

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)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России на кафедре пожарной безопасности технологических процессов

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Горячев Станислав Анатольевич

Официальные оппоненты: Лурье Михаил Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа
(НИУ) имени И.М. Губкина»,
профессор кафедры проектирования
и эксплуатации нефтегазопроводов

Демехин Феликс Владимирович,
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
университет государственной
противопожарной службы МЧС России»,
профессор кафедры пожарной безопасности
технологических процессов и производств

Ведущая организация: ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета»
научно-исследовательский институт
противопожарной обороны МЧС России»

Защита состоится «17» марта 2020 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/c48/c48e2bed59edc15b49e7fa4fef4caad2.pdf>

Автореферат разослан «15» января 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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. Образующаяся в этом случае часто горящая волна нефтепродукта разрушала нормативные ограждения в виде земляных обвалованных 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 сопровождалось каскадным развитием и травмами людей. Важно отметить, что аналогичные аварии РВС неоднократно происходили и за рубежом, при этом общая тенденция аварий РВС сохраняется и сегодня.

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. 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.

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);
- 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);

- «Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» (далее Руководство);

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». 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.

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. Важно отметить, что результаты этих работ использованы при разработке выше указанных нормативов, 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.

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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, указана степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, представлены методология и методы исследования, а также степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе «Анализ статистики разрушений резервуаров и нормативных требований для проектирования резервуаров типа «стакан в стакане»» представлены результаты анализа статистических данных о разрушениях РВС с нефтью и нефтепродуктами на объектах нефтегазовой отрасли в России, описания характерных примеров разрушений РВС за рубежом, а также анализ требований нормативных документов в области обеспечения промышленной безопасности, предъявляемых к РВСЗС.

Анализ статистики отмечает, что наиболее опасные ситуации возникали при полных разрушениях РВС. Образующийся в этом случае поток часто горячей жидкости полностью или частично разрушал нормативные преграды в виде земляных обвалований или ограждающих стен и, разливаясь на значительной площади, неоднократно приводил к каскадному, а иногда и к катастрофическому развитию аварии. Аналогичные аварии РВС неоднократно происходили и за рубежом, при этом общая тенденция аварий РВС сохраняется и сегодня. В связи с этим сделан вывод о необходимости совершенствования систем ограничения пожара пролива горючей жидкости при разрушении резервуаров, в данном случае, за счет применения перспективных конструкций РВСЗС.

В результате анализа нормативных требований в области обеспечения промышленной безопасности РВСЗС выявлен между ними ряд несоответствий. Так, например, в ГОСТ, Руководстве и СТО 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. Кроме этого, ГОСТ и СТО не требуют устройства железобетонного каре для защиты от гидродинамического удара продукта при мгновенном разрушении РВСЗС, а требуют обычной защиты для гидростатического удержания растекающейся жидкости, при этом в Руководстве отсутствуют требования к обустройству дополнительных ограждений РВСЗС. Также установлено, что содержащиеся в СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности» требования не распространяются на РВСЗС, при этом иные нормативные документы, регламентирующие требования пожарной безопасности к таким типам резервуаров, в настоящее время отсутствуют.

В связи с вышеуказанным сделан вывод об актуальности проведения исследований, направленных на обеспечение пожарной безопасности РВСЗС, и, в первую очередь, на нормирование требований к геометрическим параметрам защитной стенки и дополнительного ограждения.

Во второй главе «Разработка лабораторного стенда для определения геометрических параметров ограждений резервуаров» представлено описание лабораторного стенда, разработанного с учетом результатов анализа теоретических и экспериментальных исследований влияния потока жидкости при разрушении резервуара на ограждения различной конфигурации и соблюдения критериев подобия и условий моделирования гидравлических явлений.

В результате анализа работ по изучению влияния потока жидкости, образующегося при разрушении РВС, на геометрические параметры ограждений различной конфигурации, выполненных 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 и зарубежными авторами, установлено, что:

- исследования проводились при условии, что расстояние от ограждения до стенки РВС составляло 6 м и более. Для изучаемых в настоящей работе РВСЗС это расстояние составляет от 1,5 до 3,0 м, то есть охватывает не исследованную область. Кроме этого, отсутствует обоснование необходимости обустройства для РВСЗС дополнительного ограждения;

- при анализе зависимостей, представленных в работах, посвященных оценке доли жидкости, которая может перелиться через обвалование при разрушении РВС, выявлено, что не учитывался такой важный параметр как расстояние от стенки РВС до обвалования, безусловно, оказывающий непосредственное влияние на искомую величину. При этом использование анализируемых зависимостей не позволяет определить минимальную высоту ограждения, при которой возможна полная локализация потока жидкости;

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

- при создании лабораторного стенда необходимо использовать результаты натурного опыта по разрушению РВС-700 м³ с водой, в частности, при соблюдении критериев подобия для потоков в натуре и на модели, что, в конечном счете, обуславливает достоверность полученных результатов.

Таким образом, на основании результатов анализируемых работ, с учетом выше изложенных критических замечаний, а также исходя из невозможности проведения исследований на натуральных объектах, прежде всего из-за значительных экономических затрат, для достижения поставленной в настоящей работе цели принят лабораторно-экспериментальный метод исследования характеристик образующегося при разрушении основной стенки РВСЗС потока жидкости и его влияния на защитную стенку и дополнительное ограждение.

В результате анализа работ в области гидравлического моделирования установлено, что при разработке лабораторного стенда с модельными резервуарами и проведении соответствующих экспериментов должно выполняться равенство основных критериев подобия потоков и соблюдаться условия гидродинамического моделирования, а именно:

- 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:

$$Fr = \frac{u_M^2}{g_M h_M} = \frac{u_H^2}{g_H h_H}, \quad (1)$$

где u_M, u_H – характерная скорость волны прорыва (местная скорость или скорость фронта волны), м/с;

h_M, h_H – характерная высота (ширина) волны прорыва, м;

- вследствие того, что процесс движения волны прорыва представляет собой быстроизменяющееся неустановившееся движение жидкости, то необходимо соблюдение тождественности критерия Струхала:

$$Sh = \frac{u_M t_M}{h_M} = \frac{u_H t_H}{h_H}, \quad (2)$$

где t_H, t_M – характерное время процесса, с;

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

$$Re_M = \frac{u_M h_M}{\nu_M}, \quad (3)$$

где ν_M – кинематическая вязкость жидкости (в данном случае для воды при $20\text{ }^\circ\text{C}$ – $1,01 \cdot 10^{-6}$ м²/с);

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

$$\lambda_{мин} = (30 \div 50) \sqrt[3]{u_H^2 h_H^2}; \quad (4)$$

- 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, иначе необходимо увеличивать масштаб модели.

Однако, 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, который, в дальнейшем, и был выбран за основу создания модельного резервуара. Так, имея в наличии видеоролик 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 (рисунок 1), а также вычислить по формулам (1) и (2) критерии подобия (таблица 1).



Рисунок 1 – Характерные кадры видеосъемки полного разрушения РВС-700 м³ с водой в соответствующие моменты времени

Таблица 1 – Параметры потока при разрушении РВС-700 м³ с водой и соответствующие критерии подобия

| l_n , м | t_n , с | u_n , 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 |

С целью обоснования 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, выполнено численное моделирование процесса разрушения типового РВС-30000 м³ с водой в программном комплексе для инженерных расчетов *LSDYNA* (рисунок 2). 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.

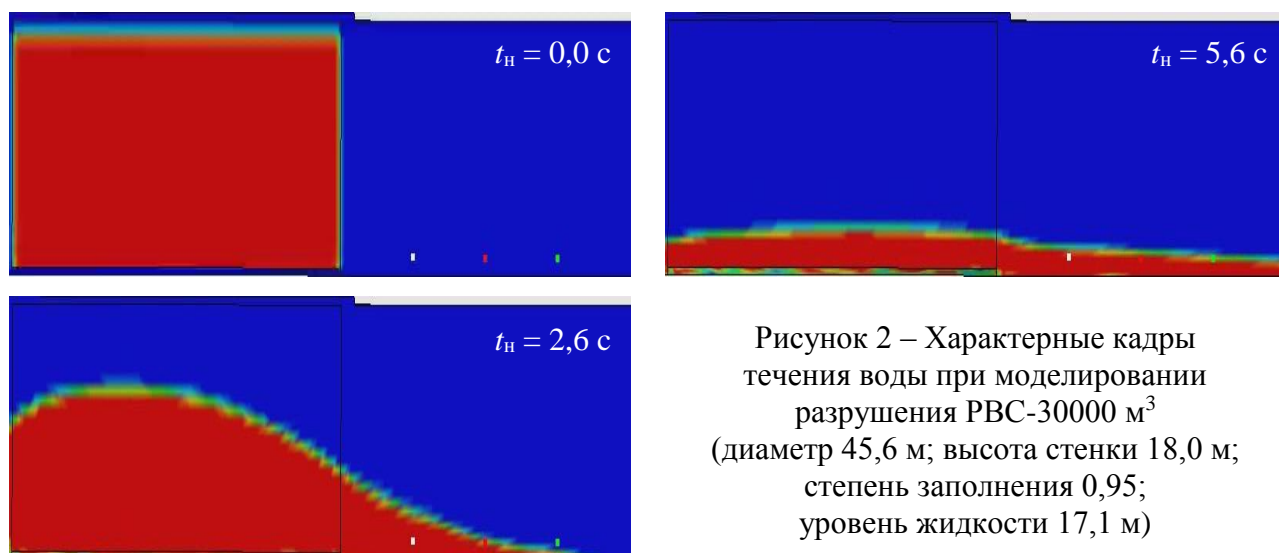


Рисунок 2 – Характерные кадры течения воды при моделировании разрушения РВС-30000 м³ (диаметр 45,6 м; высота стенки 18,0 м; степень заполнения 0,95; уровень жидкости 17,1 м)

В таблице 2 приведены результаты измерений параметров потока при разрушении резервуара, а также вычислений по формулам (1) и (2) соответствующих критериев подобия.

Таблица 2 – Параметры потока при разрушении РВС-30000 м³ с водой и соответствующие критерии подобия

| l_H , м | t_H , с | h_H , м | u_H , м/с | Fr_H | Sh_H |
|-----------|-----------|-----------|-------------|--------|--------|
| 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 |

Для проведения экспериментов по удержанию волны прорыва защитной стенкой, установленной на различных расстояниях от стенки основного резервуара, с учетом обоснованных критериев подобия и соблюдения условий моделирования гидравлических явлений, разработан лабораторный стенд, принципиальная схема которого показана на рисунке 3.

Основой лабораторного стенда является каркас 1, конструктивно выполненный из стального профиля прямоугольной формы, с общими габаритными размерами В×Ш×Г: 0,9×1,6×1,1 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 1б после проведения эксперимента. Для предотвращения перелива воды за борта поддона с их внутренней стороны по всему периметру установлены экраны из прозрачного органического стекла 3, высотой 0,025 м.

Непосредственно в поддоне 2 на жестко прикрепленных 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. Для 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.

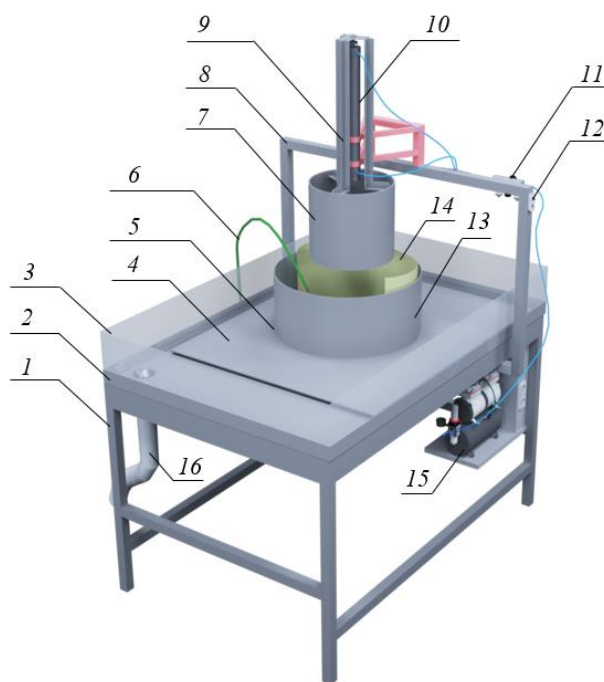


Рисунок 3 – Принципиальная схема лабораторного стенда

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. 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 проведением эксперимента. 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 различный диаметр (от 0,45 до 0,55 м), что позволяет их устанавливать на необходимом расстоянии от резервуара. В качестве натурального выбран резервуар типа РВС-700 м³ (диаметр 10,4 м; высота стенки 9,0 м; степень заполнения 0,95; уровень жидкости 8,55 м). Масштаб моделирования 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.

Для подтверждения возможности проведения экспериментов на 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.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. В ресивере компрессором создавалось давление в 4 кг/см^2 . С помощью кнопок управления резервуар под этим давлением поршнем опускался на уплотнительное резиновое кольцо, обеспечивая герметичность конструкции. Внутри резервуара устанавливалась вкладка из монолитного поликарбоната. Резервуар заполнялся водой до уровня $0,285 \text{ м}$, при этом вкладка плотно прижималась к стенкам резервуара, повторяя его оболочку. В ресивере компрессором создавалось давление в 6 кг/см^2 . С помощью кнопок управления 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. Выравнивание основания лабораторного стенда относительно горизонта выполнялась с помощью встроенных в него двух пузырьковых уровня с точностью $0,057^\circ = 1 \text{ мм}$ на 1 м каждый. Уровень воды в резервуаре измерялся линейкой с точностью $0,001 \text{ м}$. 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 (рисунок 4).



Рисунок 4 – 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 3), необходимые для сравнительного анализа с аналогичными данными, полученными при проведении натурального опыта (см. таблицу 1).

Таблица 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 |

С целью подтверждения возможности использования стенда для изучения влияния волны на защитную стенку резервуаров объемом до 30000 м³ была также выполнена серия опытов по свободному истечению потока (без защитной стенки) при разрушении резервуара, выполненного в масштабе 1:130 (предельный для данной конструкции стенда масштаб) к натурному РВС-30000 м³. При этом условие 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 по оценке высоты потока заключалась в следующем. На основании 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 . Далее последовательность проведения экспериментов аналогична, описанной выше (рисунок 5).

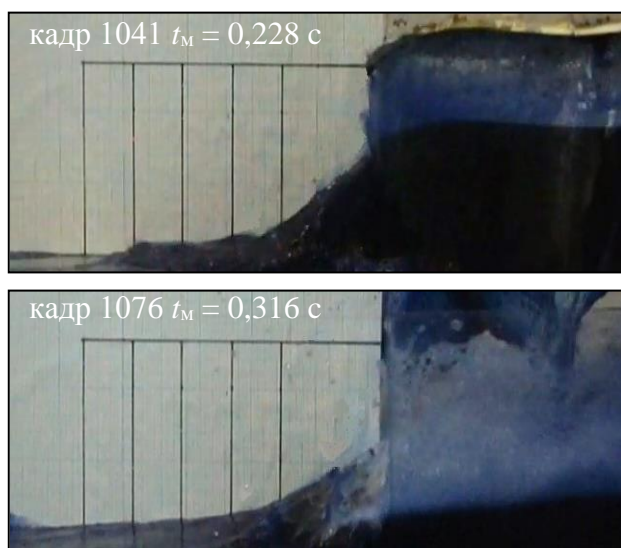


Рисунок 5 – Характерные кадры течения жидкости при разрушении резервуара в масштабе 1:130 к натурному РВС-30000 м³ в соответствующие моменты времени

Для измерения местной скорости на соответствующих участках трассы растекания потока использовалась специально изготовленная и тарированная динамическая трубка Пито, представляющая собой Г-образную трубку, выполненную из органического стекла с 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.

В результате выполненных экспериментов получены следующие данные (таблица 4), необходимые для сравнительного анализа с аналогичными данными, полученными при проведении численного моделирования (см. таблицу 2).

Таблица 4 – 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 |

В таблицах 5 и 6 представлены сравнительные характеристики критериев подобия, полученных соответственно при обработке данных натурального опыта (разрушение РВС-700 м³) и лабораторного эксперимента (разрушение резервуара в масштабе 1:30), а также численного моделирования (разрушение РВС-30000 м³) и лабораторного эксперимента (разрушение резервуара в масштабе 1:130).

Таблица 5 – Сравнительная характеристика критериев подобия

| Натурный опыт (см. таблицу 1) | | | Лабораторный эксперимент (см. таблицу 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 |

Таблица 6 – Сравнительная характеристика критериев подобия

| Численное моделирование (см. таблицу 2) | | | Лабораторный эксперимент (см. таблицу 4) | | |
|---|--------|--------|--|--------|--------|
| $l_H, \text{ м}$ | 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 в таблицах 5 и 6 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 потоку, образующемуся при разрушении натурального резервуара.

Числа Рейнольдса в рассматриваемом диапазоне изменения параметров модельного потока больше критического значения ($Re_m \geq Re_{кр} = 10000$), значит модельный поток, также как и натуральный, находится в турбулентном состоянии.

При разработке лабораторного стенда масштабы модельных резервуаров приняты 1:30 и 1:130 по отношению к соответствующим натурным резервуарам типа РВС-700 м³ и РВС-30000 м³. Наименьший допустимый масштаб модели, исходя из зависимости (4), соответственно составляет:

$$\lambda_{\text{мин}} = (30 \div 50) \sqrt[3]{u_H^2 h_H^2} = 30 \sqrt[3]{8^2 \cdot 1^2} = 120;$$
$$\lambda_{\text{мин}} = (30 \div 50) \sqrt[3]{u_H^2 h_H^2} = 30 \sqrt[3]{11,4^2 \cdot 1,2^2} = 172,$$

то есть условие масштаба моделирования в обоих случаях соблюдается.

Скорость потока воды при проведении экспериментов на лабораторном стенде (см. таблицы 3 и 4) в первом случае более чем в 6 раз, во втором – более чем в 4,5 раза, превышала критическое значение (0,23 м/с), 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 и дополнительного ограждения для резервуаров номинальным объемом от 700 до 30000 м³.

В третьей главе «Экспериментальное определение оптимальных геометрических параметров ограждений резервуаров типа «стакан в стакане» приведены масштабные коэффициенты для модельных резервуаров, а также представлены результаты экспериментального определения минимальной высоты защитной стенки для локализации потока жидкости при разрушении резервуара, доли перелившейся через защитную стенку жидкости при снижении ее высоты и геометрических параметров дополнительного ограждения.

Основной целью экспериментов являлось нахождение минимальной высоты защитной стенки, обустраиваемой на соответствующем расстоянии от основной стенки РВСЗС, для полного предотвращения перелива через нее жидкости при разрушении основной стенки. При этом 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).

Исходя из конструктивных особенностей основного модельного резервуара на лабораторном стенде, связанных с отсутствием возможности изменять его диаметр (0,35 м), условия геометрического подобия обеспечивали соответствующим уровнем жидкости в этом резервуаре, при этом были найдены соответствующие масштабные коэффициенты (таблица 7).

Таблица 7 – 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, исходя из экономической эффективности применения рассматриваемых защитных стенок, а также анализа требований нормативных документов к РВСЗС, сделан вывод о целесообразности обустройства таких преград 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 8).

Таблица 8 – 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 |

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. На основании стенда по периметру резервуара на соответствующем расстоянии обустраивалась защитная стенка в виде стальной обечайки. Первоначальная ее высота превышала на 1 м (в соответствующем масштабе) уровень жидкости в границах ограждения, образующийся при повреждении резервуара. Герметичность стенки обеспечивалась силиконовым герметиком. Внутри резервуара устанавливалась вкладка из монолитного поликарбоната высотой, соответствующей уровню жидкости в этом резервуаре. Далее этапы проведения экспериментов аналогичны, описанным ранее. В случаях наблюдения перелива жидкости (рисунок б) высоту 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 6 – 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 натурного объекта)

Перед проведением каждого эксперимента инструментальной линейкой производился замер уровня жидкости в 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 стенку жидкости. Массив полученных данных с оценкой доли жидкости (Q , %), перелившейся через защитную стенку в зависимости от ее высоты ($h_{ст}$, м) и расстояния (l , м) до соответствующего резервуара при первоначальном уровне жидкости в резервуаре (h_0 , м), соответствующем высоте стенки этого резервуара, представлен в приложении А работы. На основе анализа выборки из этого массива получены зависимости безразмерного параметра ($h_{ст}/h_0$), определяющего минимальную высоту защитной стенки для локализации потока жидкости при полном разрушении соответствующего резервуара, от расстояния (l , м), на котором может быть установлена защитная стенка (рисунок 7). 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 ($0,8h_0$).

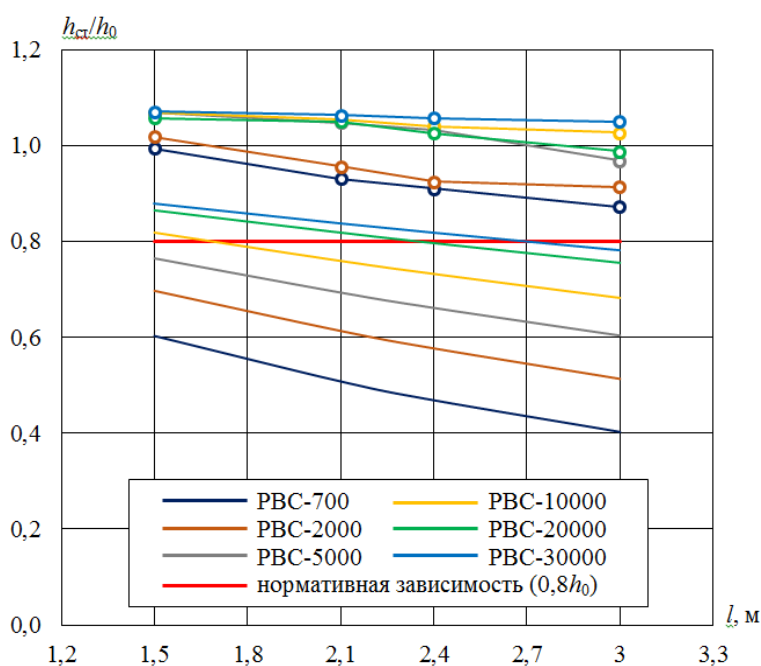


Рисунок 7 – Зависимости для определения минимальной высоты защитной стенки от расстояния до стенки резервуара:
 —○— гидродинамика;
 — гидростатика

Из рисунка 7 видно, что для всех рассматриваемых типов резервуаров с целью удержания продукта в границах защитной стенки ее высота в изучаемом диапазоне расстояний l должна быть не только больше высоты стенки, рассчитанной на статическое удержание пролитого продукта, но и нормативно рекомендуемой. При этом для полного удержания продукта в границах защитной стенки, при условии ее расчета на гидродинамические нагрузки, должно выполняться соотношение $h_{ст}/h_0 \geq 1,1$. 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 вышедшей при аварии основного резервуара жидкости.

В результате обработки экспериментальных данных методом многофакторного регрессионного анализа с использованием программы *STATGRAPHICS* получены эмпирическая зависимость, величина достоверности аппроксимации (R^2), критическое значение F -критерия Фишера ($F_{кр}$), значение F -критерия Фишера в модели (F_M), доверительный интервал (Δ) при уровне значимости $\alpha = 5\%$. Так, долю жидкости ($Q, \%$), перелившейся через защитную стенку в зависимости от расстояния $L = l + R$ (здесь: l – расстояние от стенки резервуара до защитной стенки; R – радиус резервуара), высоты ограждения $h_{ст}$ и уровня жидкости в резервуаре h_0 , соответствующего высоте стенки резервуара, в диапазоне изменения параметров: $1,5 \text{ м} \leq l \leq 3,0 \text{ м}$; $5,2 \text{ м} \leq R \leq 22,8 \text{ м}$; $9,0 \text{ м} \leq h_0 \leq 18,0 \text{ м}$; $0,4h_0 \text{ м} \leq h_{ст} \leq 1,1h_0 \text{ м}$, предлагается определять по следующей зависимости:

$$Q = 89,8017 - 17,1986 \frac{L}{R} - 68,899 \sqrt{\frac{h_{ст}}{h_0}}; \quad (5)$$

$$R^2 = 92,91 \%; F_{кр} = 3,035; F_M = 1708,9; \Delta = 1,732.$$

С целью ограничения площади возможного пожара пролива при частичном переливе жидкости через защитную стенку, для РВСЗС предлагается обустроить дополнительное ограждение, в качестве которого могут рассматриваться земляное обвалование или вертикальная стена из негорючих материалов, рассчитанных на гидростатическое удержание продукта. Для определения геометрических параметров дополнительных ограждений ($l_{доп}$ – минимального допустимого расстояния от ограждения до защитной стенки РВСЗС и $h_{доп}$ – минимальной допустимой высоты ограждения) на разработанном лабораторном стенде проведены эксперименты, методика выполнения которых аналогична ранее описанной. Эксперименты проводились с модельными резервуарами, соответствующими в выбранном масштабе моделирования натурным резервуарам с номинальными объемами от 700 до 30000 м³ (см. таблицу 7). На рисунке 8, 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 8 – Характерные кадры взаимодействия потока жидкости, образующегося при разрушении внутреннего резервуара, с защитной стенкой РВСЗС высотой $0,9h_0$

Аналогичные результаты перелива жидкости через защитную стенку и ее взаимодействие с дополнительным ограждением наблюдались и при разрушении остальных рассматриваемых модельных резервуаров, при этом относительная погрешность измерений искомых величин не превышала 6 %.

В таблице 9 приведены значения минимальной допустимой высоты дополнительного ограждения (вертикальной стены), на 0,2 м превышающей найденные экспериментально максимальные значения.

Таблица 9 – 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 |

Полученные данные рекомендуются для практического использования с целью предупреждения каскадного развития аварии в резервуарных парках объектов НГО с эксплуатацией РВСЗС.

В четвертой главе «Рекомендации по определению геометрических параметров ограждений резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане»» представлены рекомендации, содержащие общие положения, а также метод определения геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения РВСЗС, включая графические зависимости для прогноза оценки доли жидкости, которая может перелиться через защитную стенку при разрушении основной стенки типового резервуара.

Заключение содержит констатацию основных научных и практических результатов работы.

В приложениях представлены результаты экспериментального определения доли перелившейся через защитную стенку жидкости в зависимости от ее высоты и расстояния до резервуара, а также акты внедрения.

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».

Основные научные результаты работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. 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>.

2. 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>.

3. 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>.

Остальные публикации по теме диссертации:

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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).

12. 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.

Подписано в печать 24.12.2019. Формат 60x84/1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 289.

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4