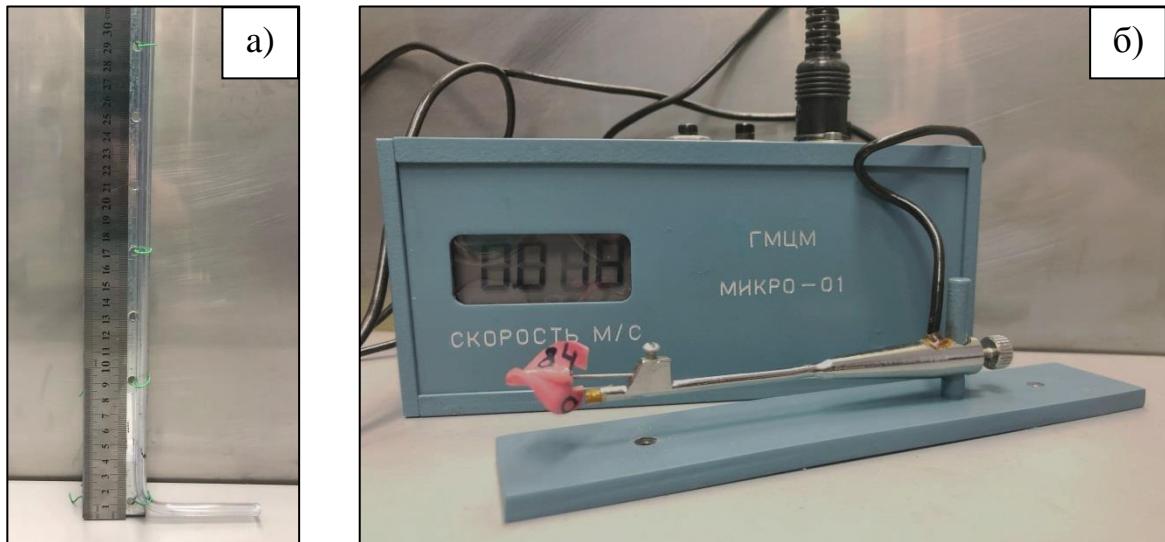


Рисунок 2.23 – Общий вид динамической трубки (а) и гидрометрической микровертушки (б) для измерений скорости потока жидкости в лабораторных условиях

Измерение скорости жидкости проводилось на участке трубопровода длиной 1 м и диаметром 0,05 м. С одной стороны трубопровода была установлена заглушка, а в верхней его части смонтирован шаровой Г-образный кран, подключенный к системе центрального водоснабжения. Посредством плавного открывания крана в трубопровод подавалась вода, создавая поток глубиной $h_{\text{ТР}} = 0,010, 0,015, 0,020$ и $0,025$ м соответственно. Свободно вытекающая с другой стороны трубопровода вода попадала в приемный лоток и далее в систему канализации.

В верхней центральной части корпуса трубопровода заранее было выполнено окошко размером $0,1 \times 0,03$ м, куда поочередно в центр создаваемого потока устанавливались микровертушка и трубка.

Принцип действия датчика ГМЦМ основан на электролитическом способе формирования импульсов. Между двумя электродами, погруженными в водный поток, вращается лопастной винт, изменяя электрическое сопротивление цепи. Импульсы напряжения подаются в регистрирующее устройство для обработки. Регистрирующее устройство состояло из блока формирования импульсов, блока задания коэффициентов градуировочного уравнения, тактового генератора, блока управления и вычисления, блока счета и дешифрации, блока индикации. Регистрирующее устройство было специально адаптировано к условиям проводимых экспериментов. Принимая во внимание номер используемого лопастного винта (№ 84), а также градуировочный штекер, соответствующий времени осреднения (2 с), использовалась следующая формула для определения скорости потока [109]:

$$u_{\text{ГМЦМ}} = 0,0378n + 0,0166, \quad (2.20)$$

где $n = N/\Delta T$, N – показания цифрового индикатора регистрирующего прибора (число импульсов);

$\Delta T = 2,0$ с – время осреднения.

В таблице 2.5 представлены результаты измерений средней скорости потока в трубе микровертушкой и трубкой, а также вычисленный коэффициент (K).

Таблица 2.5 – Результаты измерений средней скорости потока воды в трубе микровертушкой и динамической трубкой

$h_{\text{тр}}$, м	Измерения ГМЦМ		Измерения трубкой		$K = \frac{u_{\text{ГМЦМ}}}{u_{\text{тр}}}$	$u_{\text{тр}}$, м/с** (по ф-ле 2.19)
	N , об.	$u_{\text{ГМЦМ}}$, м/с (по ф-ле 2.20)	$H_{\text{тр}}$, м	$u_{\text{тр}}$, м/с* (по ф-ле 2.19)		
0,010	18	0,357	0,007	0,371	0,963	0,360
0,015	22	0,432	0,010	0,443	0,976	0,431
0,020	42	0,810	0,035	0,829	0,978	0,805
0,025	51	0,981	0,052	1,010	0,971	0,982
Среднее значение					0,972	

* без учета K ; ** с учетом $K = 0,972$

Методика проведения экспериментов во второй серии опытов по оценке местной скорости потока тарированной трубкой в целом аналогична методике оценки высоты потока, описанной выше. При этом вместо стенки по трассе растекания потока на соответствующих расстояниях l_M от стенки модельного резервуара при неизменной высоте в 0,01 м (1,3 м для натурального резервуара) устанавливалась трубка. Процесс также снимался цифровой фотокамерой. Полная раскадровка видеороликов позволяла устанавливать начальный кадр разрушения модельного резервуара с образованием волны прорыва, а также фиксацию в соответствующий момент времени значения скоростного напора на соответствующих участках потока. На рисунке 2.24 представлены характерные фрагменты измерений трубкой скоростного напора на соответствующих участках по трассе растекания потока при разрушении модельного резервуара.

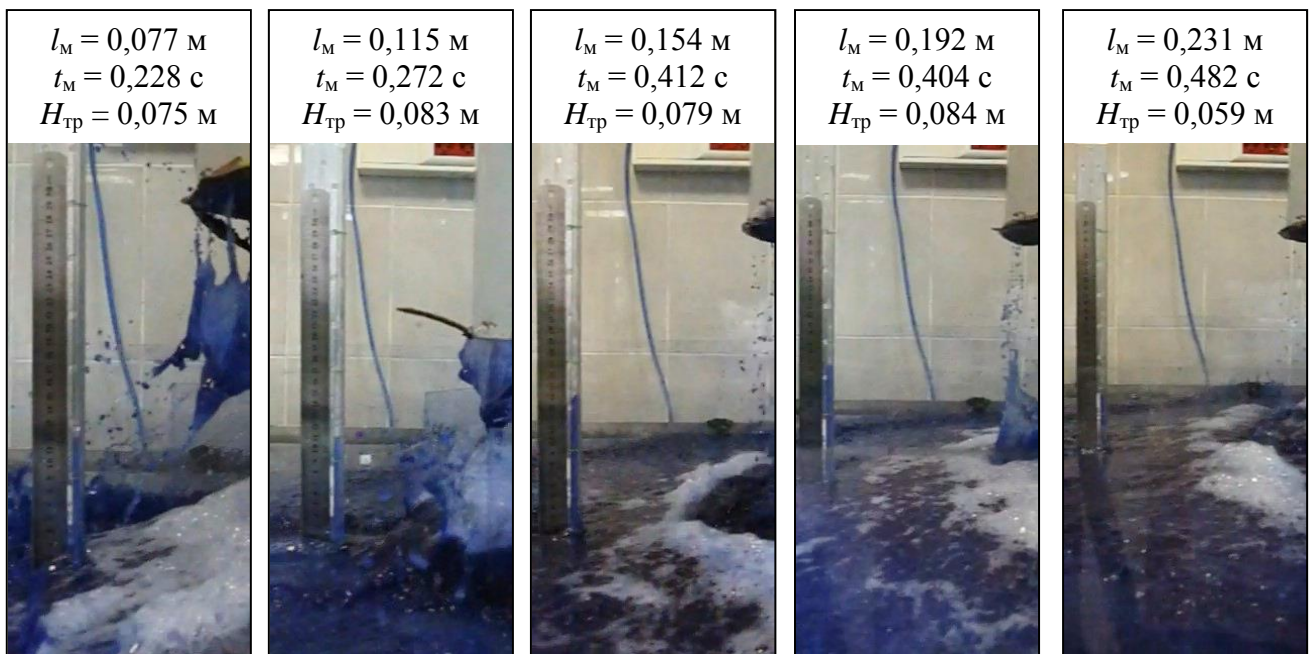


Рисунок 2.24 – Характерные фрагменты измерений трубкой скоростного напора на соответствующих участках по трассе растекания потока

Далее, используя формулу (2.19), находили соответствующую местную скорость потока. В таблице 2.6 представлены результаты обработки экспериментальных данных, а также численные значения соответствующих критериев подобия.

Таблица 2.6 – Параметры потока при разрушении резервуара в масштабе 1:130 к натурному РВС-30000 м³ и соответствующие критерии подобия

$l_M, \text{ м}$	$t_M, \text{ с}$	$h_M, \text{ м}$	$u_M, \text{ м/с}$	Fr_M	Sh_M	Re_M
0,077	0,228	0,025	1,179	5,64	10,70	29646
	0,316	0,024	1,103	5,26	14,78	25998
0,115	0,272	0,019	1,241	8,32	17,89	23393
	0,360	0,017	1,153	7,84	23,99	19928
0,154	0,412	0,016	1,212	9,53	31,80	19046
	0,500	0,014	1,090	8,57	38,55	15422
0,192	0,404	0,013	1,246	12,58	39,99	15661
	0,491	0,012	1,175	12,09	49,62	13658
0,231	0,395	0,011	1,226	13,93	43,99	13486
	0,482	0,009	1,050	11,92	53,72	9899

Сравнительный анализ критериев подобия, полученных в результате обработки данных при численном моделировании процесса разрушения РВС-30000 м³ (натурный опыт) и при лабораторных исследованиях на модели рассматриваемого резервуара в масштабе 1:130, представлен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Сравнительная характеристика критериев подобия

Натурный опыт (см. таблицу 2.2)			Лабораторный эксперимент (см. таблицу 2.6)		
$l_H, \text{ м}$	Fr_H	Sh_H	$l_M, \text{ м}$	Fr_M	Sh_M
10	5,06	10,57	0,077	5,64	10,70
	4,57	14,95		5,26	14,78
15	7,71	18,18	0,115	8,32	17,89
	6,86	23,78		7,84	23,99
20	8,71	32,38	0,154	9,53	31,80
	7,58	41,53		8,57	38,55
25	10,79	38,64	0,192	12,58	39,99
	10,16	48,12		12,09	49,62
30	13,25	45,00	0,231	13,93	43,99
	11,04	52,25		11,92	53,72

Анализ данных, представленных в таблице 2.7, также позволяет сделать общий вывод о тождественности критериев подобия ($Fr_M \approx Fr_H = idem$; $Sh_M \approx Sh_H = idem$), следовательно, поток, образующийся при разрушении модельного резервуара является подобным натурному потоку.

Из данных, приведенных в таблице 2.6 видно, что числа Рейнольдса в рассматриваемом диапазоне изменения параметров модельного потока больше критического значения ($Re_m \geq Re_{кр} = 10000$), следовательно модельный поток также как и натурный находится в турбулентном состоянии.

Наименьший допустимый масштаб модели, исходя из зависимости (2.18), составляет:

$$\lambda_{\min} = (30 \div 50) \sqrt[3]{u_n^2 h_n^2} = 30 \sqrt[3]{11,4^2 \cdot 1,2^2} = 172.$$

Таким образом, условие масштаба моделирования соблюдается.

Вследствие того, что скорость потока воды при проведении экспериментов на лабораторном стенде (см. таблицу 2.6) более чем в 4,5 раза превышала критическое значение, равное 0,23 м/с, то можно утверждать о незначительном влиянии сил поверхностного натяжения и отсутствии необходимости увеличивать масштаб модели, то есть условие волнообразования соблюдается.

Таким образом, соблюдение выше рассмотренных критериев подобия и условий моделирования гидравлических явлений позволяет сделать общий вывод о том, что изучаемый процесс находится в автомодельной области, а разработанный лабораторный стенд может использоваться для нахождения оптимальных геометрических параметров защитной стенки резервуаров номинальным объемом до 30000 м³.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ»

3.1 Обоснование масштабных коэффициентов для модельных резервуаров и защитных стенок

В предыдущей главе настоящей работы сделан общий вывод о том, что разработанный лабораторный стенд может использоваться для нахождения оптимальных геометрических параметров ограждений для резервуаров номинальным объемом от 700 до 30000 м³. Учитывая требования ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия» [42] к геометрическим параметрам типовых резервуаров, были найдены масштабные коэффициенты для соответствующих модельных резервуаров. При этом, исходя из конструктивных особенностей основного модельного резервуара на лабораторном стенде, связанных с невозможностью изменять его диаметр (0,35 м), условия геометрического подобия обеспечивали соответствующим уровнем жидкости в этом резервуаре. Результаты оценки масштабных коэффициентов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Масштабные коэффициенты для модельных резервуаров

Номинальный объем натурального РВС, м ³	Внутренний диаметр, м	Высота стенки, м	Масштабный коэффициент λ_l	Уровень жидкости в модельном резервуаре, м
700	10,43	9,00	30	0,30
2000	15,18	12,00	43	0,28
5000	20,92	15,00	60	0,25
10000	28,50	18,00	81	0,22
20000	39,90	18,00	114	0,16
30000	45,60	18,00	130	0,14

Кроме этого, в результате анализа действующих нормативных документов в области обеспечения промышленной безопасности РВСЗС, представленного в разделе 1.3 настоящей работы, было установлено, что минимальное расстояние от стенки внутреннего резервуара до защитной стенки должно составлять не менее 1,5 – 1,8 м, при этом требования к максимальному значению этого расстояния не предъявляются. В действующем нормативном документе в области обеспечения пожарной безопасности складов нефти и нефтепродуктов [41], требования которого хотя и не распространяются на РВСЗС, указывается, что расстояние от стенок РВС до подошвы внутренних откосов обвалования или до ограждающих стен следует принимать не менее 3 м от резервуаров объемом до 10000 м³ и 6 м – от резервуаров объемом 10000 м³ и более. Таким образом, исходя из экономической эффективности применения рассматриваемых в работе защитных стенок, а также анализа требований нормативных документов к РВСЗС, с учетом требований [41], можно сделать вывод о том, что такие преграды целесообразно обустраивать на расстояниях от 1,5 до 3,0 м от стенки внутреннего резервуара. В дальнейшем эти расстояния и были взяты за основу при проведении экспериментальных исследований, направленных на определение оптимальных геометрических параметров защитных стенок резервуаров типа «стакан в стакане» (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Значения расстояний для обустройства защитных стенок по периметру модельных резервуаров с учетом масштабных коэффициентов

Масштабный коэффициент λ_l	Расстояние от стенки модельного резервуара до защитной стенки для соответствующего натурального расстояния, м			
	1,5	2,1	2,4	3,0
30	0,050	0,070	0,080	0,100
43	0,035	0,049	0,056	0,070
60	0,025	0,035	0,040	0,050
81	0,019	0,026	0,030	0,037
114	0,013	0,018	0,021	0,026
130	0,012	0,016	0,018	0,023

3.2 Определение минимальной высоты защитной стенки для локализации потока жидкости при разрушении резервуара

Основной целью экспериментальных исследований являлось нахождение минимальной высоты защитной стенки, обустраиваемой по периметру модельного резервуара на соответствующем расстоянии для полного предотвращения перелива через нее жидкости при разрушении резервуара. При этом, исходя из особенностей методики проведения экспериментов, одновременно решалась задача по определению доли перелившейся через защитную стенку жидкости с учетом изменения ее высоты от первоначальной (рассчитанной на гидростатическое удержание вылившейся из резервуара жидкости) до минимально необходимой (при гидродинамическом воздействии потока) [111]–[114].

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. На основании лабораторного стенда по периметру модельного резервуара (см. таблицу 3.1) на соответствующем расстоянии (см. таблицу 3.2) обустраивалась защитная стенка, конструктивно выполненная в виде стальной обечайки. При этом в соответствии с требованиями [43], первоначальная высота защитной стенки превышала на 1 м (в соответствующем масштабе для каждого модельного резервуара) уровень жидкости в границах ограждения, образующийся при повреждении модельного резервуара. Герметичность защитной стенки на основании лабораторного стенда обеспечивалась за счет применения силиконового герметика. Внутри модельного резервуара устанавливалась вкладка из монолитного поликарбоната высотой, соответствующей уровню жидкости в этом резервуаре. Далее этапы проведения экспериментов аналогичны экспериментам, описанным в разделе 2.3.1 настоящей работы. В случаях наблюдения перелива жидкости (рисунок 3.1) высоту защитной стенки увеличивали посредством крепления на ней дополнительной цилиндрической обечайки с замковым устройством, позволяющим перемещать ее вверх по стенке с шагом от 0,001 м. Опыты повторяли до тех пор, пока жидкость полностью не удерживалась в границах ограждения.

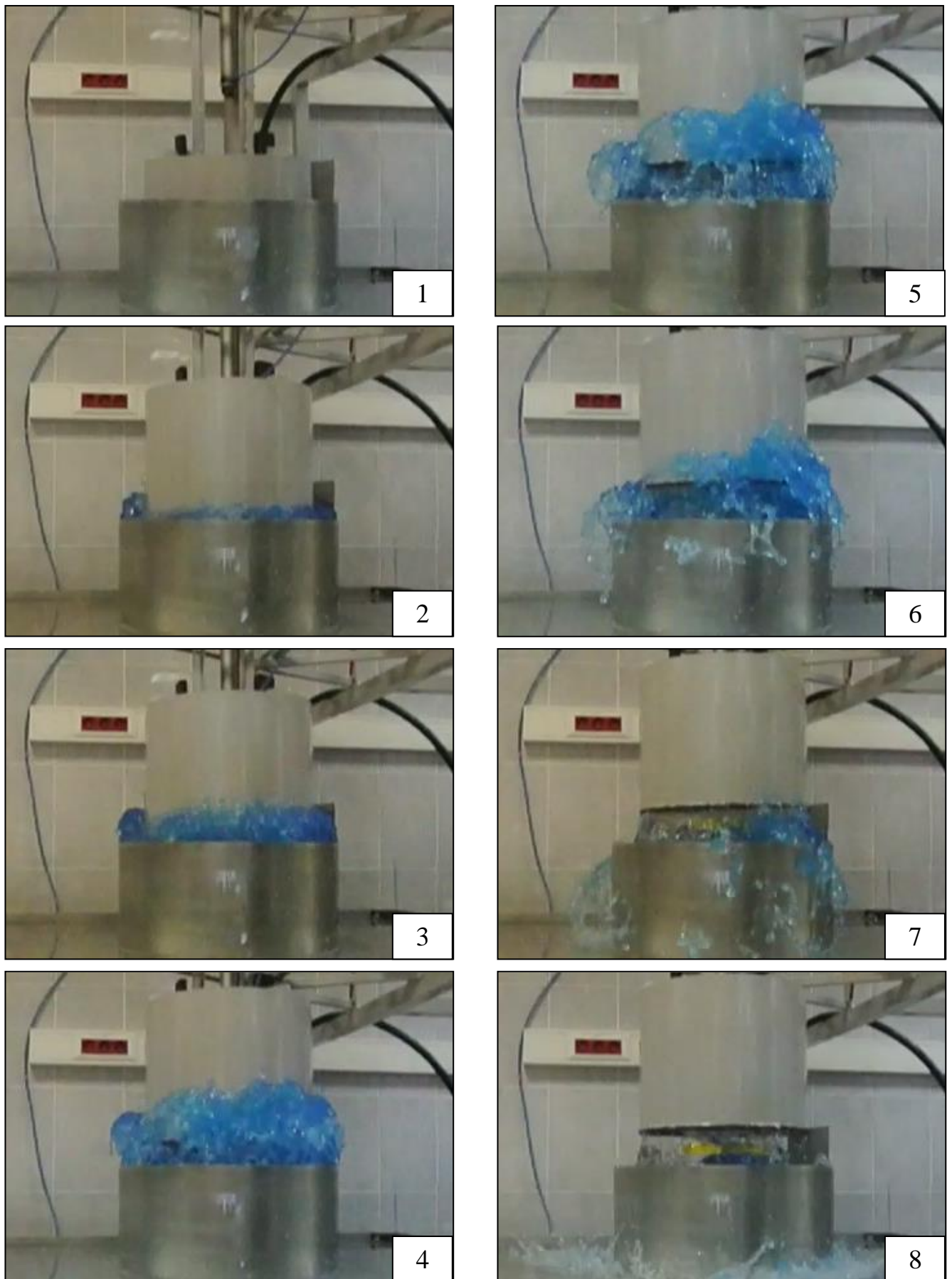


Рисунок 3.1 – Характерные кадры взаимодействия потока жидкости при разрушении резервуара в масштабе 1:30 к натурному РВС-700 м³ с защитной стенкой, установленной на расстоянии 0,07 м (2,1 м для натурального объекта)

С целью удобства проведения аналогичных опытов с остальными модельными резервуарами, оборудованными соответствующими защитными стенками, для лабораторного стенда была разработана специальная вставка, конструктивно выполненная из влагостойкой фанеры толщиной 0,02 м, размерами в плане 1,0×1,0 м. В центре вставки имеется отверстие диаметром 0,6 м, вплотную к которому на равноудаленном друг от друга расстоянии примыкают 8 направляющих с усиленными стальными уголками. В целом разработанная конструкция позволяла закреплять на уголках изготовленные из листовой оцинкованной стали соответствующей высоты защитные стенки и устанавливать их на необходимом расстоянии от модельного резервуара (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Общий вид лабораторного стенда со специальной вставкой и закрепленной на ней защитной стенкой

Перед проведением каждого эксперимента инструментальной линейкой производился замер уровня жидкости в модельном резервуаре, а после имитации его разрушения – уровня жидкости в границах ограждения. Далее производились расчеты по оставшемуся объему жидкости в границах ограждения и делался вывод о доле перелившейся через защитную стенку жидкости.

В таблицах А.1 – А.6 приложения А представлен массив полученных экспериментальных данных с оценкой доли жидкости (Q , %), перелившейся через защитную стенку в зависимости от ее высоты ($h_{ст}$, м) и расстояния (l , м) до модельного резервуара при максимальном первоначальном уровне жидкости в резервуаре (h_0 , м), соответствующем высоте стенки этого резервуара.

На основе анализа выборки из массива экспериментальных данных получены зависимости безразмерного параметра ($h_{ст}/h_0$), определяющего минимальную высоту защитной стенки для локализации потока жидкости при полном разрушении натурального резервуара, от расстояния (l , м), на котором может быть установлена защитная стенка (рисунок 3.3). Для сравнения на этом же рисунке приведены расчетные зависимости для определения высоты защитной стенки, рассчитанной на гидростатическое удержание пролитого из соответствующего резервуара продукта, а также нормативная зависимость высоты защитной стенки – 80 % от высоты стенки основного резервуара [42].

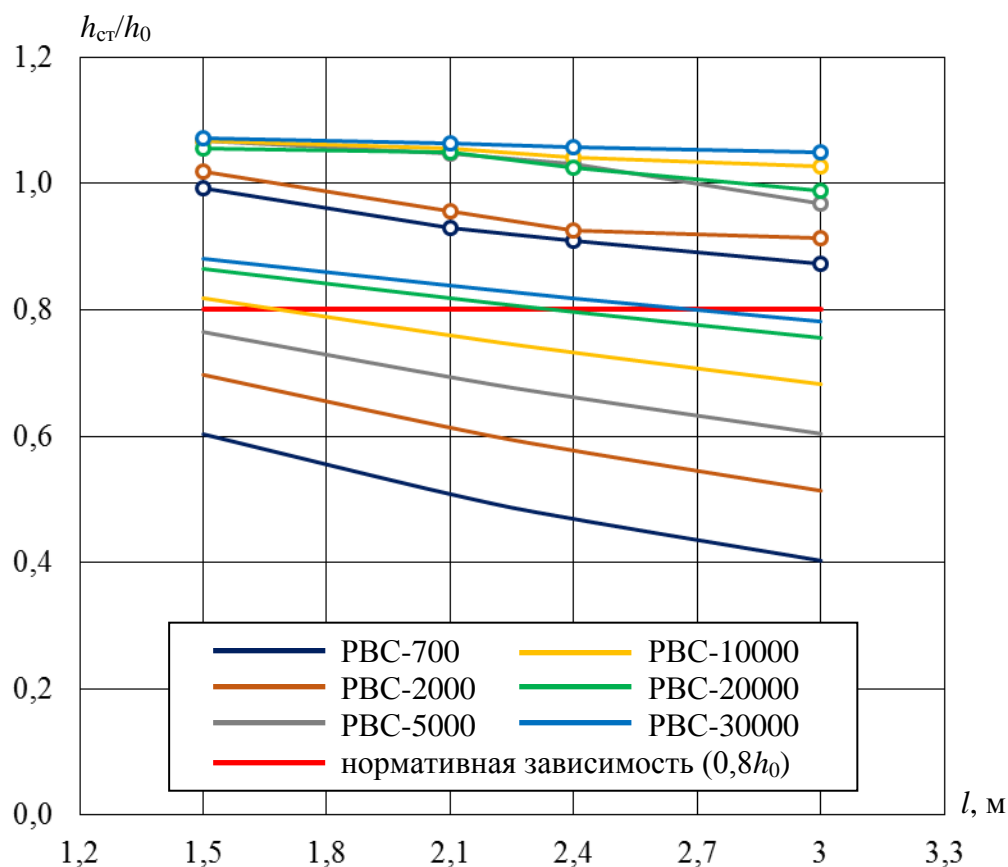


Рисунок 3.3 – Зависимости для определения минимальной высоты защитной стенки от расстояния до стенки резервуара:

—○— гидродинамика; — гидростатика

Из рисунка 3.3 видно, что для всех рассматриваемых в настоящей работе типов резервуаров с целью удержания продукта в границах защитной стенки ее высота в изучаемом диапазоне расстояний l должна быть больше не только высоты стенки, рассчитанной на статическое удержание пролитого продукта, но и нормативно рекомендуемой. При этом анализ экспериментальных данных показывает, что для полного удержания продукта в границах защитной стенки при условии ее расчета на гидродинамические нагрузки с учетом ударного воздействия стенок и других элементов внутреннего резервуара при его разрушении, отношение $h_{ст}/h_0 \geq 1,1$. Очевидно, что на практике защитные стенки такой высоты применять экономически нецелесообразно, поэтому дальнейшие исследования были направлены на оценку доли перелившейся через защитную стенку жидкости при снижении ее высоты вплоть до уровня, рассчитанного на статическое удержание вышедшего из аварийного резервуара продукта.

3.3 Определение доли перелившейся через защитную стенку жидкости при оптимизации (снижении) ее высоты

На рисунке 3.4 представлено графическое отображение массива экспериментальных данных (см. таблицы А.1 – А.6), необходимых для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку в зависимости от ее высоты и расстояния до резервуара. Анализ общего вида этих данных позволил предположить наличие зависимости вида:

$$Q = f\left(\frac{L}{R}; \frac{h_{ст}}{h_0}\right), \quad (3.1)$$

где $L = l + R$ – характерный размер от центра резервуара до защитной стенки, м;

R – радиус резервуара, м.

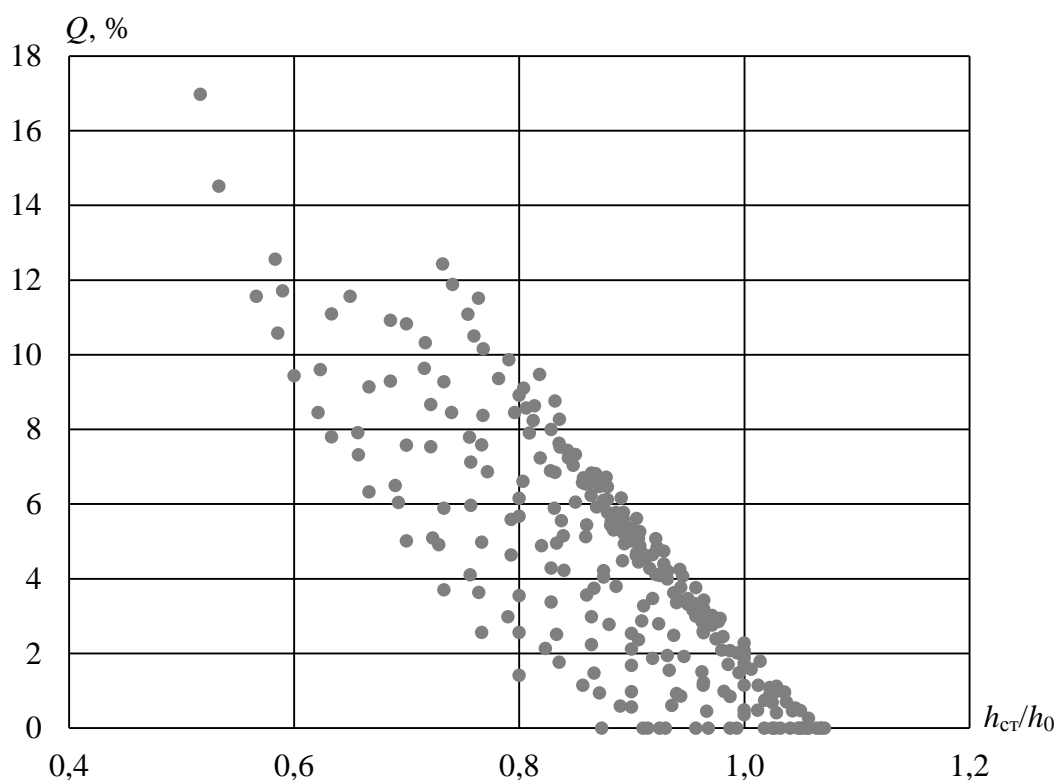


Рисунок 3.4 – Графическое отображение массива экспериментальных данных для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку

Нахождение искомой зависимости производилось методом многофакторного регрессионного анализа с использованием программы *STATGRAPHICS* [115], которая позволяет: вычислять вариации; выборочные коэффициенты множественной детерминации и коэффициенты множественной корреляции; найти интервальные оценки для коэффициентов регрессии; проверить коэффициенты регрессии на значимость; построить таблицу дисперсионного анализа и проверить коэффициенты детерминации на значимость; найти доверительные интервалы для значений функции регрессии; доверительные интервалы для значений отклика при заданном уровне значимости; установить связь между объясняемой переменной и объясняющими переменными.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 3.3, где в соответствующих столбцах многофакторного регрессионного анализа (*Dependent variable: y*) приводятся: параметр, коэффициент регрессии, стандартная ошибка коэффициента, *t*-критерий и вероятность нулевой гипотезы; в столбцах дисперсионного анализа *ANOVA (Analysis of Variance)*: источник вариации

зависимой переменной, сумма квадратов отклонений, число степеней свободы, среднеквадратичное отклонение, F -отношение и вероятность нулевой гипотезы. Далее приведены коэффициенты детерминации, стандартная ошибка оценки, средняя абсолютная ошибка, вероятность автокорреляции (*Durbin-Watson statistic*), ожидаемый уровень результата авторегрессии первого типа.

Таблица 3.3 – Результаты обработки экспериментальных данных по определению доли жидкости, перелившейся через защитную стенку в зависимости от ее высоты и расстояния до резервуара

<i>Dependent variable: $Q = f\left(\frac{L}{R}; \frac{h_{ct}}{h_0}\right)$</i>					
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Standard Error</i>	<i>T Statistic</i>	<i>P-Value</i>	
<i>CONSTANT</i>	89,8017	1,72017	52,2052	0,0000	
<i>L/R</i>	-17,1986	0,586865	-29,3058	0,0000	
<i>SQRT(h_{ct}/h_0)</i>	-68,899	1,2187	-56,5347	0,0000	
<i>Analysis of Variance</i>					
<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
<i>Model</i>	2668,18	2	1334,09	1708,90	0,0000
<i>Residual</i>	203,755	261	0,780672		
<i>Total (Corr.)</i>	2871,94	263			
<i>R-squared = 92,9053 percent</i>			<i>R-squared (adjusted for d.f.) = 92,8509 percent</i>		
<i>Standard Error of Est. = 0,883556</i>			<i>Mean absolute error = 0,637275</i>		
<i>Durbin-Watson statistic = 0,285334 (P = 0,0000)</i>			<i>Lag 1 residual autocorrelation = 0,854635</i>		
<i>The StatAdvisor</i>					
<i>The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Q and 2 independent variables. The equation of the fitted model is</i>					
$Q = 89,8017 - 17,1986 \frac{L}{R} - 68,899 \sqrt{\frac{h_{ct}}{h_0}} .$					
<i>Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between the variables at the 95,0 % confidence level.</i>					
<i>The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 92,9053 % of the variability in Q. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 92,8509 %. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,883556. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,637275 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen.</i>					
<i>In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0000, belonging to L/R. Since the P-value is less than 0,05, that term is statistically significant at the 95,0 % confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.</i>					

В результате обработки данных методом многофакторного регрессионного анализа была получена эмпирическая зависимость для соответствующего диапазона изменения параметров, величина достоверности аппроксимации (R^2), критическое значение F -критерия Фишера ($F_{кр}$), значение F -критерия Фишера в модели (F_M), а также доверительный интервал (Δ) при уровне значимости $\alpha = 5\%$, общий вид и указанные значения которых, представлены ниже.

Доля жидкости (Q), перелившейся через ограждение в зависимости от характерного расстояния $L = l + R$ (здесь: l – расстояние от стенки резервуара до ограждения (защитной стенки); R – радиус резервуара), высоты ограждения $h_{ст}$ и уровня жидкости в резервуаре h_0 , соответствующего высоте стенки резервуара, в диапазоне изменения параметров:

$$1,5 \text{ м} \leq l \leq 3,0 \text{ м}; 5,2 \text{ м} \leq R \leq 22,8 \text{ м}; 9,0 \text{ м} \leq h_0 \leq 18,0 \text{ м}; 0,4h_0 \text{ м} \leq h_{ст} \leq 1,1h_0 \text{ м};$$

$$Q = 89,8017 - 17,1986 \frac{L}{R} - 68,899 \sqrt{\frac{h_{ст}}{h_0}}; \quad (3.2)$$

$$R^2 = 92,91\% \text{ (см. таблицу 3.3); } F_{кр} = 3,035 [116];$$

$$F_M = 1708,9 \text{ (см. таблицу 3.3); } \Delta = 1,732 [116].$$

Выполненные исследования позволили произвести сравнительный анализ с результатами ранее выполненных работ [61], [87], краткое описание которых приведено в разделе 2.1 настоящей работы. На рисунке 3.5 показаны зависимости по определению доли жидкости, перелившейся через ограждение, в возможном для сравнения интервале изменения соответствующих параметров для типовых резервуаров номинальным объемом от 700 до 30000 м³.

Из рисунка 3.5, прежде всего, видна общая закономерность для всех анализируемых зависимостей, связанная с уменьшением доли перелившейся через ограждение жидкости при увеличении высоты ограждения. При этом полученные в настоящей работе экспериментальные данные (см. на рисунке 3.5 зависимости 3 и 4) в широком диапазоне изменения исходных параметров (l , R , h_0 , $h_{ст}$), наиболее соответствуют экспериментальной зависимости 2, представленной в работе [87].

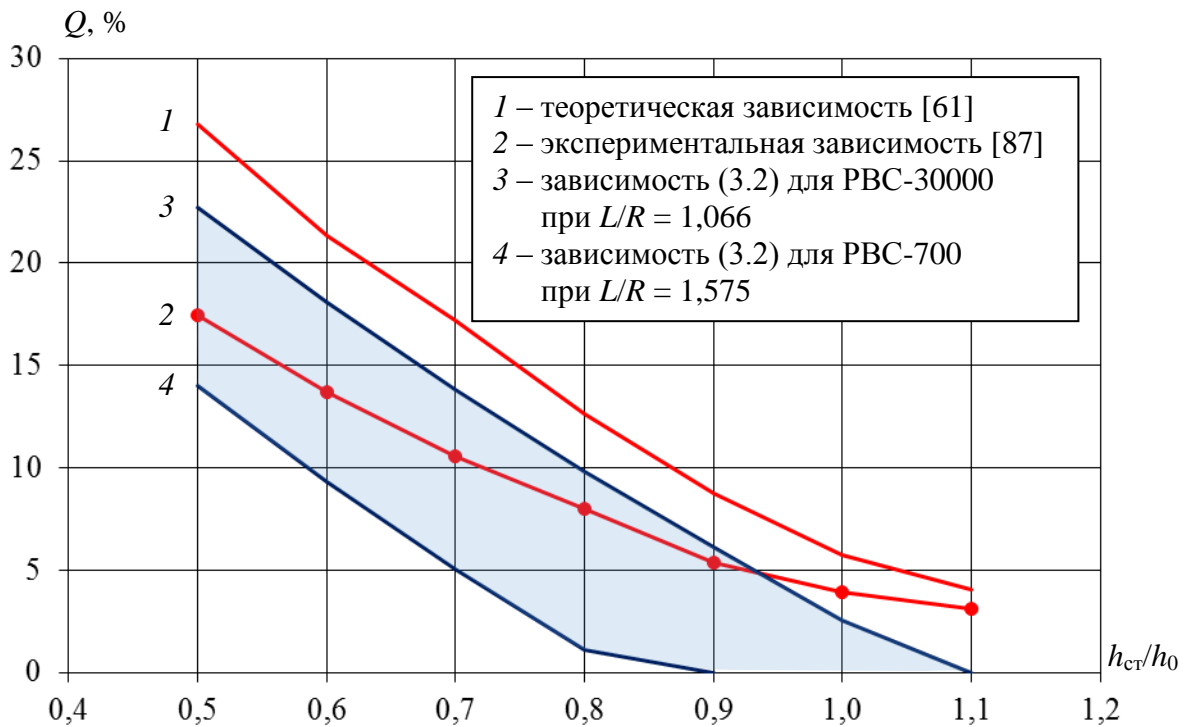


Рисунок 3.5 – Сравнительный анализ зависимостей по определению доли жидкости, перелившейся через ограждение при разрушении типовых резервуаров номинальным объемом от 700 до 30000 м³ включительно (закрашенная область между зависимостями 3 и 4 включает в себя остальные зависимости, определяемые по формуле (3.2))

Однако имеется и существенное отличие зависимостей, получаемых для типовых резервуаров по формуле (3.2), от зависимостей 1 и 2, связанное с возможностью получения конкретных значений отношения $h_{ст}/h_0$, при котором не происходит перелив жидкости через ограждение ($Q = 0\%$).

Таким образом, в результате выполненных исследований и обработки экспериментальных данных, получена эмпирическая зависимость для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку в зависимости от ее высоты и расстояния до 3 м до стенки резервуара, которая и рекомендуется для практического использования при оценке пожарных и промышленных рисков и разработки соответствующих мероприятий, направленных на предотвращение каскадного развития пожара на объектах отрасли с эксплуатацией резервуаров типа «стакан в стакане». При этом вследствие возможного перелива части жидкости через защитную стенку при ее высоте менее чем $1,1h_0$, необходимо обустройство дополнительного ограждения, на определение геометрических параметров которого и были направлены дальнейшие исследования.

3.4 Определение геометрических параметров дополнительного ограждения для резервуара с защитной стенкой

В результате выполненной на лабораторном стенде серии экспериментов по удержанию потока жидкости защитной стенкой установлено, что при недостаточной ее высоте (менее $1,1h_0$) возможен перелив части жидкости (см. рисунок 3.5) с разливом на прилегающей к резервуару территории объекта. С целью предупреждения в этом случае распространения возможного пожара пролива нефти или нефтепродуктов в резервуарном парке с резервуарами типа «стакан в стакане» рекомендуется предусматривать дополнительное ограждение, которое может быть конструктивно выполнено в виде земляного обвалования или ограждающей вертикальной стены из негорючих материалов.

Для определения геометрических параметров предлагаемых дополнительных ограждений (расстояния от ограждения до защитной стенки РВСЗС и высоты ограждения) на разработанном лабораторном стенде проведены эксперименты, методика выполнения которых аналогична ранее описанной методике в разделе 3.2 настоящей работы. Эксперименты проводились с модельными резервуарами, соответствующими в выбранном масштабе моделирования натурным резервуарам с номинальными объемами от 700 до 30000 м³ (см. таблицу 3.1).

На первом этапе проведена серия опытов по определению максимального расстояния, на которое обрушивается жидкость, перелившаяся через защитную стенку при разрушении внутреннего резервуара, то есть расстояния L_{\max} от защитной стенки до места падения на горизонтальное основание выбрасываемой из РВСЗС жидкости. Эксперименты проводили при высоте защитной стенки РВСЗС, составляющей 80, 90 и 100 % высоты максимально заполненного жидкостью внутреннего резервуара, и при расстоянии между стенкой внутреннего резервуара и защитной стенкой, равным $l = 1,8$ м. Принципиальная схема определения максимального расстояния L_{\max} от защитной стенки до места падения выбрасываемой жидкости показана на рисунке 3.6.

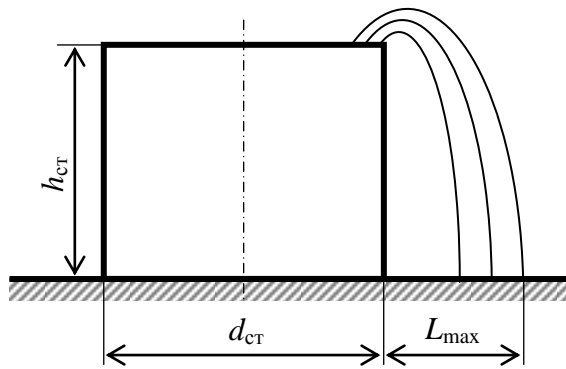


Рисунок 3.6 – Схема определения максимального расстояния L_{\max} от защитной стенки до места падения выбрасываемой из РВСЗС жидкости:

$h_{\text{ст}}$ – высота защитной стенки РВСЗС;
 $d_{\text{ст}}$ – диаметр защитной стенки

На рисунке 3.7, в качестве примера, представлены характерные кадры взаимодействия потока жидкости с защитной стенкой и дополнительным ограждением при разрушении модели резервуара в масштабе 1:30 к натурному РВС-700 м³.

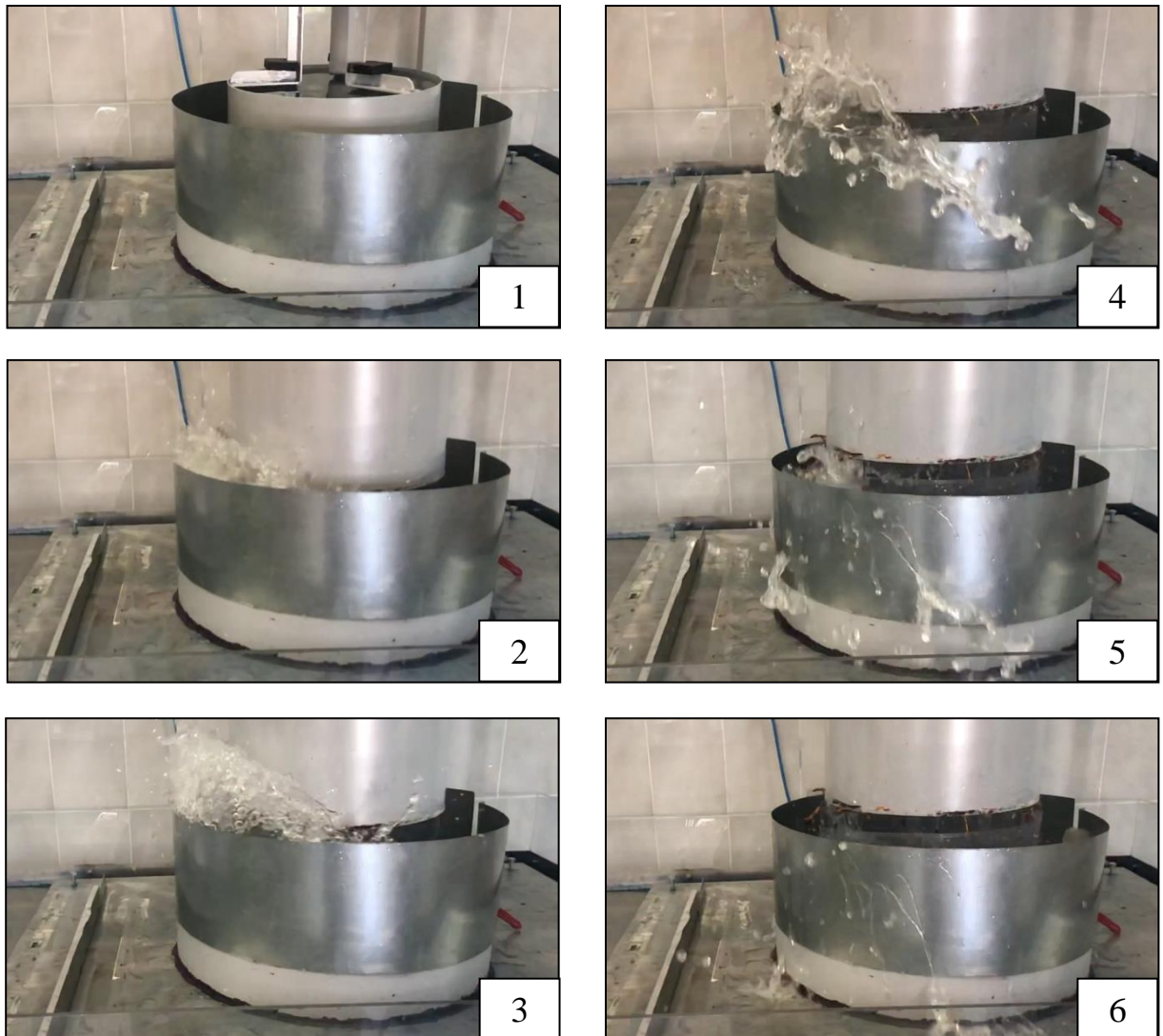


Рисунок 3.7 – Характерные кадры взаимодействия потока жидкости, образующегося при разрушении внутреннего резервуара, с защитной стенкой РВСЗС высотой $0,9h_0$

Следует отметить, что аналогичные результаты перелива жидкости через защитную стенку и ее взаимодействие с дополнительным ограждением наблюдались и при разрушении остальных рассматриваемых модельных резервуаров.

Оценку допущенных погрешностей при измерении максимального расстояния L_{\max} от защитной стенки до места падения выбрасываемой из РВСЗС жидкости находили из следующих положений.

За наиболее вероятное значение максимального расстояния L_{\max} до защитной стенки принимали ее среднее арифметическое значение. Для нахождения случайной ошибки доверительная вероятность принята равной $\alpha = 0,95$ [115]. Тогда вероятность того, что результат измерений отличается от истинного значения на величину не более чем ΔL_{\max} (здесь ΔL_{\max} – доверительный интервал) при условии $n \ll \infty$ (n – количество измерений), будет равна:

$$P(\bar{L}_{\max} - \Delta L_{\max} < L_{\max} < \bar{L}_{\max} + \Delta L_{\max}) = \alpha. \quad (3.3)$$

Обработку результатов измерений производили в следующей последовательности.

Определяли среднее арифметическое значение измеряемого расстояния:

$$\bar{L}_{\max} = \frac{L_{\max 1} + L_{\max 2} + \dots + L_{\max n}}{n} = \frac{\sum_1^n L_{\max i}}{n}, \text{ мм}, \quad (3.4)$$

где $L_{\max 1}, L_{\max 2}, \dots, L_{\max n}$ – результаты отдельных измерений.

Находили абсолютные погрешности отдельных измерений:

$$\Delta L_{\max i} = \bar{L}_{\max} - L_{\max i}, \text{ мм}. \quad (3.5)$$

Рассчитывали среднюю квадратичную погрешность отдельных измерений:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\bar{L}_{\max} - L_{\max 1})^2 + \dots + (\bar{L}_{\max} - L_{\max n})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta L_{\max i})^2}{n - 1}}. \quad (3.6)$$

Определяли среднюю квадратичную погрешность среднего арифметического:

$$\tilde{s} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{(\bar{L}_{\max} - L_{\max 1})^2 + \dots + (\bar{L}_{\max} - L_{\max n})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta L_{\max i})^2}{n(n-1)}}. \quad (3.7)$$

По количеству наблюдений n и выбранной доверительной вероятности α определяли коэффициент Стьюдента t_s (таблица II [116]).

Записывали величину доверительного интервала от среднего арифметического значения измеряемой величины:

$$\Delta L_{\max} = t_s \tilde{s}, \text{ мм.} \quad (3.8)$$

Если случайная погрешность оказывалась сравнимой с погрешностью инструментальной линейки $\delta_{\text{лин}} = 0,5$ мм, то учитывали случайную и систематическую погрешность одновременно, и рассчитывали величину доверительного интервала по формуле [116]:

$$\Delta L_{\max} = \sqrt{t_s^2 \tilde{s}^2 + \left(\frac{2}{3} \delta\right)^2}, \text{ мм} \quad (3.9)$$

где $\delta = 2\delta_{\text{лин}}$.

Определяли относительную погрешность эксперимента:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_{\max}}{L_{\max}} 100\%. \quad (3.10)$$

По таблице II [116] нашли коэффициент Стьюдента $t_s = 3,18$ (при $n = 3$ и $\alpha = 0,95$).

Результаты определения расстояний L_{\max} и доверительного интервала ΔL_{\max} приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Расстояния от места падения выбрасываемой из РВСЗС жидкости до защитной стенки

Номинальный объем натурного резервуара, м^3	Относительная высота защитной стенки РВСЗС $h_{\text{ст}}/h_0$	Расстояние до защитной стенки L_{max} , мм	Среднее арифметическое значение измеренного расстояния \bar{L}_{max} , мм	Относительная погрешность, %	Доверительный интервал ΔL_{max} , мм
700	0,8	229	229,0	0,64	1,46
		228			
		230			
	0,9	162	163,3	1,28	2,09
		165			
		163			
	1,0	161	161,3	1,30	2,09
		163			
		160			
2000	0,8	155	158,0	2,21	3,50
		159			
		160			
	0,9	112	112,7	0,89	1,00
		111			
		113			
	1,0	115	113,0	2,37	2,68
		111			
		113			
5000	0,8	112	105,7	1,30	1,46
		113			
		111			
	0,9	81	80,1	2,59	2,09
		79			
		81			
	1,0	79	78,7	2,66	2,09
		80			
		77			
10000	0,8	86	85,0	1,72	1,46
		84			
		85			
	0,9	57	58,7	3,57	2,09
		59			
		60			
	1,0	61	59,7	3,51	2,09
		58			
		60			

Продолжение таблицы 3.4

Номинальный объем натурного резервуара, м^3	Относительная высота защитной стенки РВСЗС $h_{\text{ст}}/h_0$	Расстояние до защитной стенки L_{max} , мм	Среднее арифметическое значение измеренного расстояния \bar{L}_{max} , мм	Относительная погрешность, %	Доверительный интервал ΔL_{max} , мм
20000	0,8	57	58,3	2,81	1,64
		59			
		59			
	0,9	42	42,0	3,47	1,46
		43			
		41			
	1,0	40	41,3	3,97	1,64
		42			
		42			
30000	0,8	51	51,3	4,08	2,09
		53			
		50			
	0,9	34	35,3	5,92	2,09
		37			
		35			
	1,0	36	37,0	3,94	1,46
		38			
		37			

В таблице 3.5 приведены расстояния от дополнительного ограждения до защитной стенки с учетом доверительного интервала ΔL_{max} и масштаба модели.

Таблица 3.5 – Расстояние от дополнительного ограждения до защитной стенки

Номинальный объем натурного резервуара, м^3	Относительная высота защитной стенки РВСЗС $h_{\text{ст}}/h_0$	Расстояние до защитной стенки, м
700	0,8	6,91
	0,9	4,96
	1,0	4,90
2000	0,8	6,94
	0,9	4,89
	1,0	4,97
5000	0,8	6,81
	0,9	4,96
	1,0	4,84

Продолжение таблицы 3.5

Номинальный объем натурного резервуара, м ³	Относительная высота защитной стенки РВСЗС $h_{ст} / h_0$	Расстояние до защитной стенки, м
10000	0,8	7,03
	0,9	4,92
	1,0	5,02
20000	0,8	6,84
	0,9	4,95
	1,0	4,90
30000	0,8	6,94
	0,9	4,86
	1,0	5,00

Анализ приведенных в таблице 3.5 данных показывает, что расстояние от дополнительного ограждения до защитной стенки не зависит от номинального объема натурного резервуара, а зависит от относительной высоты защитной стенки РВСЗС. При относительной высоте защитной стенки $h_{ст} / h_0$, равной 0,8, расстояние до защитной стенки находится в пределах 6,81–7,03 м и принято равным 7,0 м. При относительной высоте защитной стенки более 0,9 расстояние до защитной стенки принимает значения, находящиеся в пределах 4,84–5,02 м, и принято равным 5,0 м. Далее эти расстояния определены как минимальные допустимые расстояния от дополнительного ограждения до защитной стенки и обозначены $l_{доп}$.

На втором этапе лабораторных исследований дополнительное ограждение (вертикальную стену) различной высоты устанавливали на расстоянии $l_{доп}$ от защитной стенки на различных моделях РВСЗС с варьируемой относительной высотой защитной стенки (рисунок 3.8). При наличии перелива жидкости через вертикальную стену высоту последней увеличивали до тех пор, пока визуально не наблюдалось отсутствие перелива через нее жидкости. Обработка результатов экспериментов производилась по аналогии с обработкой данных, полученных по определению минимального расстояния от дополнительного ограждения до защитной стенки РВСЗС.

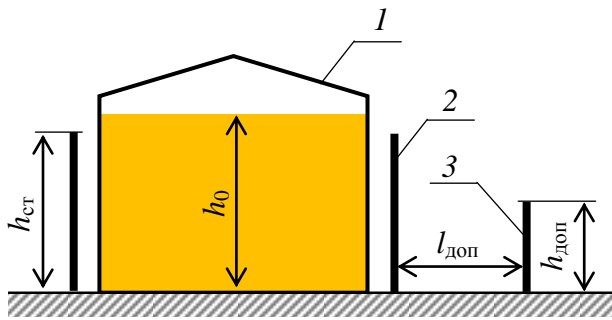


Рисунок 3.8 – Принципиальная схема определения минимальной высоты дополнительного ограждения:
 1 – основной (внутренний) резервуар с максимальным уровнем жидкости h_0 ;
 2 – защитная стенка РВСЗС; 3 – дополнительное ограждение (вертикальная стена)

В проведенных опытах по удержанию дополнительным ограждением в виде вертикальной стены жидкости, переливающейся через защитную стенку при разрушении внутреннего резервуара РВСЗС, получены следующие данные в масштабе всех рассмотренных природных резервуаров:

- при относительной высоте защитной стенки $h_{ст} / h_0 = 0,8$ высота вертикальной стены, расположенной на расстоянии 7,0 м от защитной стенки РВСЗС, находилась в пределах 1,68–1,82 м;

- при относительной высоте защитной стенки $h_{ст} / h_0 = 0,9$ высота вертикальной стены, расположенной на расстоянии 5,0 м от защитной стенки РВСЗС, находилась в пределах 1,71–1,76 м;

- при относительной высоте защитной стенки $h_{ст} / h_0 = 1,0$ высота вертикальной стены, расположенной на расстоянии 5,0 м от защитной стенки РВСЗС, находилась в пределах 1,26–1,31 м.

В таблице 3.6 приведены значения минимальной допустимой высоты дополнительного ограждения (вертикальной стены), на 0,2 м превышающей найденные экспериментально максимальные значения [41].

Таблица 3.6 – Геометрические параметры дополнительного ограждения (вертикальной стены) для полной локализации пролива жидкости при разрушении внутреннего резервуара РВСЗС, номинальным объемом от 700 до 30000 м³

Высота защитной стенки РВСЗС $h_{ст}$, м	Минимальное допустимое расстояние от дополнительного ограждения до защитной стенки РВСЗС $l_{доп}$, м	Минимальная допустимая высота дополнительного ограждения $h_{доп}$, м
$0,8h_0$	7,0	2,0
$0,9h_0$	5,0	2,0
h_0	5,0	1,5

Таким образом, в результате экспериментальных исследований определены геометрические параметры дополнительного ограждения в виде вертикальной стены (минимальная допустимая высота стены, устанавливаемой на минимальном допустимом расстоянии от дополнительного ограждения до защитной стенки РВСЗС), предназначенного для полной локализации пролива жидкости при квазимгновенном разрушении внутреннего резервуара РВСЗС. Полученные данные рекомендуются для практического использования с целью предупреждения каскадного развития аварии в резервуарных парках объектов НГО с эксплуатацией РВСЗС.

ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ С ЗАЩИТНОЙ СТЕНКОЙ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ»

4.1 Общие положения

Настоящие рекомендации подготовлены на основании результатов научно-исследовательских работ, выполненных в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, анализа данных о полных разрушениях РВС на производственных объектах, как в России, так и за рубежом, а также анализа нормативных документов, регламентирующих требования пожарной и промышленной безопасности к резервуарным паркам хранения нефти и нефтепродуктов в РВС, в том числе, РВСЗС [117].

Рекомендации предназначены для использования в практической работе подразделениями, уполномоченными на решение задач в области пожарной безопасности, персоналом, осуществляющим эксплуатацию резервуарных парков хранения нефти и нефтепродуктов, организациями, разрабатывающими проектную документацию на ограждения РВС, в том числе, при оценке пожарных и промышленных рисков.

Изложенные в рекомендациях результаты теоретических и экспериментальных исследований могут являться основой для разработки нормативного документа (дополнения существующих) в области обеспечения пожарной безопасности производственных объектов при хранении нефти и нефтепродуктов в РВСЗС.

Рекомендации содержат метод определения геометрических параметров защитной стенки резервуаров типа «стакан в стакане», а также рекомендуемые геометрические параметры дополнительного ограждения для таких типов резервуаров, с целью предупреждения каскадного развития аварии в резервуарном парке объекта защиты.

4.2 Метод определения геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения резервуаров типа «стакан в стакане»

Настоящий метод устанавливает порядок расчета геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения резервуаров типа «стакан в стакане», предназначенных для полного или частичного удержания волны прорыва при квазимгновенном разрушении внутреннего наземного резервуара, в диапазоне изменения исходных данных:

$$700 \leq V_{\text{н}} \leq 30000;$$

$$1,5 \leq l \leq 3,0,$$

где $V_{\text{н}}$ – номинальный объем резервуара, м³;

l – расстояние от защитной стенки до стенки резервуара, м.

Для полного удержания волны прорыва в границах защитной стенки ее высота $h_{\text{ст}}$, м, должна быть выше максимального уровня жидкости в резервуаре h_0 , м, не менее чем на 10 %.

При $h_{\text{ст}} < 1,1h_0$ возможен перелив доли жидкости Q , %, через защитную стенку, рассчитываемой по формуле:

$$Q = 89,8017 - 17,1986 \frac{L}{R} - 68,899 \sqrt{\frac{h_{\text{ст}}}{h_0}}, \quad (4.1)$$

где $L = l + R$ – характерное расстояние от центра внутреннего резервуара, м;
 R – радиус внутреннего резервуара, м.

При расчете по формуле (4.1) возможно получение отрицательных значений, при этом Q принимается равным нулю.

На рисунке 4.1 представлены графические зависимости, построенные по формуле (4.1) для предварительной оценки доли жидкости, которая может перелиться через защитную стенку при квазимгновенном разрушении внутреннего типового резервуара (таблица 4.1).

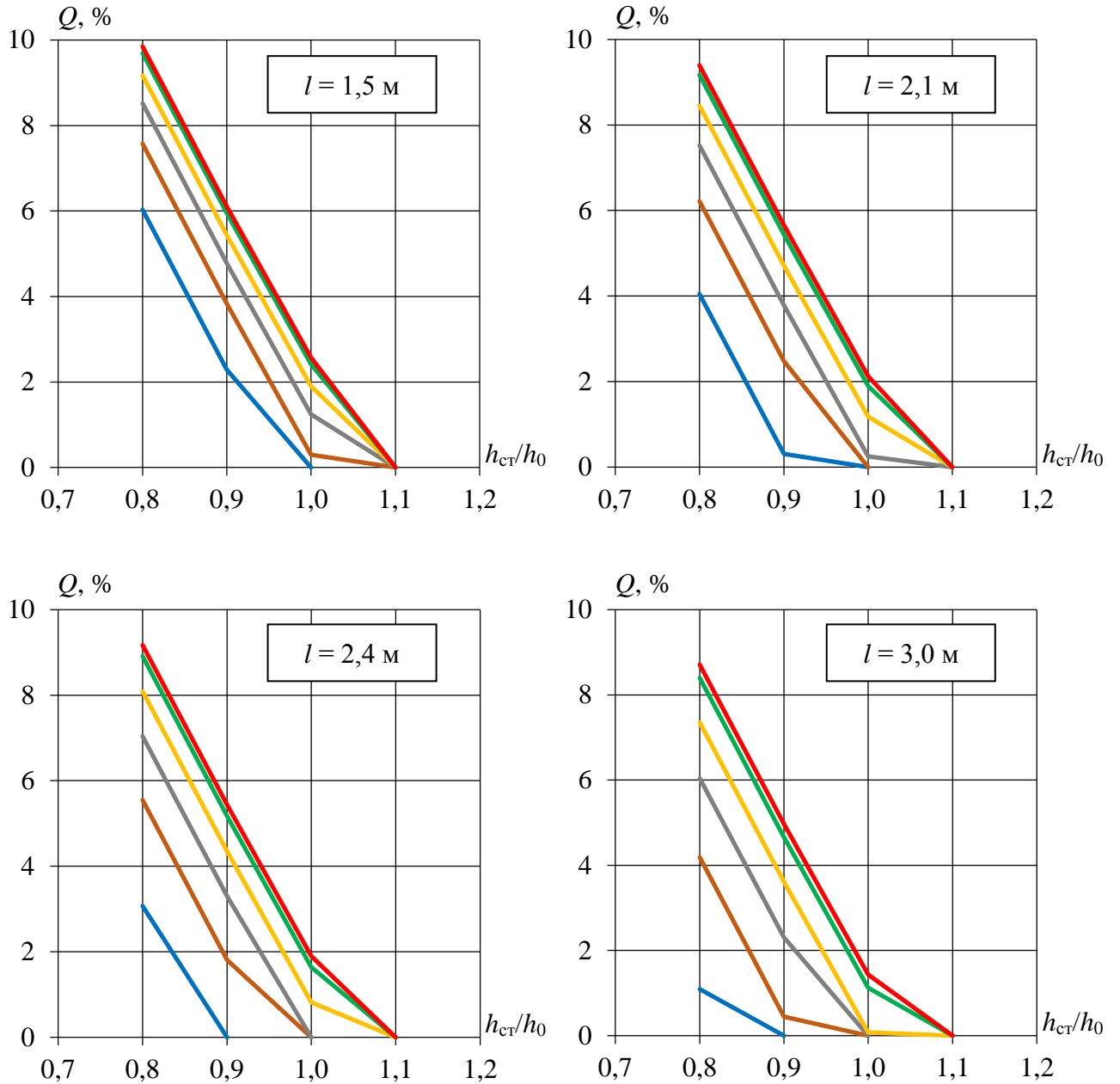


Рисунок 4.1 – Графические зависимости для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку при разрушении типовых резервуаров номинальным объемом от 700 до 30000 м³ включительно:

— PVC-700 м³; — PVC-2000 м³; — PVC-5000 м³
 — PVC-10000 м³; — PVC-20000 м³; — PVC-30000 м³

Таблица 4.1 – Параметры типовых резервуаров

Параметр резервуара	Номинальный объем резервуара, м ³					
	700	2000	5000	10000	20000	30000
Внутренний диаметр, м	10,43	15,18	20,92	28,50	39,90	45,60
Высота стенки, м	9,00	12,00	15,00	18,00	18,00	18,00

Для полного удержания волны прорыва в границах единичного РВСЗС, группы РВСЗС или резервуарного парка, следует дополнительно обустроить ограждение, в качестве которого, например, могут применяться земляное обвалование или вертикальная ограждающая стена из негорючих материалов.

Дополнительное ограждение рассчитывается на гидростатическое удержание частично пролитого через защитную стенку продукта, при этом его высоту рекомендуется определять по таблице 4.2 (рисунок 4.2).

Таблица 4.2 – Геометрические параметры дополнительного ограждения (вертикальной стены) для полной локализации пролива жидкости при разрушении внутреннего резервуара РВСЗС, номинальным объемом от 700 до 30000 м³

Высота защитной стенки РВСЗС $h_{ст}$, м	Минимальное допустимое расстояние от дополнительного ограждения до защитной стенки РВСЗС $l_{доп}$, м	Минимальная допустимая высота дополнительного ограждения $h_{доп}$, м
$0,8h_0$	7,0	2,0
$0,9h_0$	5,0	2,0
h_0	5,0	1,5

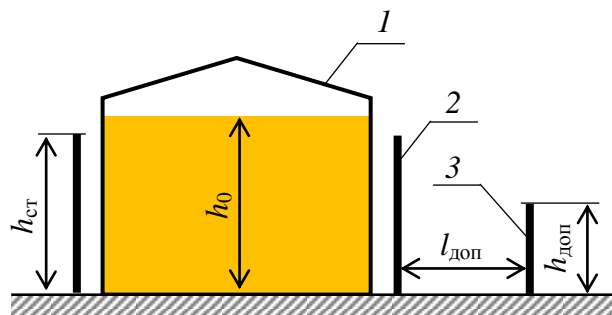


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема определения минимальной высоты дополнительного ограждения:

1 – основной (внутренний) резервуар с максимальным уровнем жидкости h_0 ;
2 – защитная стенка РВСЗС; 3 – дополнительное ограждение (вертикальная стена)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам анализа статистики разрушений РВС на объектах нефтегазовой отрасли в России и характерных примеров аварий РВС за рубежом, показана необходимость совершенствования систем ограничения пожара пролива нефти или нефтепродукта, в частности, за счет применения перспективных конструкций резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане».

2. Выявлены несоответствия в требованиях действующих нормативных документов в области обеспечения промышленной безопасности РВСЗС, а также отсутствие нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности к РВСЗС. Обоснована актуальность проведения исследований, направленных на обеспечение пожарной безопасности таких типов резервуаров, и, в первую очередь, на нормирование требований к геометрическим параметрам защитной стенки и, при необходимости, дополнительного ограждения.

3. На основе соблюдения критериев подобия и условий моделирования гидравлических явлений разработаны лабораторный стенд и методики проведения экспериментов по оценке характеристик волны прорыва (скорость, высота по трассе растекания), образующейся при квазимгновенном разрушении внутреннего резервуара, а также оптимальных геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения.

Сравнительный анализ критериев подобия (в натуре и на модели) выполнен с использованием результатов проведенного численного моделирования процесса разрушения РВС-30000 м³ с водой в программном комплексе для инженерных расчетов *LSDYNA*, а также ранее выполненного натурального эксперимента по разрушению РВС-700 м³ с водой. Удовлетворительная сходимость характеристик волны прорыва, образующейся при разрушении натурального и модельных резервуаров, позволила сделать вывод о возможности использования разработанного лабораторного стенда для нахождения искомых параметров ограждений для резервуаров номинальным объемом от 700 до 30000 м³.

4. В результате обработки экспериментальных данных, полученных с использованием лабораторного стенда, установлено, что для полной локализации волны прорыва в границах защитной стенки, установленной от стенки резервуара на исследуемом расстоянии от 1,5 до 3,0 м включительно, ее высота должна быть не менее чем на 10 % выше первоначального уровня жидкости в этом резервуаре. При снижении высоты защитной стенки вплоть до минимального значения, соответствующего статическому удержанию пролитого из резервуара продукта, происходит перелив части жидкости за пределы защитной стенки.

5. Обработка экспериментальных данных методом многофакторного регрессионного анализа позволила получить эмпирическую формулу для определения доли жидкости (Q , %), перелившейся через защитную стенку, в зависимости от ее высоты ($h_{ст}$, м), расстояния до стенки типового резервуара (l , м), его радиуса (R , м) и максимального в нем уровня жидкости (h_0 , м).

6. Для полной локализации части жидкости, перелившейся через защитную стенку (при $h_{ст} < 1,1h_0$), рекомендуется устраивать дополнительное ограждение, например, в виде земляного обвалования или вертикальной ограждающей стены из негорючих материалов. Экспериментально установлено, что: при $h_{ст} = 0,8h_0$ минимальное расстояние от защитной стенки до дополнительного ограждения ($l_{доп}$) должно составлять не менее 7 м, при этом минимальная высота этого ограждения ($h_{доп}$) должна составлять не менее 2 м; при $h_{ст} = 0,9h_0$ – минимальное расстояние $l_{доп}$ не менее 5 м и высота $h_{доп}$ не менее 2,0 м; при $h_{ст} = h_0$ – минимальное расстояние $l_{доп}$ не менее 5 м и высота $h_{доп}$ не менее 1,5 м.

7. По результатам теоретических и экспериментальных исследований для РВСЗС разработаны рекомендации по определению геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения, на основе которых подготовлен проект приложения В «Метод определения геометрических параметров ограждений РВСЗС» в национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53324-2009 «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов, В.И. Основы нефтегазопромыслового дела [Текст] / В.И. Кудинов. – Ижевск: Институт компьютерных исследований (ИКИ), 2011. – 734 с.
2. Лазаренко, Б.С. Нефтебазы и нефтяные терминалы: от современного проектирования до эффективной эксплуатации [Текст] / Б.С. Лазаренко, Е.Н. Макушин // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 1. – С. 70-75.
3. Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения [Текст] / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. – М.: Стройиздат, 1968. – 206 с.
4. Розенштейн, И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров [Текст] / И.М. Розенштейн. – М.: Недра, 1995. – 253 с.
5. Кандаков, Г.П. Анализ причин аварий вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] / Г.П. Кандаков, В.В. Кузнецов, М.И. Лукиенко // Трубопроводный транспорт. – 1995. – № 4. – С. 6-7.
6. Прохоров, В.А. Оценка параметров безопасности эксплуатации нефтехранилищ в условиях Севера [Текст] / В.А. Прохоров. – М.: Недра-Бизнесцентр, 1999. – 142 с.
7. Аварии резервуаров и способы их предупреждения [Текст] / В.Б. Галлеев [и др.]; под ред. В.Б. Галеева и Р.Г. Шарафиева – Уфа: Уфимский полиграфкомбинат, 2004. – С. 5-18.
8. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 398 с.
9. Швырков, С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара [Текст]: монография / С.А. Швырков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 289 с.
10. Политика предотвращения техногенных аварий и катастроф [Текст] / Под ред. М.И. Фалеева. – М.: Институт риска и безопасности, 2002. – 316 с.
11. Маршалл, В. Основные опасности химических производств [Текст] / В. Маршалл; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с.

12. Владимиров, В.А. Катастрофы и экология [Текст]: монография / В.А. Владимиров, В. И. Измалков. – М.: Наука, 2000. – 380 с.
13. Брусневич, Х. Пожары резервуаров с нефтепродуктами – факты и опыт [Текст] / Х. Брусневич. – М.: Недра, 1986. – 134 с.
14. Шкинев, А.Н. Аварии в строительстве [Текст] / А.Н. Шкинев. – М.: Стройиздат, 1984. – 284 с.
15. Corbo L. Raffinerie brand in Stalien [Text] / L. Corbo // Brand aus. – 1986. – В. 90. – № 1. – S. 392-394.
16. Пожар на нефтехранилище [Текст] // Пожарное дело. – 1986. – № 11. – С. 28-29.
17. Либовиц, Г. Разрушение [Текст] / Г. Либовиц. – М.: Мир – Metallургия, 1973-1977. – Т. 1-7.
18. Grotener in «feuerseherem» tank [Text] // Gefoikrliche Jadung. – 1983. – № 12. – S. 520-521.
19. Analysis of a tank fire «olassic» [Text] // Fire Engineers journal. – 1987. – № 3. – P. 15-17.
20. Сафарян, М.К. Современное состояние резервуаростроения и перспективы его развития [Текст]: экспресс-информ. / М.К. Сафарян. – М.: ЦНИИТЭнефтехим: Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1972. – 82 с.
21. Исследование причин разрыва резервуара [Текст] / Пер. с англ. Д.Л. Чернов // Реферативный журнал: Пожарная охрана. – 1988. – № 23. – С. 16.
22. Explosionen, Verpuffungen, Brände bei Arbeiten an Tanks [Text] // Eisen and Stahl. – 1981. – № 10. – S. 384-391.
23. Нобукадзу, О. Хрупкое разрушение резервуаров, рассчитанных на высокое давление, и меры защиты от этого разрушения [Текст] / О. Нобукадзу; пер. с англ. Ж. Нихон Эзосен Таккей Си, 1971. – Т. 46. – № 510.
24. Кавано, К. Проблемы проектирования крупногабаритных стальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и их анализ [Текст] / К. Кавано; пер. с англ. Ж. Хайкан Гидзюцу, 1974. – Т. 16. – № 11.

25. Авария большого резервуара в Японии [Текст] / Пер. с англ. Ж. Хайкан Гидзюцу, 1975. – Т. 8. – № 5.
26. Трагические дни [Текст] // Пожарное дело. – 1972. – № 2. – С. 26-29.
27. Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций [Текст] / Я. Аугустин, Е. Шледзевский; пер. с польск. – М.: Стройиздат, 1978. – 183 с.
28. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков. – М.: Недра, 1984. – С. 12-14.
29. На нефтебазе в Нижнем Тагиле произошел пожар [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tagilka.ru/news/news_detail/?ID=713 (дата обращения: 14.06.2019 г.).
30. Пожар на нефтебазе в Нижнем Тагиле [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.obltv.ru/news/incidents/pozhar_proizoshol_na_neftebaze_v_nizhnem_tagile/ (дата обращения: 14.06.2019 г.).
31. Взрыв на нефтебазе в Нижнем Тагиле. Видео очевидцев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tyumentimes.ru/2014/11/27/vzryv-na-neftebaze-v-nizhnem-tagile-video-ochevidcev> (дата обращения: 13.06.2019 г.).
32. В Нижнем Тагиле загорелась нефтебаза «Газпромнефти» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.e1.ru/news/spool/news_id-427497.html (дата обращения: 14.06.2019 г.).
33. Уроки, извлеченные из аварий 2015 г. АО «Газпромнефть-Терминал». 27.07.2015 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/2015%20%d0%b3%d0%be%d0%b4/> (дата обращения: 14.06.2019 г.).
34. Уроки, извлеченные из аварий 2014 г. ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» ТПП «ЛУКОЙЛ-Усинскнефтегаз». 21.05.2014 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/2014%20%d0%b3%d0%be%d0%b4/> (дата обращения: 14.06.2019 г.).
35. ЧП на нефтегазовых предприятиях в России в 2012-2014 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ria.ru/spravka/20140522/1008831870.html#ixzz45LjIrtTr> (дата обращения: 14.06.2019 г.).

36. Пожар в Лукойл-Коми г. Усинск [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=D1fhv_m9tVE (дата обращения: 14.06.2019 г.).

37. Пожар в Иркутской области: как два дня тушили цистерну с нефтью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ria.ru/20130822/957907295.html> (дата обращения: 14.06.2019 г.).

38. Пожар на нефтехранилище в Ангарске [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ria.ru/trend/angarsk_fire_03072012/#ixzz49mgTUT00 (дата обращения: 14.06.2019 г.).

39. Нефтяной резервуар под Ангарском тушили почти 30 часов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ria.ru/incidents/20130822/957972925.html#ixzz49mf7TiP0> (дата обращения: 14.06.2019 г.).

40. Пожар в Ангарске сейчас: причина, что произошло 21.08.2013 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.dp.ru/a/2013/08/22/Pozhar_v_Angarske_sejchas/ (дата обращения: 14.06.2019 г.).

41. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 26.12.2013 г. № 837) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

42. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт (введ. в действ. Приказом Росстандарта от 31.08.2016 г. № 982-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

43. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: руководство (введ. в действ. Приказом Ростехнадзора от 26.12.2012 г. № 780) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

44. СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: стандарт организации Ассоциация «Ростехэкспертиза» (введен в действие решением НТС НО Ассоциация «Ростехэкспертиза» от 19.05.2009 г. протокол № 2) // Режим доступа: <http://rustank.ru/standard/> (дата обращения: 14.06.2019 г.).

45. ИД-2010. Изменения и дополнения за 2010 г. к стандарту организации СТО-СА-03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [Электронный ресурс]: изменения и дополнения к стандарту организации Ассоциация «Ростехэкспертиза» (утв. решением НТС НО Ассоциация «Ростехэкспертиза» от 17.11.2010 г. № 5) // Режим доступа: <http://rustank.ru/standard/> (дата обращения: 14.06.2019 г.).

46. Швырков, А.С. Нефтяные резервуары типа «стакан в стакане»: проблемы нормирования требований пожарной безопасности к защитной стенке [Текст] / А.С. Швырков // Материалы 25-ой Международной научн.-технич. конф.: Системы безопасности – 2016. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 537-540.

47. Швырков, А.С. Актуальные вопросы нормирования требований пожарной безопасности к защитной стенке нефтяных резервуаров типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / А.С. Швырков, С.А. Горячев, С.А. Швырков // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 3. – 8 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/32-03-16.ttb.pdf>.

48. Еленицкий, Э.Я. Современные проблемы расчета резервуарных конструкций [Электронный ресурс] / Э.Я. Еленицкий // Тезисы доклада на научн.-практ. конф.: Перспективы развития резервуаростроения. – Саратов, 2002. – Режим доступа: <http://www.rmk.ru/konf2002/old/elenickij.php> (дата обращения 12.05.2014).

49. Еленицкий, Э.Я. Повышение безопасности резервуарных парков за счет применения резервуаров со стальной защитной стенкой [Текст] / Э.Я. Еленицкий, О.В. Дидковский, Е.В. Худяков // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2007. – № 1. – С. 17-22.

50. Мущанов, В.Ф. Проблемы проектирования двухстенчатых резервуаров [Текст] / В.Ф. Мущанов, И.В. Роменский, Д.И. Роменский // Металлические конструкции. – 2007. – Т. 13. – № 1. – С. 51-64.

51. Еленицкий, Э.Я. Расчет защитной стенки вертикального цилиндрического стального резервуара в условиях аварии [Текст] / Э.Я. Еленицкий, О.В. Дидковский, Е.В. Худяков // Материалы Международной научн.-практ. конф: Новые решения конструкций, технологии сооружения и ремонта стальных резервуаров. – Самара – Нижний-Новгород, 2007. – С. 164-169.

52. Склярова, Н.А. Стакан в стакане: безопасное решение [Текст] / Н.А. Склярова // Нефтегазовая вертикаль. – 2007. – № 2. – 4 с.

53. Дидковский, О.В. Совершенствование нормативной базы для нефтяных стальных резервуаров – важная составляющая в развитии топливно-энергетического комплекса России [Текст] / О.В. Дидковский [и др.] // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2009. – № 11. – С. 4-9.

54. Пат. 2507359 Российская Федерация, МПК E04H 7/04. Резервуар с защитной стенкой [Текст] / Дидковский О.В., Еленицкий Э.Я.; заявитель и патентообладатель ООО «ГЛОБАЛТЭНКСИНЖИНИРИНГ». – 2011144270/03; заявл. 01.11.2011; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5. – 7 с.

55. Барвинко, А.Ю. Повышение работоспособности двойного днища двустенных резервуаров для хранения нефти [Текст] / А.Ю. Барвинко, Ю.П. Барвинко, А.Н. Яшник // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2012. – №1. – С. 10-12.

56. Спириденко, Л.М. Опыт разработки нормативной базы в области резервуаростроения в республике Беларусь [Текст] / Л.М. Спириденко, А.И. Бондарчук // Труды нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2012. – № 4. – С. 98-105.

57. Дидковский, О.Б. Совершенствование нормативной базы для вертикальных стальных резервуаров [Электронный ресурс] / О.Б. Дидковский [и др.]. – Режим доступа: <https://www.himstalcon.ru/articles/sovershenstvovanie-normativnoy-bazyi-dlya-neftyanyih-stalnyih-rezervuarov> (дата обращения: 08.06.2019 г.).

58. Притула, А.Ф. Нефтесклады США [Текст] / А.Ф. Притула. – М.-Л.: Гл. ред. горно-топл. и геолого-развед. лит. ОНТИ НКТП СССР, 1937. – С. 287-290.

59. Ляндрес, З.О. Определение размеров и объемов оснований и обвалований стальных резервуаров [Текст] / З.О. Ляндрес. – М.: Изд-во Нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. – 46 с.

60. Лебедева, Л.Н. Лавинные выбросы при разрушении резервуаров с жидкостями [Текст] / Л.Н. Лебедева, М.В. Лурье, А.Н. Швырков // Инженерно-физический журнал. – 1991. – Т. 61. – № 5. – С. 726-731.

61. Шебеко, Ю.Н. Расчет влияния обвалования на растекание горючей жидкости при разрушении резервуара [Текст] / Ю.Н. Шебеко, А.П. Шевчук, И.М. Смолин // Химическая промышленность. – 1994. – № 4. – С. 230-233.

62. Швырков, А.Н. Волна прорыва на нефтебазе плюс эффект «Домино». Техногенные катастрофы при разрушении резервуаров и защита от них [Текст] / А.Н. Швырков, С.А. Швырков, С.А. Горячев // Охрана труда и социальное страхование. – 1997. – Вып.11. – С. 42-45.

63. Воробьев, В.В. Определение параметров дополнительных защитных преград, предназначенных для ограничения разлива нефтепродукта при внезапном разрушении РВС [Текст] / В.В. Воробьев, С.А. Горячев, С.А. Швырков // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2008. – № 4. – С. 8-10.

64. Батманов, С.В. Устойчивость противопожарных преград резервуарных парков к воздействию волны прорыва при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Батманов Сергей Васильевич. – М., 2009. – 175 с.

65. Богач, А.А. Определение гидродинамических нагрузок воздействия волны прорыва, образующейся при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара (РВС), на ограждающую стенку [Текст] / А.А. Богач, А.Ю. Муйземнек, С.А. Швырков // Сб. тр. шестой конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH; под ред. А.С. Шадского. – М.: Полигон-пресс, 2006. – С. 48-54.

66. Богач, А.А. Моделирование процесса разлива нефти на площадке терминала при квазимгновенном разрушении РВСПК-100000 [Текст] / А.А. Богач, С.А. Швырков // Сб. тр. седьмой конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH; под. ред. А.С. Шадского. – М.: Полигон-пресс, 2007. – С. 428-442.

67. Демехин, Ф.В. О проблеме тушения пожаров в резервуарах с кольцевой защитной стенкой [Текст] / Ф.В. Демехин, А.А. Таранцев, Д.И. Белов // Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России. – 2013. – № 2. – С. 68-75.

68. Демехин, Ф.В. Проблемы обеспечения пожарной безопасности резервуаров с защитной стенкой [Текст] / Ф.В. Демехин, А.А. Цой // Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России. – 2015. – № 1. – С. 34-40.

69. Афонская, Г.П. Анализ разрушений резервуаров [Текст] / Г.П. Афонская [и др.]; ЯГУ. – Якутск, 1997. – 50 с. – Деп. в ВИНТИ 06.10.97, № 2967-В97.

70. Бард, В.Л. Предупреждение аварий в нефтеперерабатывающих и нефтехимических производствах [Текст] / В.Л. Бард, А.В. Кузин. – М.: Химия, 1984. – 248 с.

71. Кондрашова, О.Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров [Электронный ресурс] / О.Г. Кондрашова, М.Н. Назарова // Нефтегазовое дело. – 2004. – № 2. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/files/ogbus/authors/Kondrashova/Kondrashova_1.pdf (дата обращения: 14.06.2019 г.).

72. API STD 650. Сварные стальные резервуары для хранения нефти [Электронный ресурс]: стандарт американского института нефти (2001) // Режим доступа: <http://gazovik-pgo.ru/cat/articles2/api650> (дата обращения: 01.03.2019 г.).

73. ПБ 03-381-00. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: отраслевые технические нормы (утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 27.09.2000 г. № 55) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

74. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: отраслевые технические нормы (утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 09.06.2003 г. № 76) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

75. ПБ 09-560-2003. Правила промышленной безопасности нефтебаз и складов нефтепродуктов [Электронный ресурс]: отраслевые технические нормы (утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 20.05.2003 г. № 33) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

76. Резервуары для ООО «БалтНафта», г. Калининград [Электронный ресурс]: фотогалерея завода металлоконструкций ЗАО «Калининградбуммонтаж». – Режим доступа: <http://kbm-group.ru/baltnafta-kaliningrad> (дата обращения: 14.06.2019 г.).

77. ГОСТ 31385-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт (утв. Приказом Ростехрегулирования от 31.07.2009 г. № 274-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

78. Быстрооткрывающиеся люки [Электронный ресурс]: фотогалерея завода котельно-вспомогательного оборудования и трубопроводов ЗАО «Самарский Завод «КВОиТ». – Режим доступа: <http://kvoit-samara.ru/produkt-luki-bystrootkravayshiesa.php> (дата обращения: 15.06.2019 г.).

79. BS EN 14015. Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above [Text]. – 2004. – 250 P.

80. Руководство по безопасности для нефтебаз и складов нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: руководство (введ. в действ. Приказом Ростехнадзора от 26.12.2012 г. № 777) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

81. Правила промышленной безопасности складов нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: федеральные нормы и правила (введ. в действ. Приказом Ростехнадзора от 07.11.2016 г. № 461) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

82. Тушение нефти и нефтепродуктов [Текст]: пособие / И.Ф. Безродный [и др.]. – М.: ВНИИПО, 1996. – 216 с.

83. ГОСТ Р 53324-2009. Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: национальный стандарт (утв. и введ. в действие Приказом Ростехрегулирования от 18.02.2009 г. № 100-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

84. Годунов, С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений гидродинамики [Текст]: мат. сб. / С.К. Годунов. – М., 1959. – Вып.3. – С. 117-143.

85. Masson, B. Application of Godunov's method to bluntbody calculations [Text] / B. Masson, T. Taylor, R. Foster // AIAA J. – 1969. – V. 7. – № 4. – P. 312-321.

86. Швырков, С.А. Обеспечение пожарной безопасности нефтебаз ограничением разлива нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных резервуаров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Швырков Сергей Александрович. – М., 2001. – 180 с.

87. Greenspan, H.P. Flow over a containment dyke [Text] / H.P. Greenspan, R.E. Young // J. Fluid Mechanics. – 1978. – V. 87. – № 1. – P. 179-192.

88. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [Электронный ресурс]: национальный стандарт (утв. и введ. в действ. Приказом Росстандарта от 27.12.2012 г. № 1971-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

89. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом МЧС России от 10.07.2009 г. № 404, зарегистрировано в Минюсте РФ 17.08.2009 г. № 14541) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

90. Воробьев, В.В. Дополнительные защитные преграды для снижения пожарной опасности разлива нефти и нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных резервуаров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Воробьев Владимир Викторович. – М., 2008. – 156 с.

91. Прогнозирование площади разлива нефтепродукта при квазимгновенном разрушении резервуара [Текст]: научн.-инф. сб. / С.А. Швырков [и др.]. – М.: ЦНИИТЭнефтехим: Транспорт и хранение нефтепродуктов, 2005. – Вып. 7. – С. 8-12.

92. Швырков, С.А. Анализ статистических данных разрушений резервуаров [Текст] / С.А. Швырков, В.Л. Семиков, А.Н. Швырков // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1996. – № 5. – С. 39-50.

93. Швырков, С.А. Статистика квазимгновенных разрушений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов [Текст] / С.А. Швырков [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – № 6. – С. 48-52.

94. Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов [Текст] / В.Т. Чоу. – М.: Стройиздат, 1969. – 464 с.

95. Полтавцев, В.И. Гидрологическое лабораторное моделирование [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Полтавцев [и др.]. – Л.: ЛГМИ, 1982. – 143 с.

96. Богомолов, А.И. Гидравлика [Текст]: учебн. для вузов / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

97. Лурье, М.В. Техника научных исследований. Размерность, подобие и моделирование явлений в проблемах транспорта и хранения нефти и газа [Текст] / М.В. Лурье. – М.: Нефть и газ, 2002. – 111 с.

98. Леви, И.И. Моделирование гидравлических явлений [Текст] / И.И. Леви. – Л.: Энергия, 1967. – 235 с.

99. Лятхер, В.М. Исследования открытых потоков на напорных моделях [Текст] / В.М. Лятхер, А.М. Прудовский. – М.: Энергия, 1971. – 288 с.

100. Лятхер, В.М. Гидравлическое моделирование [Текст] / В.М. Лятхер, А.М. Прудовский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 392 с.

101. Лабораторные работы по гидротехническим сооружениям [Текст]: учеб. для вузов / Под ред. Н.П. Розанова. – М.: Агропромиздат, 1989. – 208 с.

102. Панова, М.В. Лабораторный практикум по гидравлике [Текст]: учеб. пособие для вузов / М.В. Панова. – М.: Энергия. – 1969. – 128 с.

103. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / Под ред. П.Г. Киселева. – Изд. 5-е. М., Энергия, 1974. – 312 с.

104. Швырков, А.С. Лабораторный стенд для исследований влияния волны прорыва на защитную стенку резервуара типа «стакан в стакане» [Текст] / А.С. Швырков // Материалы 6-ой Международной научн.-практич. конф. молодых ученых и специалистов: Проблемы техносферной безопасности. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 122-128.

105. Швырков, А.С. Моделирование волны прорыва при разрушении резервуара типа «стакан в стакане» в лабораторных условиях [Текст] / А.С. Швырков // Материалы IV Всероссийской научн.-практ. конф.: Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 260-265.

106. Швырков, А.С. Лабораторное моделирование волны прорыва при разрушении резервуара типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / А.С. Швырков [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 2. – 8 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/23-02-17.ttb.pdf>.

107. Швырков, А.С. Лабораторное исследование параметров потока при разрушении резервуаров объемом до 30000 м³ [Электронный ресурс] / А.С. Швырков // Материалы VI Всероссийской научн.-практ. конф.: Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 391-396. – Компьютерные файлы: 11,1 Мб. – ISBN 978-5-6042853-0-5. – Режим доступа: <http://edufire37.ru/files/2018-2019/Сборник%202019.pdf> (дата обращения: 09.06.2019).

108. Швырков, А.С. Исследование параметров волны прорыва при разрушении резервуаров объемом до 30000 м³ в лабораторных условиях [Текст] / А.С. Швырков [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 1. – С. 12-18. – DOI: 10.25257/FE.2019.1.12-18.

109. Гидрометрическая микровертушка цифровая модернизированная (ГМЦМ) «МИКРО-01» [Текст]: паспорт № 91-22. – Минск-86: «Комплекс», 1990. – 24 с.

110. Напорная трубка Пито в комплекте с дифференциальными цифровыми манометрами [Электронный ресурс]: описание и характеристики. – Режим доступа: <http://теплоприбор.рф/catalog/napornaya-trubka-pito> (дата обращения: 15.09.2018 г.).

111. Швырков, А.С. Результаты экспериментального определения минимальной высоты защитной стенки резервуаров типа «стакан в стакане» [Текст] / А.С. Швырков, С.А. Горячев, С.А. Швырков // Материалы Международной научн.-практич. конф.: Современные пожаробезопасные материалы и технологии. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – Ч. II. – С. 180-184.

112. Швырков, А.С. Оценка минимальной высоты защитной стенки резервуаров типа «стакан в стакане» [Текст] / А.С. Швырков // Материалы 27-ой Международной научн.-технич. конф.: Системы безопасности – 2018. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 129-133.

113. Швырков, А.С. Результаты экспериментального определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку при полном разрушении резервуара типа «стакан в стакане» [Текст] / А.С. Швырков [и др.] // Материалы Международной научн.-практич. конф.: Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 98-102.

114. Швырков, А.С. Оценка доли жидкости, перелившейся через защитную стенку при разрушении резервуара типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / А.С. Швырков // Материалы I Международной научн.-практич. конф., посвященной 15-летию кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» УГНТУ: Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли. – Уфа: УГНТУ, 2018. – С. 28-32. – Компьютерные файлы: 27,9 Мб. База данных: UGNTUBIB. – ISBN 978-5-7831-1697-1:Б.ц.

115. Рубан, А.И. Методы обработки экспериментальных данных [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.И. Рубан, А.В. Кузнецов. – Красноярск, 2008. – 80 с. – Режим доступа: <http://ikit.edu.sfu-kras.ru/files/17/lab/lab.pdf> (дата обращения: 15.09.2018 г.).

116. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул [Текст]: учеб. пособие для втузов / Е.Н. Львовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.

117. Швырков, А.С. Результаты экспериментального определения геометрических параметров ограждений резервуаров типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / А.С. Швырков // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 3. – 11 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2019-3/07-03-19.ttb.pdf> (дата обращения: 15.10.2019).

Приложение А
(обязательное)

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДОЛИ ПЕРЕЛИВШЕЙСЯ ЧЕРЕЗ ЗАЩИТНУЮ СТЕНКУ ЖИДКОСТИ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ ВЫСОТЫ И РАССТОЯНИЯ ДО РЕЗЕРВУАРА**

Таблица А.1 – Результаты экспериментального определения доли жидкости Q , перелившейся через защитную стенку высотой $h_{ст}$, установленной на расстоянии l до стенки резервуара в масштабе 1:30 к натурному РВС-700 м³

$h_{ст}$, м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост}$, м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}$, м ³	Объем перелив. жидкости $V_{пер}$, м ³	Q , %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}$, м									
	1	2	3	4	5					
$l = 0,050$ м										
0,215	0,163	0,164	0,164	0,164	0,163	0,164	0,026006	0,002994	10,323	0,717
0,220	0,166	0,165	0,165	0,165	0,165	0,166	0,026311	0,002689	9,271	0,733
0,230	0,168	0,168	0,169	0,169	0,169	0,169	0,026801	0,002199	7,582	0,767
0,240	0,172	0,171	0,171	0,171	0,171	0,171	0,027214	0,001786	6,157	0,800
0,250	0,173	0,174	0,173	0,174	0,173	0,173	0,027564	0,001436	4,951	0,833
0,260	0,175	0,176	0,175	0,176	0,176	0,176	0,027914	0,001086	3,745	0,867
0,270	0,177	0,178	0,178	0,178	0,178	0,178	0,028264	0,000736	2,540	0,900
0,280	0,180	0,179	0,180	0,179	0,180	0,180	0,028550	0,000450	1,553	0,933
0,290	0,182	0,181	0,182	0,181	0,182	0,182	0,028868	0,000132	0,457	0,967
0,298	0,183	0,183	0,183	0,183	0,182	0,183	0,029000	0,000000	0,000	0,993
$l = 0,070$ м										
0,190	0,137	0,136	0,137	0,137	0,137	0,137	0,025784	0,003216	11,090	0,633
0,200	0,140	0,140	0,140	0,139	0,140	0,140	0,026349	0,002651	9,140	0,667
0,210	0,142	0,143	0,142	0,142	0,142	0,142	0,026802	0,002198	7,581	0,700
0,220	0,144	0,145	0,144	0,146	0,145	0,145	0,027292	0,001708	5,891	0,733
0,230	0,146	0,145	0,147	0,147	0,146	0,146	0,027556	0,001444	4,981	0,767
0,240	0,149	0,148	0,149	0,148	0,148	0,148	0,027970	0,001030	3,551	0,800
0,250	0,150	0,149	0,150	0,151	0,150	0,150	0,028272	0,000728	2,511	0,833
0,260	0,152	0,151	0,151	0,153	0,151	0,152	0,028573	0,000427	1,471	0,867
0,270	0,152	0,153	0,154	0,153	0,153	0,153	0,028837	0,000163	0,561	0,900
0,279	0,154	0,154	0,154	0,154	0,154	0,154	0,029000	0,000000	0,000	0,930
$l = 0,080$ м										
0,175	0,125	0,123	0,124	0,125	0,124	0,124	0,025359	0,003641	12,555	0,583
0,177	0,125	0,125	0,126	0,125	0,126	0,125	0,025604	0,003396	11,710	0,590
0,187	0,128	0,128	0,130	0,128	0,128	0,128	0,026217	0,002783	9,598	0,623
0,197	0,131	0,130	0,131	0,131	0,131	0,131	0,026707	0,002293	7,908	0,657
0,207	0,133	0,133	0,132	0,132	0,134	0,133	0,027115	0,001885	6,500	0,690
0,217	0,135	0,135	0,134	0,135	0,135	0,135	0,027523	0,001477	5,092	0,723
0,227	0,137	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,027809	0,001191	4,107	0,757
0,237	0,138	0,138	0,137	0,138	0,138	0,138	0,028136	0,000864	2,980	0,790
0,247	0,139	0,139	0,140	0,138	0,139	0,139	0,028381	0,000619	2,135	0,823
0,257	0,140	0,141	0,141	0,140	0,140	0,140	0,028667	0,000333	1,149	0,857
0,267	0,141	0,141	0,141	0,142	0,141	0,141	0,028830	0,000170	0,586	0,890
0,273	0,142	0,142	0,142	0,141	0,142	0,142	0,029000	0,000000	0,000	0,910
$l = 0,100$ м										
0,155	0,102	0,101	0,101	0,102	0,101	0,101	0,024079	0,004921	16,970	0,517
0,160	0,103	0,106	0,103	0,106	0,104	0,104	0,024791	0,004209	14,514	0,533
0,170	0,108	0,109	0,107	0,108	0,108	0,108	0,025646	0,003354	11,566	0,567
0,180	0,110	0,111	0,110	0,111	0,111	0,111	0,026263	0,002737	9,437	0,600
0,190	0,113	0,113	0,112	0,113	0,112	0,113	0,026738	0,002262	7,799	0,633
0,200	0,115	0,114	0,115	0,115	0,113	0,114	0,027166	0,001834	6,325	0,667

Продолжение таблицы А.1

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост},$ м ³	Объем перелив. жидкости $V_{пер},$ м ³	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост},$ м									
	1	2	3	4	5					
0,210	0,117	0,116	0,116	0,116	0,115	0,116	0,027546	0,001454	5,015	0,700
0,220	0,118	0,117	0,118	0,118	0,117	0,118	0,027926	0,001074	3,705	0,733
0,230	0,119	0,119	0,118	0,120	0,119	0,119	0,028258	0,000742	2,558	0,767
0,240	0,120	0,120	0,121	0,120	0,121	0,120	0,028590	0,000410	1,412	0,800
0,262	0,122	0,122	0,122	0,121	0,121	0,121	0,029000	0,000000	0,000	0,873

Таблица А.2 – Результаты экспериментального определения доли жидкости Q , перелившейся через защитную стенку высотой $h_{ст}$, установленной на расстоянии l до стенки резервуара в масштабе 1:43 к натурному РВС-2000 м³

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост},$ м ³	Объем перелив. жидкости $V_{пер},$ м ³	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост},$ м									
	1	2	3	4	5					
$l = 0,035$ м										
0,215	0,175	0,175	0,176	0,177	0,177	0,176	0,024371	0,002229	8,378	0,768
0,225	0,180	0,180	0,178	0,180	0,179	0,179	0,024842	0,001758	6,608	0,804
0,235	0,182	0,181	0,182	0,183	0,183	0,182	0,025230	0,001370	5,151	0,839
0,245	0,183	0,183	0,185	0,185	0,184	0,184	0,025479	0,001121	4,213	0,875
0,255	0,185	0,185	0,186	0,187	0,186	0,186	0,025728	0,000872	3,276	0,911
0,265	0,189	0,188	0,188	0,188	0,189	0,188	0,026089	0,000511	1,923	0,946
0,275	0,191	0,190	0,189	0,190	0,191	0,190	0,026338	0,000262	0,986	0,982
0,280	0,191	0,192	0,191	0,192	0,191	0,191	0,026504	0,000096	0,361	1,000
0,285	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,026600	0,000000	0,000	1,018
$l = 0,049$ м										
0,192	0,150	0,151	0,150	0,150	0,151	0,150	0,023696	0,002904	10,918	0,686
0,202	0,154	0,154	0,154	0,155	0,154	0,154	0,024295	0,002305	8,667	0,721
0,212	0,157	0,156	0,157	0,157	0,157	0,157	0,024704	0,001896	7,127	0,757
0,222	0,158	0,159	0,160	0,160	0,160	0,159	0,025114	0,001486	5,587	0,793
0,232	0,161	0,162	0,161	0,162	0,162	0,162	0,025461	0,001139	4,284	0,829
0,242	0,163	0,165	0,164	0,163	0,164	0,164	0,025807	0,000793	2,981	0,864
0,252	0,165	0,167	0,166	0,166	0,166	0,166	0,026154	0,000446	1,678	0,900
0,262	0,168	0,168	0,168	0,168	0,167	0,168	0,026437	0,000163	0,612	0,936
0,268	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,026600	0,000000	0,000	0,957
$l = 0,056$ м										
0,182	0,140	0,141	0,140	0,141	0,140	0,140	0,023525	0,003075	11,562	0,650
0,192	0,144	0,144	0,144	0,144	0,144	0,144	0,024128	0,002472	9,294	0,686
0,202	0,147	0,147	0,147	0,147	0,146	0,147	0,024597	0,002003	7,531	0,721
0,212	0,149	0,149	0,150	0,149	0,149	0,149	0,025012	0,001588	5,968	0,757
0,222	0,152	0,152	0,151	0,151	0,151	0,151	0,025368	0,001232	4,633	0,793
0,232	0,153	0,153	0,153	0,154	0,154	0,153	0,025703	0,000897	3,373	0,829
0,242	0,156	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155	0,026004	0,000596	2,239	0,864
0,252	0,157	0,156	0,159	0,156	0,158	0,157	0,026339	0,000261	0,980	0,900
0,259	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,026600	0,000000	0,000	0,925

Продолжение таблицы А.2

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}, м^3$	Объем перелив. жидкости $V_{пер}, м^3$	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}, м$									
$l = 0,070 м$										
0,164	0,126	0,126	0,127	0,126	0,126	0,126	0,023786	0,002814	10,579	0,586
0,174	0,129	0,129	0,130	0,129	0,129	0,129	0,024351	0,002249	8,453	0,621
0,184	0,131	0,131	0,131	0,130	0,131	0,131	0,024653	0,001947	7,320	0,657
0,194	0,133	0,132	0,133	0,133	0,132	0,133	0,024992	0,001608	6,044	0,693
0,204	0,134	0,134	0,135	0,134	0,134	0,134	0,025294	0,001306	4,910	0,729
0,214	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,025633	0,000967	3,635	0,764
0,224	0,137	0,137	0,137	0,138	0,137	0,138	0,025920	0,000680	2,558	0,800
0,234	0,138	0,139	0,139	0,138	0,138	0,139	0,026131	0,000469	1,764	0,836
0,244	0,140	0,140	0,139	0,140	0,140	0,140	0,026349	0,000251	0,943	0,871
0,256	0,141	0,141	0,142	0,141	0,142	0,141	0,02660	0,000000	0,000	0,914

Таблица А.3 – Результаты экспериментального определения доли жидкости Q , перелившейся через защитную стенку высотой $h_{ст}$, установленной на расстоянии l до стенки резервуара в масштабе 1:60 к натурному РВС-5000 м³

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}, м^3$	Объем перелив. жидкости $V_{пер}, м^3$	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}, м$									
$l = 0,025 м$										
0,209	0,175	0,176	0,177	0,176	0,176	0,176	0,022106	0,001994	8,276	0,836
0,217	0,179	0,180	0,178	0,179	0,178	0,179	0,022457	0,001643	6,816	0,868
0,225	0,180	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,022809	0,001291	5,357	0,900
0,233	0,183	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184	0,023085	0,001015	4,210	0,932
0,241	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186	0,023362	0,000738	3,064	0,964
0,249	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,023613	0,000487	2,022	0,996
0,257	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190	0,023864	0,000236	0,979	1,028
0,267	0,192	0,192	0,191	0,192	0,192	0,192	0,024100	0,000000	0,000	1,068
$l = 0,035 м$										
0,191	0,155	0,153	0,154	0,154	0,154	0,154	0,021325	0,002775	11,515	0,764
0,201	0,158	0,158	0,158	0,159	0,158	0,158	0,021907	0,002193	9,101	0,804
0,212	0,162	0,162	0,162	0,162	0,161	0,162	0,022405	0,001695	7,033	0,848
0,216	0,164	0,164	0,163	0,163	0,162	0,163	0,022599	0,001501	6,228	0,864
0,221	0,165	0,165	0,165	0,164	0,165	0,165	0,022821	0,001279	5,309	0,884
0,226	0,167	0,166	0,166	0,166	0,165	0,166	0,022987	0,001113	4,620	0,904
0,229	0,167	0,167	0,166	0,166	0,167	0,167	0,023070	0,001030	4,275	0,916
0,235	0,169	0,168	0,167	0,168	0,169	0,168	0,023291	0,000809	3,355	0,940
0,241	0,169	0,170	0,169	0,170	0,170	0,170	0,023485	0,000615	2,551	0,964
0,245	0,171	0,170	0,170	0,170	0,171	0,170	0,023596	0,000504	2,091	0,980
0,253	0,173	0,174	0,173	0,173	0,173	0,173	0,023984	0,000116	0,483	1,012
0,262	0,174	0,174	0,174	0,174	0,173	0,174	0,024100	0,000000	0,000	1,048

Продолжение таблицы А.3

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}, м^3$	Объем перелив. жидкости $V_{пер}, м^3$	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}, м$									
1	2	3	4	5						
$l = 0,040 м$										
0,183	0,146	0,145	0,145	0,146	0,145	0,145	0,021104	0,002996	12,430	0,732
0,190	0,148	0,149	0,149	0,149	0,148	0,149	0,021569	0,002531	10,503	0,760
0,199	0,151	0,151	0,151	0,153	0,154	0,152	0,022062	0,002038	8,455	0,796
0,207	0,155	0,154	0,154	0,155	0,155	0,155	0,022440	0,001660	6,889	0,828
0,215	0,158	0,157	0,156	0,157	0,157	0,157	0,022788	0,001312	5,444	0,860
0,223	0,160	0,160	0,158	0,158	0,157	0,159	0,023020	0,001080	4,480	0,892
0,231	0,162	0,162	0,161	0,161	0,161	0,161	0,023427	0,000673	2,794	0,924
0,241	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,023804	0,000296	1,228	0,964
0,258	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,024100	0,000000	0,000	1,032
$l = 0,050 м$										
0,169	0,134	0,136	0,134	0,136	0,136	0,135	0,021492	0,002608	10,823	0,700
0,179	0,135	0,136	0,139	0,138	0,137	0,137	0,021778	0,002322	9,635	0,716
0,185	0,139	0,140	0,137	0,139	0,139	0,139	0,022064	0,002036	8,448	0,740
0,189	0,140	0,140	0,140	0,139	0,140	0,140	0,022223	0,001877	7,789	0,756
0,193	0,142	0,141	0,142	0,141	0,140	0,141	0,022446	0,001654	6,865	0,772
0,200	0,143	0,142	0,144	0,142	0,144	0,143	0,022732	0,001368	5,678	0,800
0,205	0,144	0,144	0,144	0,145	0,144	0,144	0,022922	0,001178	4,886	0,820
0,210	0,145	0,146	0,145	0,145	0,145	0,145	0,023081	0,001019	4,227	0,840
0,215	0,146	0,147	0,145	0,146	0,147	0,146	0,023240	0,000860	3,567	0,860
0,220	0,147	0,147	0,148	0,148	0,147	0,147	0,023431	0,000669	2,776	0,880
0,225	0,148	0,149	0,149	0,148	0,148	0,148	0,023590	0,000510	2,116	0,900
0,230	0,150	0,150	0,150	0,151	0,150	0,150	0,023876	0,000224	0,929	0,940
0,242	0,151	0,152	0,151	0,151	0,152	0,151	0,024100	0,000000	0,000	0,968

Таблица А.4 – Результаты экспериментального определения доли жидкости Q , перелившейся через защитную стенку высотой $h_{ст}$, установленной на расстоянии l до стенки резервуара в масштабе 1:81 к натурному РВС-10000 м³

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}, м^3$	Объем перелив. жидкости $V_{пер}, м^3$	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}, м$									
1	2	3	4	5						
$l = 0,019 м$										
0,193	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,019869	0,001431	6,718	0,877
0,196	0,170	0,169	0,170	0,171	0,170	0,170	0,019987	0,001313	6,166	0,891
0,199	0,170	0,172	0,170	0,172	0,171	0,171	0,020104	0,001196	5,614	0,905
0,203	0,172	0,173	0,172	0,173	0,172	0,172	0,020269	0,001031	4,841	0,923
0,208	0,173	0,173	0,174	0,174	0,175	0,174	0,020433	0,000867	4,068	0,945
0,215	0,176	0,175	0,176	0,177	0,176	0,176	0,020692	0,000608	2,854	0,977
0,220	0,178	0,178	0,177	0,177	0,177	0,177	0,020857	0,000443	2,081	1,000
0,225	0,181	0,179	0,180	0,178	0,178	0,179	0,021068	0,000232	1,088	1,023
0,230	0,180	0,180	0,180	0,181	0,180	0,180	0,021186	0,000114	0,536	1,045
0,235	0,181	0,181	0,181	0,181	0,181	0,181	0,021300	0,000000	0,000	1,068

Продолжение таблицы А.4

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}, \text{м}^3$	Объем перелив. жидкости $V_{пер}, \text{м}^3$	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}, \text{м}$									
1	2	3	4	5						
$l = 0,037 \text{ м}$										
0,180	0,148	0,149	0,148	0,149	0,148	0,152	0,019283	0,002017	9,471	0,818
0,183	0,154	0,152	0,153	0,153	0,154	0,153	0,019435	0,001865	8,757	0,832
0,187	0,156	0,155	0,156	0,156	0,155	0,156	0,019739	0,001561	7,327	0,850
0,190	0,158	0,156	0,155	0,158	0,157	0,157	0,019892	0,001408	6,613	0,864
0,195	0,158	0,159	0,158	0,158	0,158	0,158	0,020069	0,001231	5,779	0,886
0,197	0,160	0,159	0,158	0,159	0,159	0,159	0,020171	0,001129	5,302	0,895
0,200	0,160	0,160	0,160	0,159	0,161	0,160	0,020297	0,001003	4,707	0,909
0,205	0,161	0,161	0,161	0,161	0,162	0,161	0,020450	0,000850	3,992	0,932
0,210	0,162	0,163	0,163	0,162	0,163	0,163	0,020627	0,000673	3,158	0,955
0,220	0,165	0,164	0,164	0,165	0,167	0,165	0,020932	0,000368	1,729	1,000
0,225	0,166	0,167	0,166	0,166	0,167	0,166	0,021109	0,000191	0,895	1,023
0,232	0,168	0,168	0,168	0,167	0,167	0,168	0,021300	0,000000	0,000	1,055
$l = 0,026 \text{ м}$										
0,174	0,146	0,147	0,146	0,147	0,145	0,146	0,019198	0,002102	9,867	0,791
0,179	0,148	0,148	0,149	0,148	0,148	0,148	0,019461	0,001839	8,634	0,814
0,184	0,150	0,151	0,150	0,149	0,150	0,150	0,019697	0,001603	7,524	0,836
0,189	0,152	0,152	0,152	0,151	0,151	0,152	0,019907	0,001393	6,538	0,859
0,194	0,153	0,153	0,152	0,154	0,154	0,153	0,020118	0,001182	5,551	0,882
0,199	0,154	0,155	0,155	0,155	0,154	0,155	0,020301	0,000999	4,688	0,905
0,207	0,157	0,156	0,157	0,157	0,156	0,157	0,020564	0,000736	3,455	0,941
0,212	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,020748	0,000552	2,592	0,964
0,219	0,159	0,161	0,160	0,160	0,159	0,160	0,020984	0,000316	1,482	0,995
0,224	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,021142	0,000158	0,743	1,018
0,229	0,162	0,162	0,162	0,162	0,162	0,162	0,021300	0,000000	0,000	1,041
$l = 0,030 \text{ м}$										
0,163	0,133	0,132	0,133	0,134	0,133	0,133	0,018770	0,002530	11,880	0,741
0,166	0,134	0,134	0,134	0,135	0,134	0,134	0,018939	0,002361	11,085	0,755
0,169	0,136	0,136	0,135	0,136	0,135	0,136	0,019136	0,002164	10,158	0,768
0,172	0,137	0,137	0,136	0,137	0,137	0,137	0,019306	0,001994	9,363	0,782
0,178	0,140	0,138	0,139	0,139	0,139	0,139	0,019616	0,001684	7,905	0,809
0,183	0,141	0,141	0,140	0,140	0,141	0,141	0,019842	0,001458	6,845	0,832
0,187	0,142	0,142	0,141	0,142	0,142	0,142	0,020011	0,001289	6,050	0,850
0,189	0,144	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,020209	0,001091	5,122	0,859
0,195	0,145	0,145	0,146	0,145	0,145	0,145	0,020491	0,000809	3,797	0,886
0,200	0,147	0,147	0,147	0,146	0,146	0,147	0,020689	0,000611	2,869	0,909
0,205	0,148	0,149	0,148	0,147	0,148	0,148	0,020886	0,000414	1,942	0,932
0,212	0,149	0,149	0,149	0,149	0,150	0,149	0,021056	0,000244	1,147	0,964
0,220	0,151	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,021197	0,000103	0,484	1,000
0,226	0,151	0,151	0,151	0,151	0,150	0,151	0,021300	0,000000	0,000	1,027

Таблица А.5 – Результаты экспериментального определения доли жидкости Q , перелившейся через защитную стенку высотой $h_{ст}$, установленной на расстоянии l до стенки резервуара в масштабе 1:114 к натурному РВС-20000 м³

$h_{ст}$, м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост}$, м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}$, м ³	Объем перелив. жидкости $V_{пер}$, м ³	Q , %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}$, м									
	1	2	3	4	5					
$l = 0,013$ м										
0,145	0,130	0,129	0,130	0,130	0,131	0,130	0,014427	0,000773	5,083	0,906
0,147	0,131	0,131	0,132	0,129	0,130	0,131	0,014494	0,000706	4,645	0,919
0,149	0,132	0,131	0,132	0,131	0,130	0,131	0,014561	0,000639	4,207	0,931
0,151	0,132	0,132	0,131	0,132	0,132	0,132	0,014627	0,000573	3,769	0,944
0,153	0,132	0,133	0,132	0,133	0,132	0,132	0,014694	0,000506	3,330	0,956
0,155	0,133	0,133	0,133	0,133	0,133	0,133	0,014760	0,000440	2,892	0,969
0,157	0,133	0,134	0,134	0,132	0,135	0,134	0,014827	0,000373	2,454	0,981
0,159	0,135	0,134	0,134	0,135	0,133	0,134	0,014894	0,000306	2,016	0,994
0,161	0,135	0,135	0,134	0,135	0,135	0,135	0,014960	0,000240	1,578	1,006
0,166	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,015093	0,000107	0,702	1,038
0,169	0,137	0,136	0,137	0,136	0,137	0,137	0,015200	0,000000	0,000	1,056
$l = 0,018$ м										
0,138	0,122	0,121	0,120	0,120	0,121	0,121	0,014202	0,000998	6,564	0,863
0,140	0,122	0,121	0,121	0,121	0,122	0,121	0,014273	0,000927	6,100	0,875
0,142	0,123	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,014367	0,000833	5,481	0,888
0,144	0,123	0,122	0,123	0,123	0,123	0,123	0,014437	0,000763	5,017	0,900
0,146	0,124	0,124	0,123	0,123	0,123	0,123	0,014508	0,000692	4,553	0,913
0,148	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,014579	0,000621	4,089	0,925
0,150	0,125	0,125	0,124	0,125	0,124	0,125	0,014649	0,000551	3,625	0,938
0,152	0,125	0,126	0,125	0,125	0,124	0,125	0,014696	0,000504	3,315	0,950
0,154	0,126	0,126	0,126	0,125	0,125	0,126	0,014767	0,000433	2,851	0,963
0,156	0,126	0,126	0,126	0,126	0,127	0,126	0,014837	0,000363	2,387	0,975
0,158	0,127	0,127	0,126	0,126	0,127	0,127	0,014884	0,000316	2,078	0,988
0,160	0,127	0,127	0,128	0,127	0,127	0,127	0,014955	0,000245	1,614	1,000
0,162	0,128	0,128	0,127	0,128	0,128	0,128	0,015025	0,000175	1,150	1,013
0,164	0,129	0,128	0,129	0,128	0,128	0,128	0,015096	0,000104	0,685	1,025
0,168	0,130	0,129	0,129	0,129	0,129	0,129	0,015200	0,000000	0,000	1,050
$l = 0,021$ м										
0,135	0,113	0,114	0,114	0,113	0,113	0,113	0,014101	0,001099	7,230	0,844
0,137	0,114	0,114	0,114	0,115	0,114	0,114	0,014200	0,001000	6,576	0,856
0,139	0,115	0,114	0,116	0,115	0,115	0,115	0,014300	0,000900	5,922	0,869
0,141	0,116	0,116	0,116	0,115	0,115	0,116	0,014375	0,000825	5,431	0,881
0,143	0,117	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,014449	0,000751	4,940	0,894
0,145	0,117	0,116	0,117	0,117	0,117	0,117	0,014524	0,000676	4,449	0,906
0,147	0,119	0,118	0,117	0,117	0,119	0,118	0,014673	0,000527	3,467	0,919
0,150	0,119	0,120	0,120	0,119	0,118	0,119	0,014822	0,000378	2,486	0,938
0,154	0,121	0,121	0,120	0,120	0,120	0,120	0,014971	0,000229	1,504	0,963
0,158	0,121	0,121	0,121	0,121	0,122	0,121	0,015071	0,000129	0,850	0,988
0,164	0,122	0,122	0,122	0,123	0,122	0,122	0,015195	0,000000	0,000	1,025

Продолжение таблицы А.5

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}, м^3$	Объем перелив. жидкости $V_{пер}, м^3$	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}, м$									
$l = 0,026 м$										
0,128	0,109	0,109	0,108	0,108	0,109	0,109	0,013846	0,001354	8,911	0,800
0,129	0,109	0,109	0,109	0,110	0,108	0,109	0,013897	0,001303	8,575	0,806
0,130	0,109	0,110	0,109	0,109	0,110	0,109	0,013948	0,001252	8,240	0,813
0,131	0,111	0,110	0,111	0,110	0,111	0,111	0,014101	0,001099	7,233	0,819
0,133	0,112	0,113	0,112	0,112	0,112	0,112	0,014304	0,000896	5,891	0,831
0,134	0,112	0,114	0,113	0,112	0,112	0,113	0,014355	0,000845	5,556	0,838
0,140	0,114	0,115	0,115	0,114	0,114	0,114	0,014585	0,000615	4,046	0,875
0,145	0,116	0,115	0,115	0,118	0,118	0,116	0,014840	0,000360	2,369	0,906
0,147	0,117	0,117	0,117	0,118	0,116	0,117	0,014916	0,000284	1,865	0,919
0,151	0,118	0,119	0,119	0,118	0,117	0,118	0,015069	0,000131	0,859	0,944
0,158	0,119	0,119	0,119	0,119	0,119	0,119	0,015200	0,000000	0,000	0,988

Таблица А.6 – Результаты экспериментального определения доли жидкости Q , перелившейся через защитную стенку высотой $h_{ст}$, установленной на расстоянии l до стенки резервуара в масштабе 1:130 к натурному РВС-30000 м³

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}, м^3$	Объем перелив. жидкости $V_{пер}, м^3$	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}, м$									
$l = 0,012 м$										
0,129	0,116	0,115	0,115	0,116	0,116	0,116	0,012625	0,000675	5,072	0,921
0,131	0,116	0,115	0,116	0,117	0,116	0,116	0,012669	0,000631	4,744	0,929
0,132	0,116	0,117	0,116	0,117	0,117	0,117	0,012735	0,000565	4,251	0,943
0,134	0,117	0,117	0,117	0,117	0,118	0,117	0,012800	0,000500	3,758	0,957
0,135	0,118	0,117	0,118	0,117	0,118	0,118	0,012844	0,000456	3,430	0,964
0,137	0,118	0,118	0,118	0,119	0,118	0,118	0,012909	0,000391	2,937	0,979
0,140	0,119	0,119	0,118	0,120	0,119	0,119	0,012997	0,000303	2,280	1,000
0,142	0,120	0,119	0,120	0,119	0,120	0,120	0,013062	0,000238	1,787	1,014
0,145	0,121	0,120	0,120	0,121	0,121	0,121	0,013171	0,000129	0,966	1,036
0,147	0,121	0,121	0,122	0,121	0,121	0,121	0,013237	0,000063	0,474	1,050
0,150	0,122	0,121	0,121	0,120	0,122	0,121	0,013300	0,000000	0,000	1,071
$l = 0,016 м$										
0,123	0,108	0,109	0,109	0,108	0,109	0,109	0,012440	0,000860	6,465	0,879
0,125	0,109	0,109	0,110	0,109	0,110	0,109	0,012532	0,000768	5,776	0,893
0,127	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,012601	0,000699	5,259	0,907
0,130	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,012715	0,000585	4,398	0,929
0,135	0,111	0,111	0,113	0,114	0,113	0,112	0,012875	0,000425	3,192	0,964
0,136	0,113	0,113	0,113	0,112	0,112	0,113	0,012898	0,000402	3,020	0,971
0,140	0,113	0,113	0,114	0,115	0,114	0,114	0,013036	0,000264	1,986	1,000
0,144	0,114	0,115	0,114	0,115	0,116	0,115	0,013150	0,000150	1,125	1,029
0,145	0,115	0,115	0,115	0,115	0,115	0,115	0,013173	0,000127	0,953	1,036
0,148	0,116	0,116	0,115	0,116	0,116	0,116	0,013265	0,000035	0,264	1,057
0,149	0,116	0,116	0,117	0,116	0,116	0,116	0,013300	0,000000	0,000	1,064

Продолжение таблицы А.6

$h_{ст},$ м	Уровень оставшейся в ограждении жидкости после эксперимента					Сред. число $h_{ост},$ м	Объем оставш. жидкости $V_{ост}, м^3$	Объем перелив. жидкости $V_{пер}, м^3$	$Q,$ %	$h_{ст}/h_0$
	$h_{ост}, м$									
1	2	3	4	5						
$l = 0,018 м$										
0,121	0,107	0,106	0,105	0,104	0,105	0,105	0,012392	0,000908	6,829	0,864
0,122	0,105	0,107	0,105	0,107	0,105	0,106	0,012439	0,000861	6,475	0,871
0,123	0,106	0,105	0,107	0,107	0,106	0,106	0,012486	0,000814	6,122	0,879
0,125	0,107	0,107	0,107	0,107	0,106	0,107	0,012556	0,000744	5,591	0,893
0,127	0,108	0,108	0,107	0,108	0,107	0,108	0,012650	0,000650	4,884	0,907
0,130	0,108	0,109	0,109	0,108	0,108	0,108	0,012744	0,000556	4,177	0,929
0,133	0,110	0,109	0,109	0,109	0,109	0,109	0,012838	0,000462	3,470	0,950
0,136	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,012933	0,000367	2,763	0,971
0,140	0,112	0,111	0,111	0,111	0,110	0,111	0,013050	0,000250	1,879	1,000
0,144	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0,013168	0,000132	0,995	1,029
0,146	0,112	0,113	0,112	0,113	0,113	0,113	0,013238	0,000062	0,464	1,043
0,148	0,112	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,013300	0,000000	0,000	1,057
$l = 0,023 м$										
0,116	0,098	0,099	0,100	0,100	0,100	0,099	0,012236	0,001064	7,999	0,829
0,117	0,099	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,012285	0,001015	7,628	0,836
0,118	0,100	0,099	0,100	0,101	0,100	0,100	0,012310	0,000990	7,443	0,843
0,120	0,101	0,100	0,101	0,100	0,102	0,101	0,012409	0,000891	6,703	0,857
0,122	0,102	0,100	0,101	0,101	0,101	0,101	0,012433	0,000867	6,518	0,871
0,123	0,102	0,102	0,102	0,102	0,101	0,102	0,012532	0,000768	5,777	0,879
0,125	0,102	0,103	0,102	0,102	0,103	0,102	0,012605	0,000695	5,222	0,893
0,129	0,103	0,104	0,104	0,104	0,103	0,104	0,012753	0,000547	4,111	0,921
0,134	0,105	0,105	0,105	0,105	0,104	0,105	0,012901	0,000399	3,000	0,957
0,138	0,106	0,107	0,106	0,106	0,106	0,106	0,013073	0,000227	1,705	0,986
0,140	0,106	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,013147	0,000153	1,149	1,000
0,144	0,108	0,107	0,108	0,107	0,108	0,108	0,013246	0,000054	0,409	1,029
0,147	0,108	0,108	0,108	0,108	0,109	0,108	0,013300	0,000000	0,000	1,050

Приложение Б
(обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ФГБУ ВНИИПО МЧС России,
генерал-майор внутренней службы,
доктор технических наук

Д.М. Гордиенко

2019 г.



А К Т

внедрения результатов диссертационной работы
Швыркова Александра Сергеевича на тему:
«Нормирование требований пожарной безопасности к геометрическим
параметрам ограждений резервуаров типа «стакан в стакане»»
в нормативный документ по пожарной безопасности

Комиссия в составе: заместителя начальника отдела пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий научно-исследовательского центра нормативно-технических проблем пожарной безопасности (НИЦ НТП ПБ) Ильичева Александра Валерьевича; главного научного сотрудника НИЦ НТП ПБ, д.т.н., профессора Болодыяна Ивана Ардашевича; главного научного сотрудника НИЦ НТП ПБ, д.т.н., профессора Шебеко Юрия Николаевича подтверждает, что результаты диссертационной работы Швыркова А.С. внедрены в нормативный документ по пожарной безопасности, а именно, использованы при подготовке проекта приложения В «Метод определения геометрических параметров ограждений резервуаров с защитной стенкой (резервуары типа «стакан в стакане») в национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53324-2009 «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности».

Заместитель начальник отдела

А.В. Ильичев

Главный научный сотрудник
д.т.н., профессор

И.А. Болодыян

Главный научный сотрудник
д.т.н., профессор

Ю.Н. Шебеко

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по учебной работе,
кандидат военных наук, доцент,
полковник внутренней службы



М.В. Бедило
2019 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы
Швыркова Александра Сергеевича на тему:
«Нормирование требований пожарной безопасности к геометрическим
параметрам ограждений резервуаров типа «стакан в стакане»
в учебный процесс Академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе: заместителя начальника кафедры пожарной безопасности технологических процессов (ПБТП), к.т.н., доцента, подполковника внутренней службы Воробьева Владимира Викторовича; профессора кафедры ПБТП, д.т.н., профессора Петрова Анатолия Павловича; профессора кафедры ПБТП, д.т.н., профессора Назарова Владимира Петровича; профессора кафедры ПБТП, к.т.н., доцента Клубаня Владимира Семеновича подтверждает, что результаты диссертационной работы Швыркова А.С. внедрены в учебный процесс по дисциплине «Пожарная безопасность технологических процессов», а именно, использованы при написании второй редакции одноименного учебника для бакалавров, а также применяются при чтении лекций и проведении практических занятий со слушателями бакалавриата, специалитета и магистратуры Академии ГПС МЧС России.

Заместитель начальника кафедры ПБТП,
к.т.н., доцент, подполковник внутренней службы

В.В. Воробьев

Профессор кафедры ПБТП, д.т.н., профессор

А.П. Петров

Профессор кафедры ПБТП, д.т.н., профессор

В.П. Назаров

Профессор кафедры ПБТП, к.т.н., доцент

В.С. Клубань