

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

Академия Государственной противопожарной службы

На правах рукописи



Буй Куанг Тиен

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ КАСКАДНОГО РАЗВИТИЯ ПОЖАРА
НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ВЬЕТНАМА НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ С ЗАЩИТНОЙ СТЕНКОЙ
И ВОЛНООТРАЖАЮЩИМ КОЗЫРЬКОМ**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Швырков Сергей Александрович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ РАЗРУШЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ И СПОСОБОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КАСКАДНОГО РАЗВИТИЯ ПОЖАРА В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ВЬЕТНАМА.....	11
1.1 Современное состояние тепловых электростанций Вьетнама и особенности их размещения на местности.....	11
1.2 Анализ статистических данных разрушений резервуаров на объектах топливно-энергетического комплекса России.....	23
1.3 Характерные примеры разрушений резервуаров на объектах топливно-энергетических комплексов зарубежных стран.....	39
1.4 Прогнозирование каскадного развития аварии на территории тепловой электростанции во Вьетнаме при разрушении типового резервуара.....	44
1.5 Классификация и анализ способов минимизации негативных последствий разрушений резервуаров с горючей жидкостью.....	50
1.6 Цель и задачи исследования.....	63
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ВЫСОТЫ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ С ВОЛНООТРАЖАЮЩИМ КОЗЫРЬКОМ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОСНОВНОГО РЕЗЕРВУАРА.....	65
2.1 Обзор результатов исследований геометрических параметров ограждений различной конфигурации.....	65
2.2 Модернизация лабораторного стенда, методика и проведение экспериментов по определению необходимой высоты защитной стенки с волноотражающим козырьком.....	95
2.3 Анализ результатов экспериментальной оценки влияния наклона волноотражающего козырька на высоту защитной стенки.....	104

2.4 Эмпирические зависимости для определения геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком.....	112
ГЛАВА 3 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ С ВОЛНООТРАЖАЮЩИМ КОЗЫРЬКОМ РЕЗЕРВУАРА ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ».....	123
3.1 Общие положения.....	123
3.2 Метод определения геометрических параметров защитной стенки с горизонтальным или наклонным волноотражающим козырьком резервуара типа «стакан в стакане».....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	137
Приложение А (обязательное) Акты внедрения.....	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. К одной из приоритетных отраслей экономики в Социалистической Республике Вьетнам (далее – СРВ или Вьетнам) относится электроэнергетика. Основными производителями электрической энергии являются гидроэлектростанции (далее – ГЭС) и тепловые электростанции (далее – ТЭС) с паротурбинными блоками, работающими на угле, мазуте, дизельном топливе и с комбинированными газопаротурбинными установками. При этом в ближайшие десятилетия на ТЭС будет приходиться до 50 % всей вырабатываемой в стране электрической энергии [1]–[11].

К особенностям размещения ТЭС следует отнести их нахождение в черте населенных пунктов (в 94 % случаев), а также вблизи водных объектов (в 87 % случаев), что обосновано необходимостью обустройства водоемов-охладителей, приспособленных для отвода значительного количества тепла, образующегося в ходе технологических процессов, а также доставки топлива водным транспортом.

Прием, хранение, подогрев, выдача и обезвоживание топлива на ТЭС осуществляется в вертикальных стальных резервуарах (далее – РВС) номинальным объемом от 700 до 30000 м³, которые располагаются в группах, имеющих по периметру замкнутое грунтовое обвалование или железобетонное ограждение, рассчитанных на гидростатическое давление пролитой жидкости. При этом примерно на 10 % территорий ТЭС группы РВС не имеют сплошного ограждения, а по периметру отбортованы лишь бордюрным камнем.

Результаты анализа данных о разрушениях РВС на объектах топливно-энергетических комплексов (далее – ТЭК) различных стран убедительно доказывают, что указанные ограждения не способны удержать образующийся в этом случае мощный гидродинамический поток (волну прорыва) часто горячей жидкости. В результате такие инциденты неоднократно приводили к каскадному развитию аварий, пожаров, возникновению чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС), в том числе экологическим катастрофам, нередко – к гибели людей [12]–[46].

К наиболее перспективному способу предотвращения каскадного развития аварии или пожара в резервуарных парках ТЭС Вьетнама следует отнести применение РВС с защитной стенкой (далее – резервуар типа «стакан в стакане» или РВСЗС), что обусловлено, в соответствии с требованиями нормативных документов в области обеспечения промышленной безопасности [47]–[50], возможностью их эксплуатации вблизи жилых зон или по берегам водоемов, а также при недостаточности места для устройства обвалования или каре вокруг резервуаров. Конструктивно РВСЗС состоит из основного (внутреннего) РВС для хранения жидкости и обустроенной на расстоянии от 1,5 до 3 м от его стенки непосредственно на том же основании или самостоятельно кольцевой стальной защитной стенки.

Однако, требования нормативных документов в области обеспечения пожарной безопасности как в СРВ [51], так и в России [52], на проектирование и строительство таких типов резервуаров не распространяются. При этом анализ ранее выполненных исследований по оценке доли жидкости, которая может перелиться через защитную стенку в зависимости от ее высоты и межстенного расстояния показал, что для полного удержания волны прорыва в границах защитной стенки ее высота должна не менее чем на 10 % превышать максимальный уровень жидкости в основном резервуаре до аварии [53], [54]. Очевидно, что строительство таких высоких защитных стенок экономически нецелесообразно, при этом возможно образование зон взрывоопасных концентраций как в межстенном пространстве РВСЗС, так и снаружи защитной стенки.

В связи с вышесказанным актуальным представляется нахождение эффективного способа снижения высоты защитной стенки при максимальном уровне заполнения основного РВС горючей жидкостью [55]–[57]. В частности, предлагается рассмотреть возможность обустройства на защитной стенке горизонтального (далее – ГВК) или наклонного (далее – НВК) волноотражающего козырька, обращенного в сторону РВС. Эффективность такой конструкции ограждения будет зависеть от геометрических параметров РВС, межстенного расстояния и длины вылета ГВК или НВК. На установление зависимостей между указанными параметрами и были направлены исследования настоящей работы.

Степень разработанности темы исследования. Проблеме разрушений РВС и способам их предупреждения посвящены исследования Б.И. Беляева, И.М. Розенштейна, Г.П. Кандакова, В.А. Прохорова, В.Б. Галеева, В. Маршалла, О. Нобукадзу, К. Кавано, Я. Аугустина и др. [12]–[21]. Однако аварии РВС продолжают иметь место, в связи с чем вопросы локализации пожара пролива защитными ограждениями не менее актуальны, чем вопросы надежности резервуаров.

Разработке нормативных требований в области промышленной безопасности, а также проектной документации на строительство РВСЗС, посвящены работы Э.Я. Еленицкого, О.В. Дидковского, Е.В. Худякова, В.Ф. Муцанова, А.Н. Яшника, Л.М. Спириденка, А.И. Бондарчука и др. [58]–[67], но в них недостаточно уделено внимания обоснованию высоты защитной стенки РВСЗС.

Работы Ф.В. Демехина, А.А. Таранцева, С.С. Воеводы, А.Ф. Шароварникова, Д.Н. Рубцова и др. [68]–[72] посвящены проблемным вопросам тушения пожаров в РВСЗС и обоснованию необходимости орошения его защитной стенки.

Непосредственно исследованиям параметров волны прорыва и нормированию требований пожарной безопасности к ограждениям резервуаров посвящены работы М.В. Лурье, С.А. Швыркова, В.В. Воробьева, С.В. Пузача, А.С. Швыркова и др. [37], [53], [54], [73]–[81]. Однако в них не рассматривался вопрос возможности снижения высоты защитной стенки РВСЗС, в частности, за счет обустройства на ней волноотражающего козырька.

Целью диссертационной работы являлась разработка рекомендаций по определению геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком резервуара типа «стакан в стакане» для предупреждения каскадного развития пожара в резервуарных парках ТЭС Вьетнама.

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

- рассмотрение современного состояния ТЭС в СРВ и выявление особенностей их размещения на местности;
- проведение анализа пожарной опасности разрушений РВС с жидкостью, включая прогнозирование каскадного развития аварии на территории ТЭС в СРВ, и обоснование способа минимизации негативных последствий аварий РВС;

- модернизация лабораторного стенда, разработка методики и проведение экспериментов по определению требуемой высоты защитной стенки с обустроенным на ней волноотражающим козырьком горизонтального или наклонного вида;
- получение эмпирических формул для определения высоты защитной стенки в зависимости от геометрических параметров основного РВС, межстенного расстояния и длины вылета волноотражающего козырька соответствующего вида;
- разработка рекомендаций по определению геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком для полной локализации потока жидкости в случае разрушения основного РВС.

Объектом исследования являлся процесс разрушения основного РВС с образованием волны прорыва и ее воздействием на защитную стенку, оборудованную волноотражающим козырьком.

Предметом исследования являлись геометрические параметры волноотражающего козырька (угол наклона и длина вылета), необходимые для снижения высоты защитной стенки при условии полной локализации волны прорыва в границах рассматриваемого ограждения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика проведения лабораторных экспериментов по определению необходимой высоты защитной стенки РВСЗС с обустроенным на ней волноотражающим козырьком горизонтального (под углом 90° к защитной стенке) или наклонного (под углом 135° к защитной стенке) вида.
2. Установлено, что обустройство на защитной стенке горизонтального или наклонного волноотражающего козырька является эффективным способом, направленным на снижение высоты защитной стенки до или ниже максимального уровня горючей жидкости в основном резервуаре в зависимости от межстенного расстояния и длины вылета волноотражающего козырька.
3. Показано, что наиболее эффективно на снижение высоты защитной стенки оказывает влияние обустройство на ней наклонного волноотражающего козырька – до 5 % по сравнению с горизонтальным волноотражающим козырьком в исследуемом диапазоне межстенного расстояния (от 1,5 до 3 м).

4. Получены эмпирические формулы для определения необходимой высоты защитной стенки РВСЗС в зависимости от геометрических параметров основного РВС номинальным объемом от 700 до 30000 м³, межстенного расстояния и длины вылета волноотражающего козырька соответствующего вида (от 0,5 до 1,5 м).

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

– в развитии методов определения геометрических параметров ограждений резервуаров на примере защитных стен с волноотражающим козырьком, используемых при разработке систем ограничения распространения пожара пролива топлива при возможных разрушениях резервуаров, в данном случае, РВСЗС на территориях ТЭС Вьетнама;

– в использовании полученных эмпирических формул для определения требуемой высоты защитной стенки с волноотражающим козырьком соответствующего вида, необходимой для полной локализации волны прорыва при возможном разрушении основного резервуара;

– в разработке рекомендаций по определению геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком, направленных на обеспечение требуемого уровня пожарной, промышленной и экологической безопасности при эксплуатации РВСЗС;

– в использовании полученных данных организациями для оптимизации конструкций РВСЗС, при разработке планов по предупреждению и ликвидации разливов нефтепродуктов, планов тушения пожаров.

Разработанные рекомендации могут являться основой для создания нормативного документа или внесения дополнений в существующие нормы по пожарной безопасности объектов с использованием РВСЗС в части предотвращения каскадного развития аварии, пожара или ЧС вследствие возможного разрушения основного РВС с нефтепродуктом.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы использованы методы теории подобия и гидравлического лабораторного моделирования, наблюдения, сравнения, нахождения эмпирической зависимости на основе математической обработки экспериментальных данных, описания, обобщения.

Информационной основой исследования являлись российские и зарубежные литературные источники, нормативные документы, материалы расследований аварий и пожаров резервуаров на производственных объектах, а также научно-исследовательских работ в области разработки ограждений РВС.

Положения, выносимые на защиту:

- характеристика современного состояния электроэнергетики в СРВ и особенности размещения ТЭС на местности, включая их резервуарные парки;
- результаты анализа пожарной опасности разрушений РВС, прогнозирования каскадного развития аварии на территории ТЭС в СРВ и обоснование перспективного способа минимизации негативных последствий аварий РВС;
- описание модернизированного лабораторного стенда и основные положения методики проведения экспериментов по определению требуемой высоты защитной стенки РВСЗС с обустроенным на ней ГВК или НВК;
- эмпирические формулы для определения высоты защитной стенки в зависимости от геометрических параметров основного РВС, межстенного расстояния и длины вылета волноотражающего козырька соответствующего вида;
- основные положения рекомендаций по определению геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком для полной локализации потока жидкости в случае разрушения основного РВС.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается: обоснованностью выбора критериев подобия и соблюдением условий моделирования гидравлических явлений при модернизации лабораторного стенда и проведении экспериментов; использованием апробированных методик измерения и обработки экспериментальных данных; внутренней непротиворечивостью и воспроизводимостью результатов исследования.

Материалы диссертации реализованы при разработке:

- проекта приложения А «Метод определения геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком резервуара типа «стакан в стакане»» в национальный стандарт СРВ – TCVN 5684:2003 «Пожарная безопасность нефтяных сооружений. Общие требования»;

– проектной документации на реконструкцию резервуарного парка ТЭС «Зуен Хай 2» (СРВ), предполагаемой, в том числе, строительство и эксплуатацию резервуаров типа «стакан в стакане», а также при разработке планов предупреждения ЧС, обусловленных аварийными разливами нефтепродуктов;

– материалов по тематике обеспечения пожарной безопасности резервуарного хранения горючих жидкостей на объектах ТЭК Вьетнама для чтения лекций, проведения практических и семинарских занятий с обучающимися Института пожарной безопасности Министерства общественной безопасности СРВ;

– материалов по теме обеспечения пожарной безопасности резервуарного хранения горючих жидкостей на производственных объектах для чтения лекций, проведения практических и семинарских занятий с обучающимися бакалавриата, специалитета и магистратуры Академии ГПС МЧС России.

Основные результаты работы доложены на: 30-ой Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2021» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021); I-ой Международной научно-практической конференции «Система безопасности» (Улан-Батор, Университет Внутренних Дел Монголии, 2021); VIII-ой Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2022); XI-ой Международной научно-практической конференции «Проблемы техносферной безопасности – 2022» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 4 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 160 страницах машинописного текста, включает в себя 28 таблиц, 69 рисунков, список литературы из 160 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ РАЗРУШЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ И СПОСОБОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КАСКАДНОГО РАЗВИТИЯ ПОЖАРА В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ВЬЕТНАМА

1.1 Современное состояние тепловых электростанций Вьетнама и особенности их размещения на местности

Электроэнергетика, включающая в себя производство, передачу и сбыт электроэнергии, является одной из приоритетных отраслей экономики СРВ, обеспечивающей электрической энергией внутренние потребности народного хозяйства и населения. Устойчивое развитие и надежное функционирование отрасли во многом определяют энергетическую безопасность страны и являются важными факторами ее успешного экономического развития [1]–[4].

Располагая крупными запасами нефти (более 600 млн т), природного газа (свыше 600 млрд м³), угля (более 3360 млн т) и гидроэнергетических ресурсов, СРВ обладает значительными возможностями для развития электроэнергетики. За последние 10 лет (с 2011 по 2021 гг.) количество выработанной электроэнергии во Вьетнаме возросло в 2,4 раза (с 101,5 ТВт·ч до 244,8 ТВт·ч). В настоящее время страна занимает второе место в Юго-Восточной Азии и 21-е место в мире по производству электроэнергии [3], [5]–[8].

Основные производители электрической энергии в СРВ – гидроэлектростанции, тепловые электростанции с паротурбинными блоками, работающими на угле, мазуте, дизельном топливе и с комбинированными газопаротурбинными установками. На рисунке 1.1 представлено распределение выработанной за 2021 г. электроэнергии соответствующими производителями, включая развиваемые в стране возобновляемые источники энергии (далее – ВИЭ), такие как солнечная энергия, энергия ветра, энергия биомассы и др. [5]–[8].

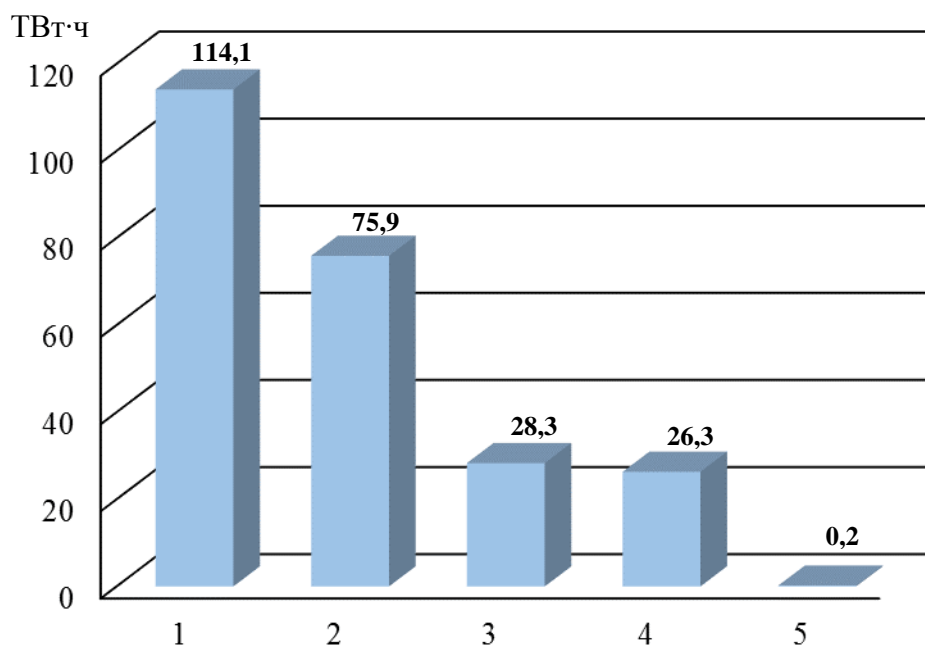


Рисунок 1.1 – Распределение выработанной электроэнергии на соответствующих предприятиях СРБ за 2021 г.:
 1 – ТЭС (уголь); 2 – ГЭС (вода); 3 – ВИЭ (ветер, солнце);
 4 – ТЭС (природный газ); 5 – ТЭС (мазут, дизельное топливо)

Обеспечение национальной энергетической безопасности, стабильное обеспечение энергии с высоким качеством и по рациональным ценам для быстрого и устойчивого социально-экономического развития, обеспечения обороны и безопасности, улучшения жизни населения и охраны экологической среды определены в качестве основных целей национальной стратегии развития энергетики СРБ до 2030 г. с видением до 2045 г. При этом в стратегии большой акцент делается на развитии источников энергоснабжения в направлении повышения самостоятельности, разнообразия и обеспечения эффективности и устойчивости, быстром и устойчивом развитии электроэнергетики в соответствии с требованиями процессов индустриализации и модернизации страны [1], [9].

На основе обязательства довести чистые выбросы до нуля к 2050 г., как было объявлено премьер-министром СРБ на 26-ой конференции Организации Объединенных Наций по изменению климата (COP26), был завершён проект Генерального плана электроэнергетики VIII (рисунок 1.2) с результатами расчета общей мощности электростанций к 2030 и 2045 гг. соответственно [9], [11], [82].

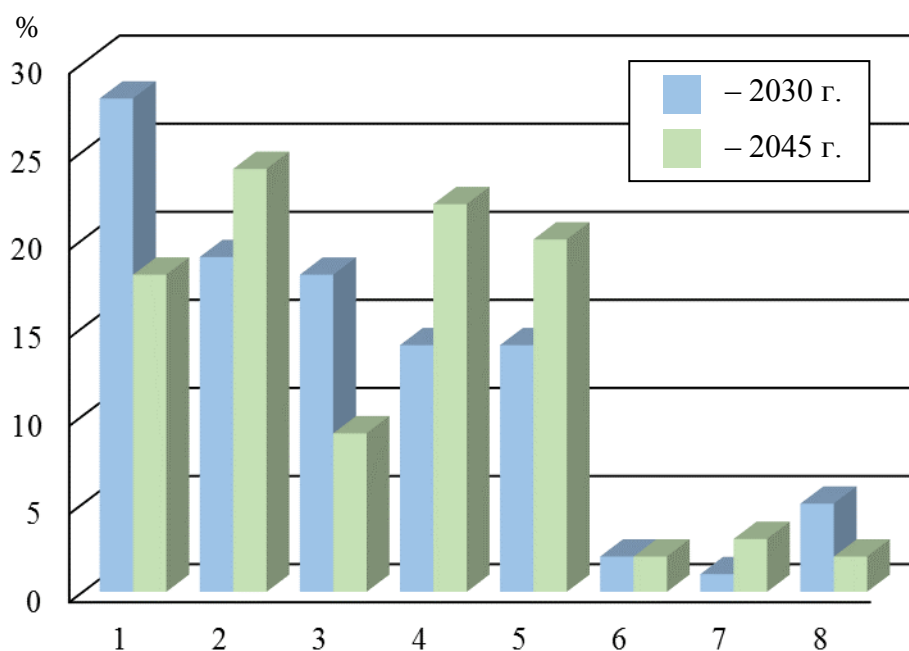


Рисунок 1.2 – Мощности соответствующих источников электроснабжения в СРВ в соответствии с Генеральным планом электроэнергетики VIII:

- 1 – угольная теплоэнергетика; 2 – газовая теплоэнергетика;
 3 – гидроэлектроэнергия; 4 – электроэнергия ветра; 5 – солнечная энергия;
 6 – электроэнергия биомассы и другие ВИЭ; 7 – гидроаккумулирующие электростанции; 8 – импорт электроэнергии

Из рисунка 1.2 видно, что несмотря на взятый оптимистичный курс по сокращению вредных выбросов в атмосферу объектами электроэнергетики, на ТЭС, работающих на природных ресурсах, в ближайшие десятилетия будет приходиться до 50 % всей вырабатываемой в стране электрической энергии. В таблицах 1.1 и 1.2 представлен перечень действующих и проектируемых на территории Вьетнама ТЭС, работающих на комбинированном топливе, природном газе и каменном угле [5]–[8], а также особенности их территориального размещения.

Анализ представленных в таблицах 1.1 и 1.2 данных показал, что почти все ТЭС (94 %) размещаются или проектируются непосредственно в черте плотной застройки населенных пунктов, при этом в 87 % границы их территорий имеют сближения с водоемами, в основном реками. Такое сближение обосновывается необходимостью обустройства водоемов-охладителей, приспособленных для отвода значительного количества тепла, образующегося в ходе технологических процессов на ТЭС [83], а также доставки топлива водным транспортом.

Таблица 1.1 – Перечень действующих во Вьетнаме ТЭС и особенности их размещения на местности

№ пп	Название ТЭС	Место нахождения (провинция)	Год ввода в эксплуатацию	Используемое топливо (резервное)	Особенности размещения	
					в границах города	вблизи водоема
1	2	3	4	5	6	7
Комбинированные ТЭС						
1	Фу Ми 1	Вунг Тау	2001	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
2	Фу Ми 2.1	Вунг Тау	2003	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
3	Фу Ми 2.1MP	Вунг Тау	2005	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
4	Фу Ми 2.2	Вунг Тау	2005	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
5	Фу Ми 3	Вунг Тау	2003	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
6	Фу Ми 4	Вунг Тау	2004	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
7	Ньон Чать 1	Донг Най	2008	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
8	Ньон Чать 2	Донг Най	2010	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
9	Ка Май 1	Ка Май	2007	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
10	Ка Май 2	Ка Май	2008	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
Газовые ТЭС						
11	Ча Нок	Кан Тхо	1976	природный газ (мазут)	да	да
12	О Мон 1	Кан Тхо	2009	природный газ (мазут)	да	да
13	Ба Риа 1	Вунг Тау	1999	природный газ (дизтопливо)	да	да
14	Ба Риа 2	Вунг Тау	2001	природный газ (дизтопливо)	да	да
15	Тху Дык	Хошимин	2003	природный газ (дизтопливо)	да	да

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7
Угольные ТЭС						
16	Ан Кхань	Тхай Нгуен	2014-2015	каменный уголь (мазут)	да	нет
17	Кам Фа 1-2	Куанг Нинь	2010	каменный уголь (мазут)	да	да
18	Као Нган	Тхай Нгуен	2007	каменный уголь (мазут)	да	да
19	Зуен Хай 1	Ча Винь	2015	каменный уголь (мазут)	да	да
20	Зуен Хай 2	Ча Винь	2022	каменный уголь (мазут)	да	да
21	Зуен Хай 3	Ча Винь	2017	каменный уголь (мазут)	да	да
22	Хай Фонг 1-2	Хай Фонг	2011-2014	каменный уголь (мазут)	да	да
23	Мао Кхе	Куанг Нинь	2013	каменный уголь (мазут)	да	нет
24	Монг Зыонг 1	Куанг Нинь	2015	каменный уголь (мазут)	да	да
25	Монг Зыонг 2	Куанг Нинь	2014	каменный уголь (мазут)	да	да
26	Алуми Ньан Ко	Тау Нгуен	2017	каменный уголь (мазут)	да	нет
27	На Зыонг	Ланг Шон	2005	каменный уголь (мазут)	да	нет
28	Нги Шон 1	Тхань Хоа	2014	каменный уголь (мазут)	да	да
29	Нги Шон 2	Тхань Хоа	2022	каменный уголь (мазут)	да	да
30	Нинь Бинь	Нинь Бинь	1976	каменный уголь (мазут)	да	да
31	Нонг Шон	Куанг Нам	2015	каменный уголь (мазут)	да	да
32	Фа Лай 1	Хай Зыонг	1986	каменный уголь (мазут)	да	да
33	Фа Лай 2	Хай Зыонг	2002	каменный уголь (мазут)	да	да
34	Куанг Нинь 1-2	Куанг Нинь	2010-2013	каменный уголь (мазут)	нет	да
35	Шон Донг	Бак Жанг	2010	каменный уголь (мазут)	да	нет
36	Тхай Бинь 1	Тхай Бинь	2018	каменный уголь (мазут)	да	да
37	Тханг Лонг	Куанг Нинь	2018	каменный уголь (мазут)	нет	нет
38	Уонг Би Р	Куанг Нинь	2009	каменный уголь (мазут)	да	да
39	Винь Тан 2	Бинь Тхуан	2014	каменный уголь (мазут)	да	да

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7
40	Винь Тан 1	Бинь Тхуан	2018	каменный уголь (мазут)	да	да
41	Винь Тан 4	Бинь Тхуан	2018	каменный уголь (мазут)	да	да
42	Вунг Анг 1	Ха Тинь	2014	каменный уголь (мазут)	да	да
43	Хай Зыонг	Хай Зыонг	2021	каменный уголь (мазут)	да	да
44	Тхай Бинь 2	Тхай Бинь	2022	каменный уголь (мазут)	да	да
45	Формоша	Донг Най	2004	каменный уголь (мазут)	да	нет
46	Ведан	Донг Най	2004	каменный уголь (мазут)	да	нет
47	Ха Тинь Формоша	Ха Тинь	2015	каменный уголь (мазут)	да	да
48	Лонг Фу 1	Шок Чанг	2022	каменный уголь (мазут)	да	да
49	Шонг Хау 1	Хау Жанг	2022	каменный уголь (мазут)	да	да

Таблица 1.2 – Перечень проектируемых в СРВ ТЭС и особенности их размещения в населенных пунктах

№ пп	Название ТЭС	Место нахождения (провинция)	Год ввода в эксплуатацию	Используемое топливо (резервное)	Особенности размещения	
					в границах города	вблизи водоема
1	2	3	4	5	6	7
Комбинированные ТЭС						
1	Ньон Чать 3	Донг Най	2023	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
2	Ньон Чать 4	Донг Най	2024	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
3	Хиеп Фыок	Хошимин	2023	природный газ и дизтопливо (дизтопливо)	да	да
Газовые ТЭС						
4	Зунг Куат 1	Куанг Нгай	2026	природный газ (мазут)	да	да
5	Зунг Куат 2	Куанг Нгай	2027	природный газ (мазут)	да	да
6	Зунг Куат 3	Куанг Нгай	2026	природный газ (мазут)	да	да
7	Куанг Чи	Куанг Чи	2028	природный газ (мазут)	да	да

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7
8	О Мон 2	Кан Тхо	2026	природный газ (мазут)	да	да
9	О Мон 3	Кан Тхо	2025	природный газ (мазут)	да	да
10	О Мон 4	Кан Тхо	2025	природный газ (мазут)	да	да
11	Центральный регион 1	Куанг Нам	2026	природный газ (мазут)	да	да
12	Центральный регион 2	Куанг Нам	2026	природный газ (мазут)	да	да
13	Шон Ми 1	Бинь Тхуан	2028	природный газ (мазут)	да	да
14	Шон Ми 2	Бинь Тхуан	2024	природный газ (мазут)	да	да
15	Ка На	Нинь Тхуан	2026	природный газ (мазут)	да	да
16	Бак Лиеу	Бак Лиеу	2027	природный газ (мазут)	да	да
17	Лонг Ан	Лонг Ан	2026	природный газ (мазут)	да	да
Угольные ТЭС						
18	Ан Кхань	Бак Жанг	2024	каменный уголь (мазут)	да	да
19	Нам динь 1	Нам Динь	2026	каменный уголь (мазут)	да	да
20	На Зыонг 2	Ланг Шон	2024	каменный уголь (мазут)	да	нет
21	Шонг Хау 2	Хау Жанг	2027	каменный уголь (мазут)	да	да
22	Винь Тан 3	Бинь Тхуан	2027	каменный уголь (мазут)	да	да
23	Вунг Анг 2	Ха Тинь	2026	каменный уголь (мазут)	да	да
24	Вунг Анг 3	Ха Тинь	2025	каменный уголь (мазут)	да	да
25	Каунг Чать 1	Куанг Бинь	2025	каменный уголь (мазут)	нет	да
26	Каунг Чать 2	Куанг Бинь	2026	каменный уголь (мазут)	нет	да
27	Куинь Лап	Тхань Хоа	2028	каменный уголь (мазут)	да	да
28	Куанг Чи 1	Куанг Чи	2024	каменный уголь (мазут)	нет	да
29	Ван Фонг	Кхань Хоа	2024	каменный уголь (мазут)	да	да
30	Лонг Ан 1	Лонг Ан	2025	каменный уголь (мазут)	да	нет
31	Лонг Ан 2	Лонг Ан	2028	каменный уголь (мазут)	да	нет

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7
32	Тан Фыок 1	Тиен Жанг	2030	каменный уголь (мазут)	да	да
33	Хай Фонг 3	Хай Фонг	2026	каменный уголь (мазут)	да	да
34	Куанг Нинь 3	Куанг Нинь	2030	каменный уголь (мазут)	да	да
35	Хай Ха 1-2	Куанг Нинь	2024	каменный уголь (мазут)	да	да
36	Хай Ха 3-4	Куанг Нинь	2028	каменный уголь (мазут)	да	да

На рисунках 1.3-1.5 показано характерное размещение соответствующих видов ТЭС на местности.



Рисунок 1.3 – Общий вид ТЭС «Ньон Чать 2» в провинции Донг Най, работающей на природном газе и дизельном топливе (резервное топливо – дизельное топливо)



Рисунок 1.4 – Общий вид ТЭС «О Мон 1» в провинции Кан Тхо, работающей на природном газе (резервное топливо – мазут)



Рисунок 1.5 – Общий вид ТЭС «Нги Шон 2» в провинции Тхань Хоа, работающей на каменном угле (резервное топливо – мазут)

Неотъемлемыми объектами ТЭС являются резервуарные парки, предназначенные для обеспечения бесперебойной подачи к котлам подогретого и отфильтрованного топлива в необходимом количестве и с соответствующими давлением и вязкостью [83]. Из данных, представленных в таблицах 1.1 и 1.2 следует, что на ТЭС в основном используется мазут, реже – дизельное топливо. При этом, в зависимости от вида ТЭС, мазут (дизель) используется как в виде основного топлива, так и в виде растопочного, аварийного и резервного топлива.

Прием, хранение, подогрев, выдача и обезвоживание топлива осуществляется в вертикальных стальных резервуарах номинальной вместимостью от 700 до 30000 м³. Резервуары на территории ТЭС расположены в группах, имеющих по периметру замкнутое грунтовое обвалование или железобетонное ограждение, конструктивно выполненное в виде вертикальных стен. При этом на ряде ТЭС (около 10 %) группы РВС не имеют сплошного ограждения, а по периметру отбортованы бордюрным камнем. Характерный вид рассматриваемых групп резервуаров представлен как на рисунках 1.3-1.5, так и на рисунках 1.6-1.9.



Рисунок 1.6 – Общий вид группы резервных резервуаров с мазутом в железобетонном ограждении на ТЭС «Ча Нок» в провинции Кан Тхо



Рисунок 1.7 – Общий вид группы основных резервуаров с дизельным топливом в железобетонном ограждении на ТЭС «Ка Мау 1» в провинции Ка Мау



Рисунок 1.8 – Общий вид группы основных резервуаров с дизельным топливом в грунтовом обваловании на ТЭС «Фу Ми 1» в провинции Вунг Тау



Рисунок 1.9 – Общий вид группы резервных резервуаров с мазутом на отбортованной площадке ТЭС «Вунг Анг 1» в провинции Ха Тинь

Важно указать, что в соответствии с требованиями нормативных документов, действующих как в СРВ [51], [84]–[88], так и в России [89]–[99], ТЭС относятся к потенциально опасным производственным объектам, для которых в обязательном порядке должны разрабатываться планы предупреждения и ликвидации аварийных ситуаций. В этой связи следует отметить, что в резервуарных парках к наиболее опасной ситуации, способной привести к каскадному и катастрофическому развитию аварии, относится полное (квазимгновенное) разрушение РВС с горючей жидкостью. Именно в этом случае образуется волна прорыва, способная разрушить нормативное ограждение или перелиться через него, разливаясь на значительной площади, нередко с воспламенением паров, достигая объектов городской застройки и акваторий [12]–[46]. Невозможность ограничения площади пролива горючей жидкости в резервуарной группе обусловлена как недостаточной высотой, так и устойчивостью ограждений, расчет которых традиционно производится на гидростатическое давление пролитой жидкости [51], [52]. Подтверждением вышесказанному являются статистические данные о разрушениях РВС, анализ которых представлен в следующем подразделе настоящей работы.

1.2 Анализ статистических данных разрушений резервуаров на объектах топливно-энергетического комплекса России

Наиболее обстоятельно описания 154 случаев разрушений РВС с нефтью, нефтепродуктами и другими жидкостями, произошедших на объектах топливно-энергетического комплекса СССР, СНГ и России, в том числе в резервуарных парках объектов энергетики, за период с 1951 по 2019 гг. приведены в работах [12]–[16], [26], [36], [37]. При этом важно отметить, что в период написания диссертации на территории теплоэлектроцентрали (далее – ТЭЦ) в г. Норильске [38]–[42] и в группе мазутных резервуаров котельной в г. Пензе [43]–[46] также произошли разрушения резервуаров, подробное описание причин и последствий которых будет приведено далее. Таким образом всего за период с 1951 по 2022 г. на объектах ТЭК России произошло 156 случаев квазимгновенных разрушений РВС, полигон распределения которых по годам представлен на рисунке 1.10.

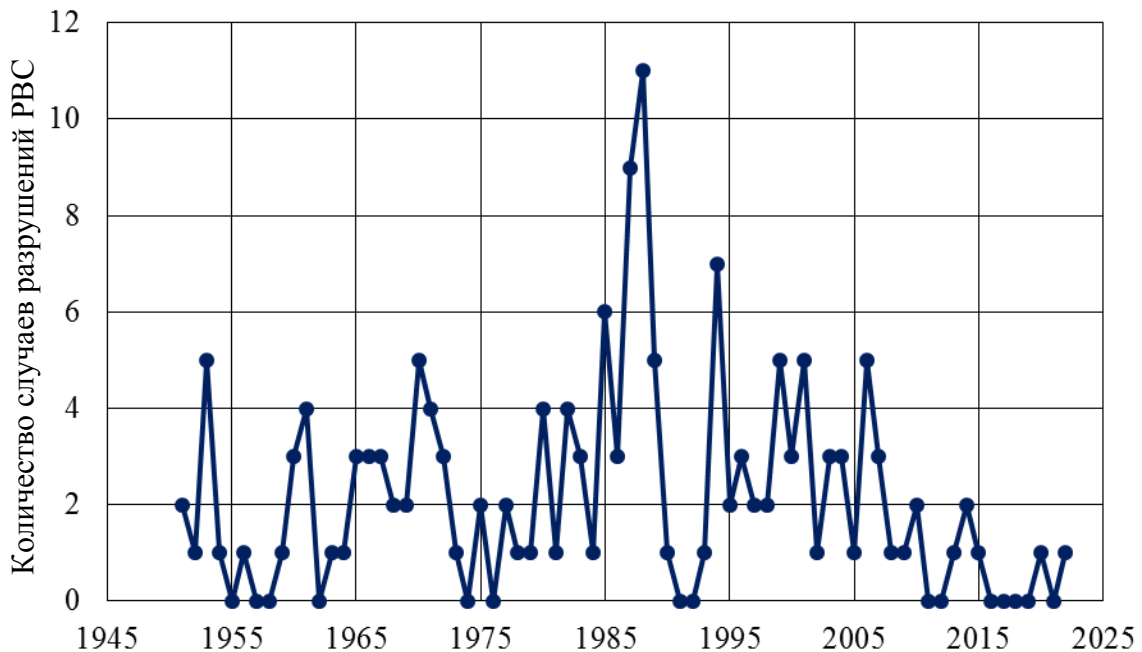


Рисунок 1.10 – Полигон распределения 156 случаев разрушений РВС на объектах ТЭК России за период с 1951 по 2022 гг.

Частота разрушений РВС на объектах ТЭК России, вычисленная прямым счетом, может оцениваться величиной $2,17 \text{ год}^{-1}$.

Распределение рассматриваемых аварий по соответствующим отраслям промышленности представлено на рисунке 1.11, из которого видно, что непосредственно на объектах энергетики (ТЭЦ, государственных районных электростанциях (далее – ГРЭС), котельных) произошло 23 случая (14,74 %) разрушений РВС, полигон распределения которых по годам представлен на рисунке 1.12.

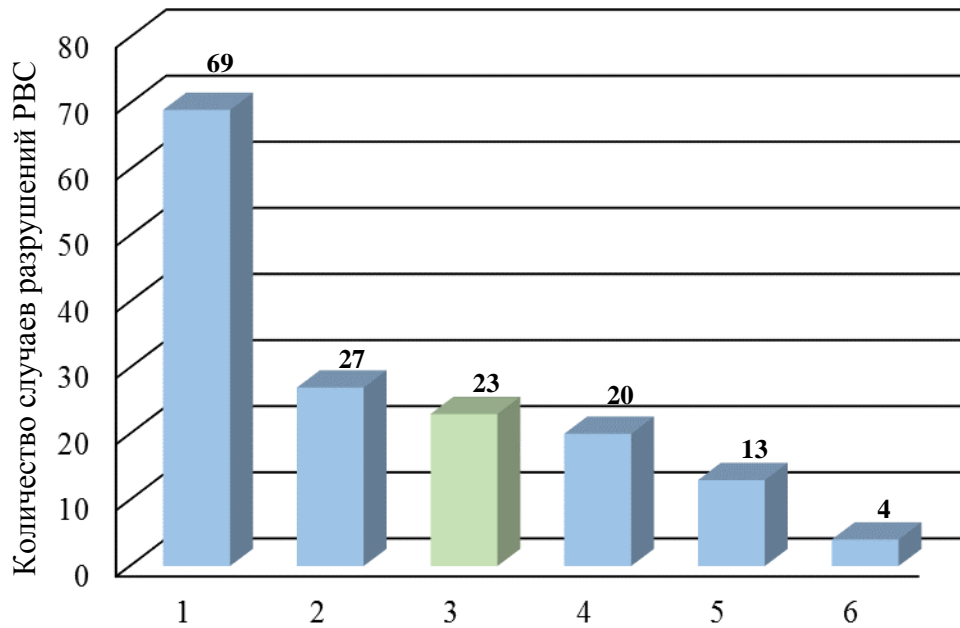


Рисунок 1.11 – Распределение разрушившихся РВС по объектам ТЭК:
 1 – объекты хранения нефти и нефтепродуктов; 2 – объекты переработки нефти;
 3 – объекты энергетики; 4 – объекты добычи нефти; 5 – объекты транспортировки нефти и нефтепродуктов; 6 – объекты экспорта нефти и нефтепродуктов

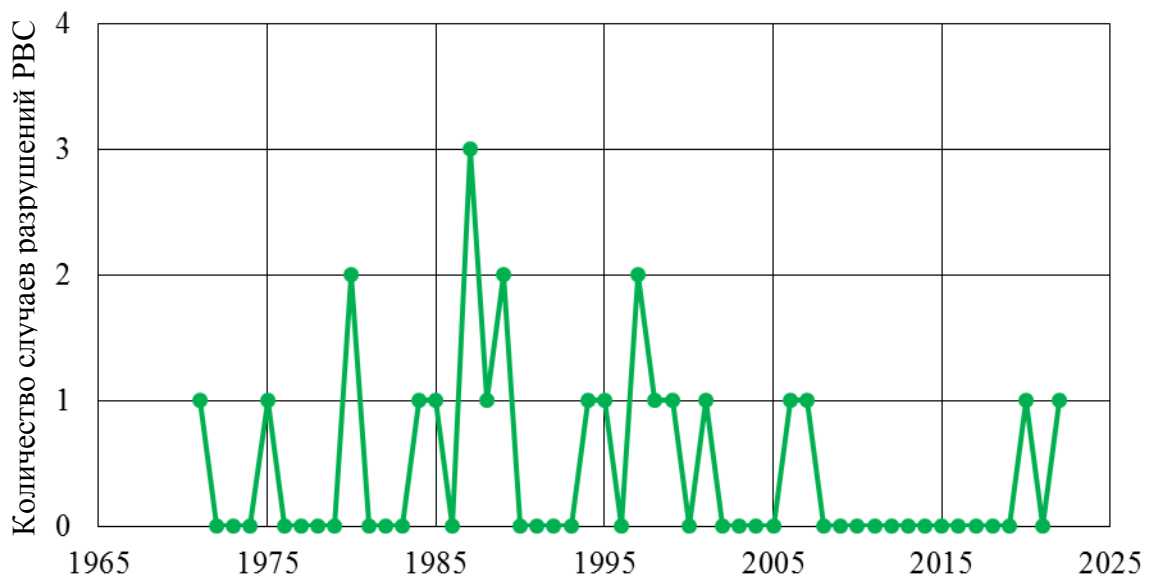


Рисунок 1.12 – Полигон распределения случаев разрушений РВС на объектах энергетики за период с 1971 по 2022 гг. (частота разрушений РВС – 0,44 год⁻¹)

Анализ рассматриваемых инцидентов на объектах энергетики показал, что разрушению подвергались конструкции РВС номинальной вместимостью от 600 до 30000 м³, при этом почти половина случаев (47,83 %) приходилась на разрушения новых РВС при проведении гидравлических испытаний. В остальных случаях РВС перед аварией находились в эксплуатации от 2 до 30 лет.

Причинами разрушений РВС на объектах энергетики в подавляющем большинстве случаев (56,52 %) являлись дефекты сварочно-монтажных работ, выявленные в ходе расследования аварий. В 17,39 % случаев РВС были разрушены от внутреннего взрыва паровоздушной смеси, источником зажигания которой стали искры при производстве сварочных работ. Еще 8,7 % случаев аварий произошли вследствие упущения и просчетов при проектировании, строительстве и монтаже РВС. Остальные 17,39 % инцидентов произошли по причинам хрупкого разрушения металла, неравномерной осадки основания РВС, коррозионного износа и грубого нарушения требований промышленной безопасности (рисунок 1.13).

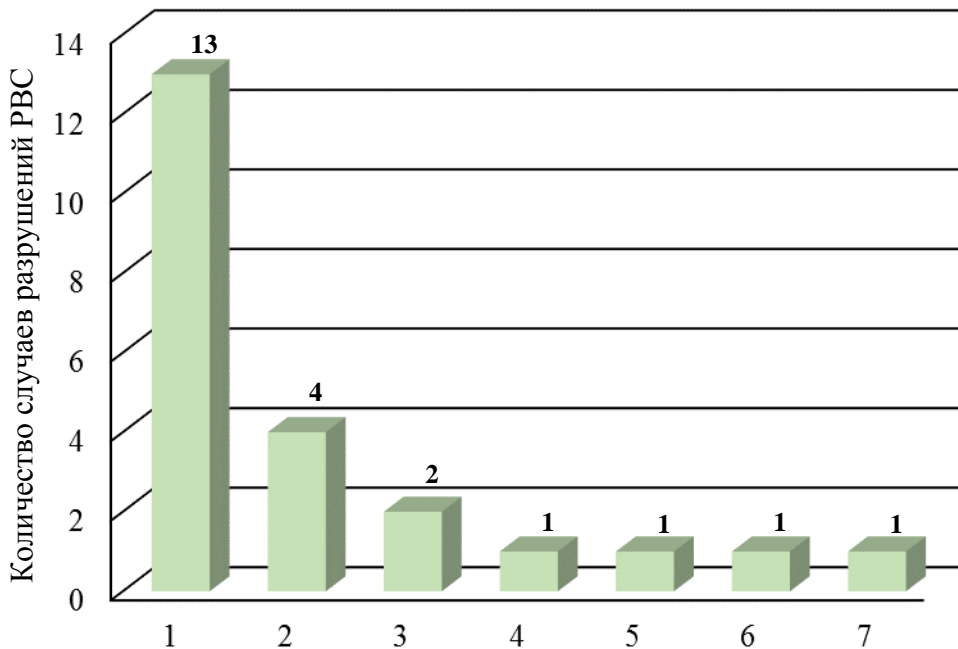


Рисунок 1.13 – Распределение причин разрушений РВС:

1 – дефекты сварочно-монтажных работ; 2 – взрыв внутри РВС при производстве сварочных работ; 3 – упущения и просчеты при проектировании, строительстве, монтаже и др.; 4 – хрупкое разрушение металла; 5 – неравномерная осадка основания РВС; 6 – коррозионный износ; 7 – нарушение требований промышленной безопасности

Продолжая анализ последствий 156 случаев разрушений РВС важно указать, что почти 50 % всех аварий характеризовались как крупномасштабные, 33 из которых привели к гибели 128 человек, при этом каждый третий случай разрушения РВС сопровождался каскадным развитием аварии (рисунок 1.14).

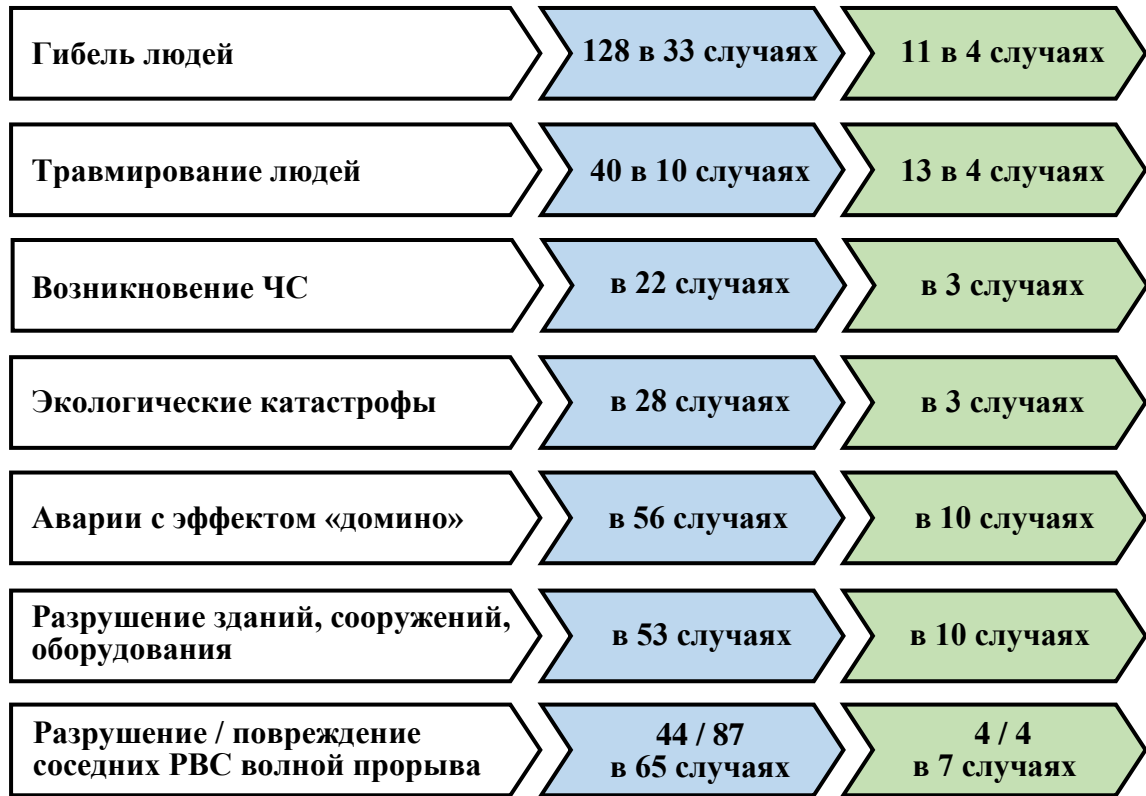


Рисунок 1.14 – Последствия 156 случаев разрушений РВС на объектах ТЭК (синий цвет), в том числе 23 случаев на объектах энергетики (зеленый цвет)

Также необходимо отметить, что почти все разрушения РВС произошли в резервуарных парках с нормативными земляными обвалованиями или ограждающими стенами, конструктивно выполненными из железобетонных плит или блоков [52]. При этом анализ последствий рассматриваемых инцидентов свидетельствует, что такие преграды не способны удерживать образующийся гидродинамический поток жидкости, который в 46,2 % случаев разрушал ограждение или размывал обвалование, выходя за пределы территории объекта, что приводило к катастрофическим последствиям с большим материальным ущербом. В 35,3 % случаев разрушений РВС волна промывала земляные обвалования или перехлестывала через них, не разливаясь за пределы территории объекта.

Как правило такие аварии происходили при разрушении РВС объемом до 2000 м³ или при частичном заполнении резервуаров (до 2/3 высоты) большего объема. В остальных случаях разлив жидкости ограничивался обвалованием, что обусловлено незначительным уровнем заполнения РВС (менее 1/5 высоты), разрушившихся, как правило, от взрыва при самовозгорании пиррофорных отложений или проявлении разрядов статического электричества при отборе проб. При этом наиболее негативные последствия отмечались при авариях на объектах, расположенных в городах и других населенных пунктах, а также вблизи акваторий. Так, в 14 % случаев аварий возникали чрезвычайные ситуации, при которых производилась эвакуация населения с привлечением большого количества личного состава пожарной охраны, специальной и другой техники.

Таким образом можно сделать вывод, что несмотря на значительный прогресс, достигнутый в области проектирования и эксплуатации РВС, включая разработку систем обеспечения пожарной и промышленной безопасности, возможность разрушений резервуаров сохраняется, при этом последствия таких аварий наносят все больший материальный ущерб. В качестве подтверждения высказанному ниже приведены описания характерных аварий РВС на объектах энергетики при проведении гидравлических испытаний и в период их эксплуатации, при этом основное внимание уделено последствиям воздействия волны прорыва на ограждения различного конструктивного исполнения [13], [36]–[46], [74], [100].

В июне 1984 г. в резервуарном парке мазутного хозяйства ГРЭС в Таджикистане при проведении гидравлических испытаний произошло полное разрушение РВС-20000 м³. Резервуар находился в собственном железобетонном обваловании, которое было разрушено по направлению движения образовавшегося потока воды, при этом волна ударила в соседний однотипный РВС, что также привело к его разрушению и увеличению площади пролива до 140000 м².

5 июля 1985 г. в резервуарном парке мазутного хозяйства Невинномысской ГРЭС в Ставропольском крае при проведении гидравлических испытаний также произошло разрушение РВС-20000 м³ (№ 2), который располагался в группе еще с двумя однотипными резервуарами.

Внешнее ограждение парка находилось на расстоянии 12 м от стенки РВС и по конструктивному исполнению состояло из железобетонных плит с размерами $6000 \times 2500 \times 300$, закрепленных между собой сваркой на опорных колоннах сечением 450×450 , заглубленных в грунт на 1,5 м (рисунок 1.15), а внутреннее ограждение – из железобетонных блоков с размерами $1300 \times 1000 \times 150$.



Рисунок 1.15 – Общий вид ограждения до аварии РВС № 2

При разрушении РВС № 2 образовавшийся поток воды развернул стенки резервуара, оторвал их от днища и кровли и реактивной силой отбросил в сторону РВС № 3 и внешнего ограждения (рисунок 1.16), при этом конструкциями разрушившегося резервуара был поврежден и сдвинут с фундамента на 1 м РВС № 3. Стенка РВС № 3 была оторвана по окружности от днища на 11,3 м и деформирована до уровня шестого пояса с глубиной вмятины 1,12 м во втором поясе (рисунок 1.17).



Рисунок 1.16 – Общий вид РВС № 2 после разрушения



Рисунок 1.17 – Общий вид поврежденного РВС № 3

Разрушение РВС № 2 произошло непосредственно в сторону РВС № 1, в котором хранилось 2,5 т мазута. При ударном воздействии потока воды на соседний резервуар произошла сильная деформация его стенки и отрыв днища от обечайки по сварному соединению. Общая деформация стенки составила более 80 м с глубиной вмятины 2,52 м на уровне четвертого пояса. Кроме этого, потоком воды и падающими конструкциями РВС были полностью разрушены внутренние ограждающие стены группы резервуаров, а наружные – на 70 %, снесена эстакада трубопроводов на протяжении 130 м, при этом конструкции стен ограждений отброшены на 40 м в сторону промышленной площадки (рисунок 1.18).



Рисунок 1.18 – Общий вид разрушенного железобетонного ограждения

Важно отметить, что железобетонные элементы разрушенного ограждения, подхваченные потоком воды, повредили соседний резервуар с мазутом, который разлился по окружающей территории на площади более 95000 м², замазутил р. Барсучки и частично попал в р. Кубань, что привело к большому экологическому ущербу (рисунок 1.19).

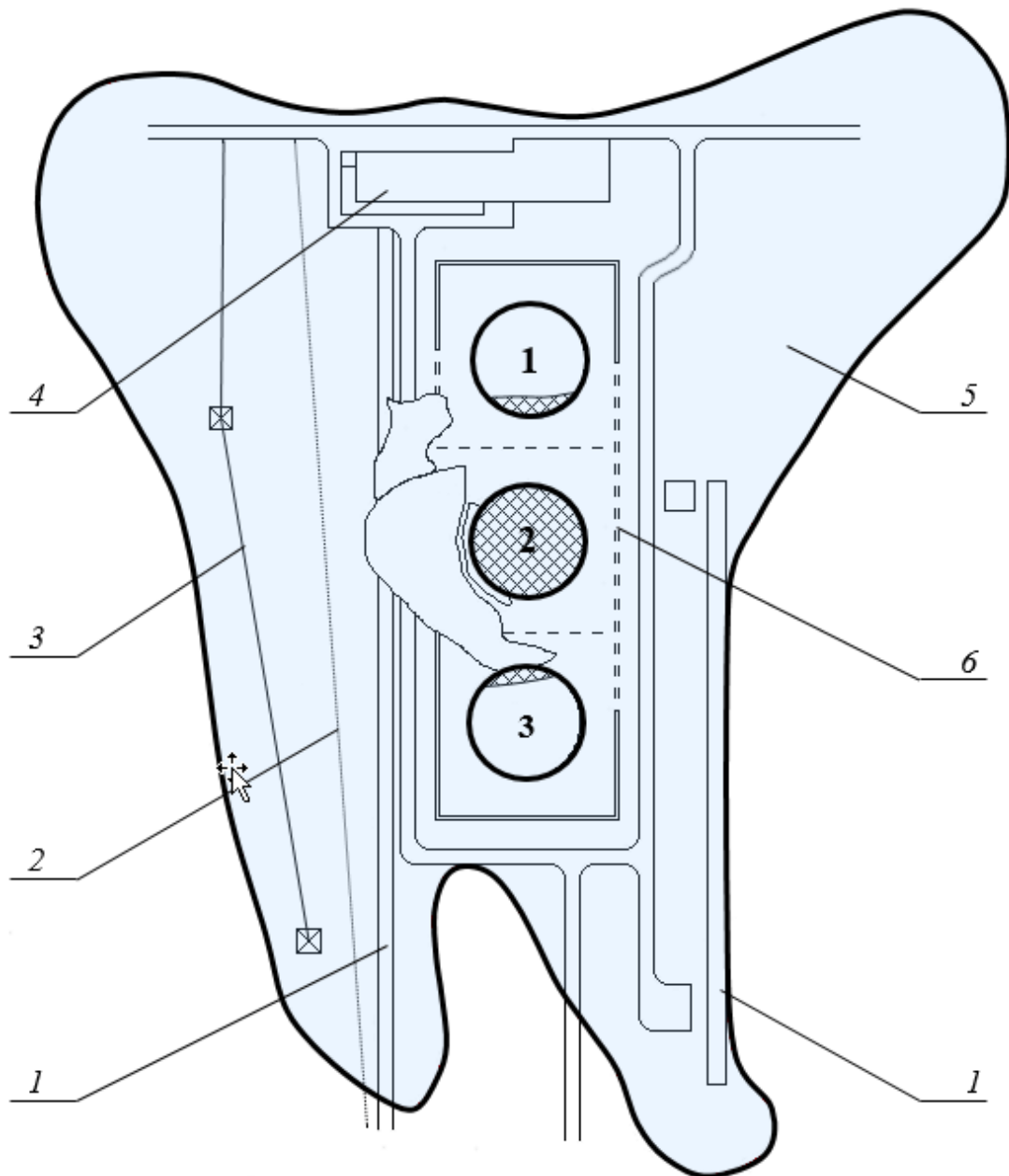


Рисунок 1.19 – Последствия разрушения РВС № 2 с водой:

1 – котлован глубиной 3 м; 2 – ограждение территории ГРЭС; 3 – линия электропередач; 4 – здание насосной перекачивающей станции; 5 – площадь разлива воды (95400 м²); 6 – разрушенное железобетонное ограждение высотой 1,5 м; 1, 3 – резервуары типа РВС-20000 м³ с мазутом; 2 – аварийный резервуар

Авария выявила недостаточную несущую способность ограждения (на сдвиг и опрокидывание), выполненного из железобетонных элементов. В соответствии с нормативными требованиями ограждение было рассчитано на гидростатическое давление разливающейся жидкости. Ошибочный подход к принципу расчета ограждения привел к тому, что авария одного резервуара повлекла за собой повреждение еще двух соседних резервуаров.

В марте 1987 г. на территории мазутного хозяйства «Котовской» ГРЭС в Одесской области при проведении гидравлических испытаний произошло полное разрушение резервуара типа РВС-20000 м³. Резервуар находился в собственном железобетонном обваловании, которое было разрушено по направлению движения образовавшегося потока, что привело к разливу воды как по территории объекта, так и за его пределами, на общей площади около 140000 м² (рисунок 1.20).



Рисунок 1.20 – Положение фрагмента крыши с центральной стойкой разрушенного РВС-20000 м³

24 декабря 1987 г. на территории мазутного хозяйства «Запорожской» ГРЭС в г. Энергодаре во время гидравлического испытания полностью разрушился РВС-30000 м³ (высота 17,8 м, диаметр 45,5 м). Разрушение РВС началось в вертикальном сварном шве на уровне четвертого пояса, который не был предусмотрен проектной документацией.

По проекту расширения мазутного хозяйства предусматривалось разместить два резервуара типа РВС-30000 м³ в двойном контуре земляных обвалований высотой 4 м, шириной бровки поверху 2 м, шириной подошвы основания 16 м каждый. Разделительный земляной вал между резервуарами имел те же размеры, что и основное обвалование первого (внутреннего) контура.

Расстояние между откосами первого и второго контуров обвалований составляло 11 м. Расстояние между стенками резервуара и подошвой откосов первого контура обвалования составляло 8 м. Тело обвалования состояло из послойно уплотненной песчано-гравийной смеси с добавлением до 40 % (по объему) глинистого грунта. С внутренней (обращенной к РВС) стороны и гребень обвалования были дополнительно укреплены бетонной стяжкой толщиной 150 мм. Перед проведением гидравлических испытаний вокруг РВС был полностью выполнен только первый контур обвалования. Внешний контур обвалования выполнен частично (с северной и восточной сторон). К моменту разрушения РВС был заполнен водой до отметки 16,6 м.

При разрушении РВС напор излившейся воды оторвал его стенку по всему периметру днища, развернул ее дугой с углом разворота около 120-130° и отбросил на обвалование. Днище, сдвинутое на 800 мм от проектной оси, осталось на фундаменте. Крыша, оторванная от стенки, упала на днище. Поток воды перехлестнул и размыл более чем на 1 м гребень обвалования во всех направлениях. С северной и западной сторон обвалование разрушено развернутыми конструкциями резервуара. Основной поток воды ударил в угол юго-западной стороны обвалования и промыл его до отметки минус 1,1 м с шириной прорана более 8 м. Площадь разлива жидкости составляла более 0,75 км² (рисунок 1.21).

Авария выявила неспособность земляной дамбы даже усиленной бетонной стяжкой противостоять промыву и удержать волну прорыва. При этом следует отметить, что земляное обвалование препятствует развертыванию в полной мере конструкций резервуара при его разрушении, тем самым соседние в группе резервуары не подвергаются разрушительным динамическим воздействиям движущихся конструкций и, следовательно, деформациям.

31 декабря 1989 г. на территории мазутного хозяйства «Кураховской» ГРЭС в Донецкой области при проведении гидравлических испытаний произошло разрушение резервуара типа РВС-10000 м³. На момент аварии в РВС находилось около 7000 м³ воды. При заполнении РВС в нем была обнаружена течь и принято решение о прекращении наполнения и доставке сварочного аппарата.

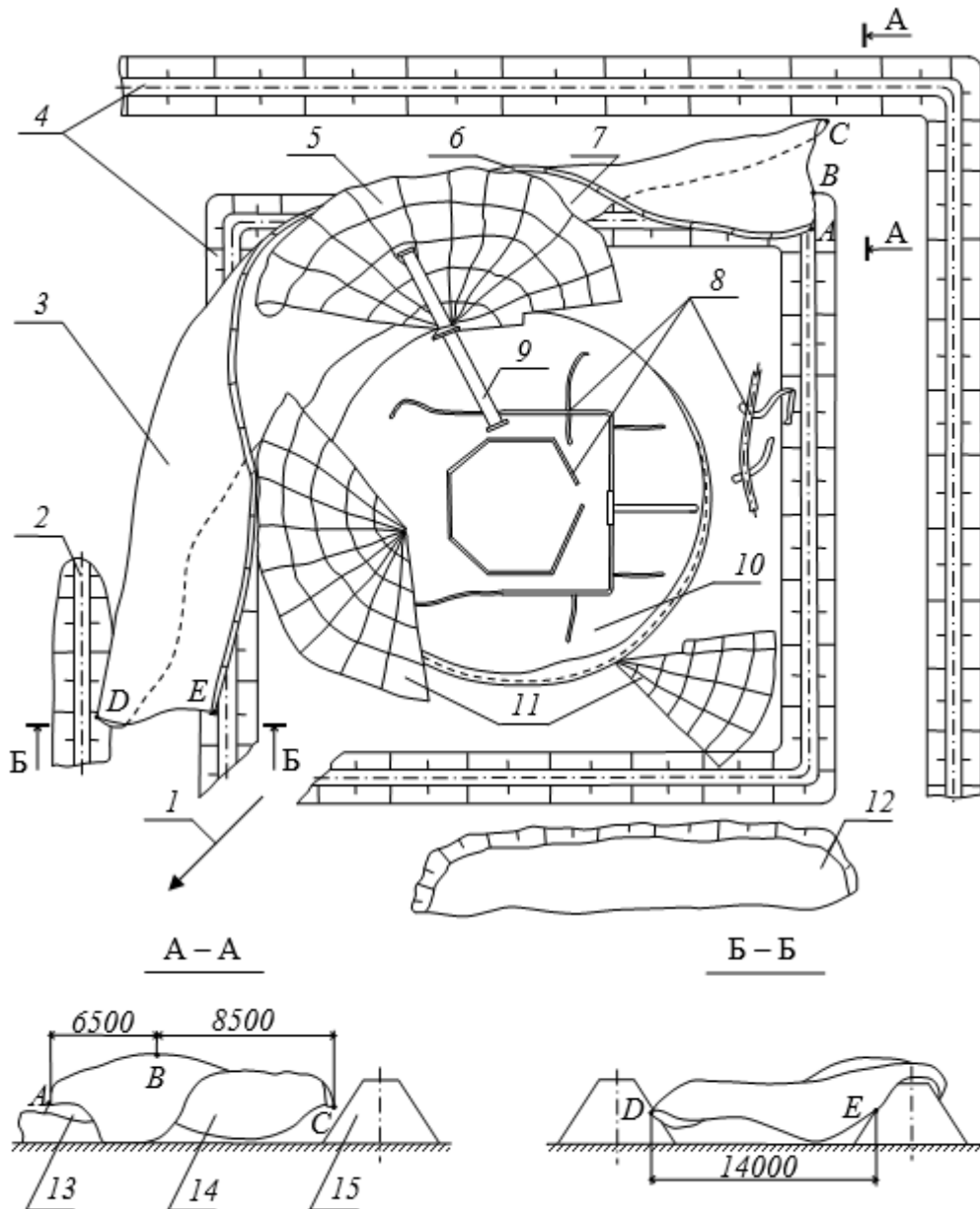


Рисунок 1.21 – Последствия разрушения РВС-30000 м³ с водой:
 1 – направление разрушения РВС; 2 – незаконченный второй контур обвалования; 3 – обечайка РВС; 4 – земляное обвалование высотой 4 м; 5 – сектор кровли РВС; 6 – верхняя часть обечайки; 7 – нижняя часть обечайки; 8 – разрушенные системы трубопроводов; 9 – стойка РВС; 10 – днище РВС; 11 – сектора кровли; 12 – вырытый котлован под строительство нового РВС глубиной 8 м; 13 – размытая верхняя часть обвалования; 14 – обечайка РВС; 15 – второй контур обвалования

Однако в начале выполнения сварочных работ произошло разрушение РВС. Поток воды и конструкциями резервуара были смертельно ранены двое рабочих, а также перевернут монтажный кран, который своей стрелой пробил корпус соседнего РВС-10000 м³ с мазутом на высоте 4 м от земли. Около 3000 м³ мазута разлились по территории объекта (рисунок 1.22).



Рисунок 1.22 – Общий вид разрушенных РВС-10000 м³

К ликвидации аварии были привлечены значительные силы и средства. В первую очередь была перекрыта ливневая канализация, по которой мазут мог попасть в водохранилище на р. Волчьей, где находились зона отдыха и крупное садковое рыбное хозяйство. Бригады пожарных и бульдозеристы в кратчайшие сроки производили обвалование залитой мазутом территории, одновременно производился сбор мазута и его отправка на топливный склад. Общая площадь разлива достигала 60000 м².

29 мая 2020 г. на территории резервуарного парка ТЭЦ-3 в г. Норильске Красноярского края произошло частичное разрушение РВС-30000 м³, содержащего 21000 м³ дизельного топлива, последствия которого привели к объявлению чрезвычайной ситуации федерального уровня и вызвали широкий общественный резонанс.

Причиной аварии резервуара явилась недостаточная несущая способность плитного ростверка основания и железобетонных свай, что привело к разрушению свай-стоек и железобетонного основания с его просадкой до 1,5 м под днищем резервуара (рисунок 1.23).



Рисунок 1.23 – Участок разрушения резервуара на ТЭЦ-3 в г. Норильске

В результате аварии до 6000 м³ топлива по уклону разлилось на прилегающей к ТЭЦ местности, а до 15000 м³ – попало в р. Амбарная, р. Далдыкан и их притоки. Кроме этого, топливо попало на дорогу, что привело к воспламенению его паров от нагретых частей проезжающего автомобиля, при этом водитель успел эвакуироваться, а пожар был оперативно потушен (рисунок 1.24).



Рисунок 1.24 – Фрагмент тушения легкового автомобиля

Общая площадь загрязнения топливом территории, включая водные объекты, составила более 180000 м², при этом предельно допустимые концентрации загрязнителей в реках были превышены в десятки тысяч раз. С целью предупреждения развития катастрофы, связанной с возможностью попадания топлива в озеро Пясино, откуда вытекает р. Пясина, впадающая в Карское море, спасателями были установлены многочисленные боновые заграждения на р. Амбарная (рисунок 1.25). На очистке территории работали более 1000 специалистов, были обустроены палаточные городки и автономные системы обеспечения, использовалась специализированная техника. Общий ущерб от аварии одного резервуара превысил 148 млрд руб.



Рисунок 1.25 – Установка бонов для локализации разлива топлива на р. Амбарная

Извлекая уроки из этой аварии в контексте настоящей работы можно сделать вывод о невозможности локализации потока жидкости нормативным земляным обвалованием даже при частичном разрушении крупногабаритного резервуара. Следовательно, необходимо заблаговременно принимать решения о дополнительных мероприятиях, направленных как на недопущение разрушений РВС, так и на ограничение возможного пожара пролива горючих жидкостей.

9 марта 2022 г. на территории мазутного хозяйства «Энергоснабжающего предприятия» в г. Пензе произошло полное разрушение РВС-2000 м³ с битумом. Благодаря кадрам с камер наружного видеонаблюдения (рисунок 1.26) можно видеть непосредственно момент аварии резервуара с раскрытием его стенок и образованием мощного потока битума, который разрушил железобетонное ограждение, повредил соседний однотипный резервуар, автомобильные цистерны и разлился по территории на площади до 16000 м² (рисунок 1.27).



Рисунок 1.26 – Кадры видеосъемки разрушения РВС-2000 м³ с битумом



Рисунок 1.27 – Последствия разрушения резервуара с битумом

В результате разрушения РВС и воздействия потока битума два человека погибли, еще восемь человек получили травмы. Основной причиной аварии являлось нарушение требований промышленной безопасности, так как резервуар был выведен из эксплуатации еще в 2009 г. и не предназначался для хранения битума.

Продолжая анализ аварий РВС важно также отметить, что раскрытие их стенок происходило, в основном, вследствие разрушения наиболее нагруженного элемента – узла сопряжения стенки с днищем. При этом стенка разрушалась, как правило, 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°. Обечайка РВС с силой отбрасывалась с основания в сторону, противоположную направлению истечения потока, а крыша обрушивалась на днище или частично отрывалась по образующей от стенок.

Рассмотренные обстоятельства являются важными и их необходимо учитывать при модернизации лабораторного стенда для исследования эффективности предлагаемого в настоящей работе волноотражающего козырька для снижения высоты защитной стенки РВСЗС при условии локализации всего объема жидкости, который может храниться в основном резервуаре до его аварии.

В заключении отметим, что аналогичные случаи разрушений РВС с нефтью и нефтепродуктами неоднократно происходили и на объектах ТЭК США, Канады, Норвегии, Венесуэлы, Японии, Англии, Голландии, Польши, Италии, Болгарии, Мексики, Швеции, Германии, Турции и других стран, в том числе, Вьетнама, некоторые краткие сведения о которых приведены далее.

1.3 Характерные примеры разрушений резервуаров на объектах топливно-энергетических комплексов зарубежных стран

Обстоятельный анализ причин и последствий разрушений РВС на объектах ТЭК зарубежных стран в литературных источниках практически не приводится. Как правило, публикуется ограниченная информация о крупных инцидентах, которые привели к гибели людей или экологическим катастрофам. В связи с этим, далее приводятся некоторые краткие сведения о таких происшествиях, при этом основное внимание также уделено характеру воздействия потока жидкости на различные ограждения резервуаров [17]–[37], [100], [101].

В 1939 г. в г. Норс Тивертоне (США) произошел один из первых случаев разрушения стенки РВС-14500 м³ при гидравлическом испытании с тяжелыми последствиями. Образовавшийся поток воды разрушил пять соседних резервуаров, в которых находилось до 23000 м³ нефтепродуктов, что привело к их разливу на значительной площади, воспламенению и распространению пожара на жилую застройку с гибелью людей.

В 1964 г. в г. Квебеке (Канада) произошло разрушение одного из двух РВС-4700 м³ с нефтью, имевших единый контур земляного обвалования. Важно отметить, что гидравлических испытаний резервуаров не проводилось. Эксплуатация началась с заполнения одного из резервуаров нефтью на высоту 3,5 м, которая поддерживалась на этом уровне более 4 месяцев. Затем резервуар был заполнен нефтью полностью.

Через 24 ч произошла потеря устойчивости основания и резервуар разрушился. Образовавшийся поток нефти перехлестнул через обвалование с частичным его размывом и разлился по всей территории производственной площадки.

В 1968 г. недалеко от г. Роттердама (Голландия) произошли разрушения трех резервуаров, номинальным объемом по 58000 м³ каждый. Непосредственно перед разрушениями из-под крайков резервуаров наблюдались утечки топлива. В связи с чем решено было начать откачку из них жидкостей, однако сделать это не удалось, так как разрушения произошли очень быстро, что привело к образованию потоков, которые промыли земляное обвалование с последующим разливом на значительной площади.

В начале 1970-х годов вблизи г. Фоулей (Англия) произошли три крупных аварии на новых резервуарах диаметром по 53 м каждый, два из которых были заполнены водой, а третий – нефтью. При разрушении одного из резервуаров поток воды промыл обвалование, при этом промоина достигала 20 м в ширину и 5 м в глубину. В результате инцидентов повреждено различное оборудование.

В 1971 г. на территории нефтеперерабатывающего завода в г. Чеховицы-Дзедзицы (Польша) от удара молнии возник пожар в РВС-12500 м³ с нефтью. Рядом находились еще три однотипных резервуара с нефтью. Через 5,5 ч произошел выброс нефти в результате которого пострадали пожарные и техника. Несмотря на охлаждение в это же время произошел взрыв в соседнем резервуаре, который разрушился и горящая нефть, перехлестнув через обвалование, разлилась по уклону на площади более 47000 м². Пожар распространился на многие здания и сооружения завода и продолжался более 48 ч.

18 декабря 1974 г. на территории нефтеперерабатывающего завода «Мицубиси Сэкие» (Япония) произошло разрушение крупногабаритного резервуара типа РВС-50000 м³ с мазутом. В результате аварии поток горящего мазута промыл земляную дамбу и распространился не только по территории завода, но и достиг причального комплекса и вышел в море.

В 1979 г. на территории нефтеперерабатывающего завода в г. Уайтинг (США) произошел пожар с катастрофическими последствиями.

Взрыв на гидрогенизационной установке привел к возникновению пожара пролива бензина и его распространению по уклону заводской территории в резервуарный парк. При этом пожар в парке бесконтрольно развивался около 30 ч, что привело к разрушению около 30 резервуаров с сырой нефтью, вместимостью от 5000 до 10000 м³. В дальнейшем пожар распространился на городские постройки. Была произведена эвакуация более 1400 жителей города. В результате пожара нанесен значительный материальный ущерб, в том числе огнем уничтожено 60 резервуаров.

В начале 1980-х годов на территории нефтеперерабатывающего завода в округе г. Валмадрера (Италия) произошло разрушение резервуара с плавающей крышей (далее – РВСПК) номинальным объемом 2000 м³, содержащего 1500 м³ нефти. Резервуар располагался в группе из четырех резервуаров, обнесенных земляным валом высотой 1,25 м. Через 40 минут после возникновения пожара, резервуар разрушился. Горящая нефть перелилась через обвалование и разлилась на большой площади, создав угрозу соседним резервуарам. Пожар продолжался более 7 ч.

19 декабря 1982 г. под г. Каракасом (Венесуэла) на складе нефтехранилища взорвался и разрушился крупногабаритный резервуар, содержащий 40000 м³ нефти. Пожар распространился в городскую черту и морскую бухту, где загорелся танкер, при этом на берегу взорвался еще один резервуар с нефтью. В результате катастрофы погибло более 140 человек, более 500 человек получили травмы.

30 августа 1983 г. на территории нефтеперерабатывающего завода «Амоко» в г. Милфорд-Хейвене (Великобритания) произошел пожар в РВСПК-100000 м³ с сырой нефтью. Через сутки в течение двух часов произошло два выброса нефти, в результате чего ожоги получили более 40 человек. После третьего выброса резервуар разрушился с разливом остатков нефти в границах обвалования.

21 декабря 1985 г. на нефтехранилище «Ажил Петроли» в г. Неаполе (Италия) произошел пожар с катастрофическими последствиями. Резервуарный парк состоял из 33 резервуаров, обнесенных по периметру земляным обвалованием высотой 7 м, за которым располагались автомобильная и железная дороги, порт и канал Спероне, впадающий в море.

В процессе перекачки нефтепродуктов с танкера в резервуарный парк произошла значительная утечка бензина, что привело к образованию значительной по размеру зоны взрывоопасных концентраций и последующему взрыву. В результате воздействия взрывной волны разрушены более 20 резервуаров, здания насосных, производственных и административных корпусов, частично разрушено земляное обвалование, при этом разрушился многоэтажный жилой дом, расположенный за каналом. Площадь пожара превышала 15000 м², тушение продолжалось четверо суток, а ущерб превысил 50 млрд лир.

2 января 1988 г. на территории терминала компании Ashland Oil в штате Пенсильвания (США) произошло разрушение РВС-15000 м³ с дизельным топливом. Образовавшийся поток нефтепродукта перехлестнул через земляное обвалование, проник в систему удаления сточных вод и через нее – в реку (около 2000 т). От воздействия мощного потока сильные повреждения получили два соседних резервуара, находившихся на расстоянии 30 м, а также разрушению подверглось строение из шлакоблоков, расположенное на расстоянии 40 м от аварийного резервуара. Из-за недостатка сил и средств для локализации утечки в начальной стадии дизельное топливо по реке достигло места слияния с другой рекой и, в конечном счете, попало в р. Огайо, в связи с чем противоаварийные мероприятия проводились в трех штатах. В результате попадания топлива в реки погибли тысячи рыб и птиц, загрязнены десятки километров береговых линий. Из-за перебоев в водоснабжении потерпели убытки многие предприятия.

В 1994 г. на территории мазутного хозяйства одной из ТЭЦ в Болгарии произошло квазимгновенное разрушение РВС-5000 м³ полностью заполненного мазутом. Образовавшимся гидродинамическим потоком было разрушено обвалование и здание администрации ТЭЦ.

12 ноября 1996 г. на территории нефтеперерабатывающего завода «Пемекс» вблизи г. Мехико (Мексика) произошло разрушение крупногабаритного резервуара с бензином. От воздействия образовавшейся волны разрушился соседний резервуар. Пожар пролива распространился на жилую застройку. Произведена эвакуация более 1000 жителей из близлежащего района. Погибло 4 человека.

26 сентября 2003 г. на территории нефтеперерабатывающего комплекса «Идемитцу», расположенном на о. Хоккайдо (Япония), в результате землетрясения был практически полностью разрушен резервуарный парк, состоящий из 105 резервуаров общим объемом 600000 м³. В результате инцидента нанесен значительный материальный ущерб.

4 февраля 2005 г. на территории химического завода вблизи г. Хельсинборга (Швеция) произошло разрушение РВС-20000 м³ с разливом до 15000 м³ серной кислоты и образованием ядовитого облака. Пострадали 13 человек. Причиной аварии резервуара стало образование трещин вследствие коррозии металла.

16 октября 2008 г. на нефтебазе «Льен Чиену» в г. Дананг (Вьетнам) из-за сильных дождевых осадков обрушилась земляная насыпь резервуарного парка, усиленная железобетонными плитами, которые в свою очередь повредили два однотипных РВС-3000 м³, что привело к их частичному разрушению с разливом соответственно бензина и индустриального масла (рисунок 1.28). Только благодаря оперативным действиям персонала объекта и пожарной охраны разлив нефтепродуктов удалось локализовать в пределах территории нефтебазы, не допустив экологической катастрофы, связанной с их попаданием в морской залив.



Рисунок 1.28 – Общий вид поврежденных резервуаров на нефтебазе «Льен Чиену»

Анализ рассмотренных инцидентов также показывает, что нормативные преграды, в том числе железобетонные ограждающие стены резервуарных парков, практически во всех случаях не смогли удержать образующийся при разрушении РВС мощный поток жидкости. При этом, если резервуарный парк находился ближе к центральной части объекта с повышенной плотностью размещения оборудования, то разрушение РВС приводило, как правило к каскадному и катастрофическому развитию аварии (пожара), а при расположении вблизи акваторий – к возникновению ЧС и экологическим катастрофам.

В связи с тем, что большинство эксплуатируемых (проектируемых) резервуарных парков на территориях ТЭС в СРВ находятся (будут находиться) в непосредственной близости к акваториям (см. таблицы 1.1, 1.2), как правило до 200 м от уреза воды, то представляется актуальным выполнить прогнозирование возможной обстановки при разрушении типового РВС с целью обоснования необходимости разработки дополнительных мероприятий, направленных на предотвращение возникновения как каскадного и катастрофического развития аварии, так и ЧС и экологической катастрофы, чему и посвящен следующий подраздел работы.

1.4 Прогнозирование каскадного развития аварии на территории тепловой электростанции во Вьетнаме при разрушении типового резервуара

Прогнозирование каскадного развития аварии выполнено на примере разрушения типового РВС-20000 м³ с мазутом (№ 2), расположенного на территории мазутного хозяйства ТЭС «О Мон 1» в провинции Кан Тхо СРВ, общий вид которой был представлен на рисунке 1.4, а расположение ТЭС в ситуационном плане показано на рисунке 1.29.

Основным видом топлива для работы ТЭС служит природный газ, а в качестве резервного топлива используется мазут, хранение которого осуществляется в группе из трех однотипных РВС-20000 м³ (диаметр 39,9 м, высота 18 м).



Рисунок 1.29 – Расположение ТЭС «О Мон 1» в ситуационном плане

В результате пожарно-технического обследования мазутного хозяйства ТЭС выявлено, что группа РВС имеет по периметру замкнутое земляное обвалование трапецеидальной формы высотой 2 м и шириной поверху 0,5 м, рассчитанное на гидростатическое давление разлившейся жидкости. Каждый резервуар в группе отделен внутренним земляным валом высотой 1,3 м. Расстояние между резервуарами в группе составляет 33 м, а от стенок резервуаров до подошвы внутренних откосов обвалования – 15 м. Таким образом противопожарные расстояния в группе рассматриваемых мазутных резервуаров соответствуют требованиям нормативных документов, действующих как на территории СРВ [51], так и в России [52]. В тоже время установлено несоответствие расстояний от стенок РВС до уреза воды р. Хау, которое фактически не превышает 64 м при нормативном – 200 м. Важно также отметить наличие незначительного уклона (не более 2,3 %) с территории мазутного хозяйства ТЭС в сторону водоема.

Прогнозирование формы площади пролива мазута и зоны возможного затопления территории при разрушении РВС-20000 м³ (№ 2) выполнены по методике, разработанной на кафедре пожарной безопасности технологических процессов (далее – ПБТП) Академии ГПС МЧС России [37], [55], [74], [100], [102], основные положения которой также изложены в методических указаниях «Расчетное определение параметров аварийного разлива нефти и нефтепродуктов при квазимгновенном разрушении РВС» [103], используемых специалистами «НК «РОСНЕФТЬ» для обоснования уровня возможной ЧС и последствий ее возникновения, планирования мероприятий по предупреждению и ликвидации ЧС, обоснования необходимого количества сил и средств для ликвидации ЧС и поддержания в соответствующей степени готовности аварийно-спасательных формирований (далее – АСФ), планирования учений и тренировок АСФ по ликвидации ЧС, обоснования финансовых и материальных ресурсов, осуществления целевых и научно-исследовательских программ, направленных на предупреждение ЧС.

Важно отметить, что в основу методики были положены результаты анализа представительной выборки из генерального массива статистических данных произошедших разрушений РВС на объектах ТЭК России, информация о которых частично представлена в подразделе 1.2 настоящей работы, а более полно – в [37], [74], [100], а также натурного эксперимента по квазимгновенному разрушению РВС-700 м³ с водой на одной из нефтебаз в Липецкой области [37], [100], [104].

При обработке данных в качестве исходных параметров использовались геометрические размеры резервуаров, уровень хранимой жидкости, уклон местности, а в качестве функции отклика – значения и характеристики площадей проливов. При этом установлено, что вид хранимой жидкости, ее физико-химические свойства и температура существенного влияния на величину площади пролива не оказывают, а ее геометрическая форма в большей степени зависит от уклона (i , %) производственной площадки:

– первая группа ($i \leq 1,5$) – площадь разлива жидкости близка к форме круга, центр которого смещен на расстояние $L_{см}$ относительно центра аварийного РВС в сторону направления потока жидкости (рисунок 1.30а);

– вторая группа ($1,5 < i \leq 3$) – площадь разлива жидкости в направлении максимального уклона местности напоминает форму полукруга с примыкающей к нему трапецией (рисунок 1.30б);

– третья группа ($3 < i \leq 7$) – форма площади разлива аналогична форме во второй группе, однако трапеция имеет более вытянутую форму (рисунок 1.30б).

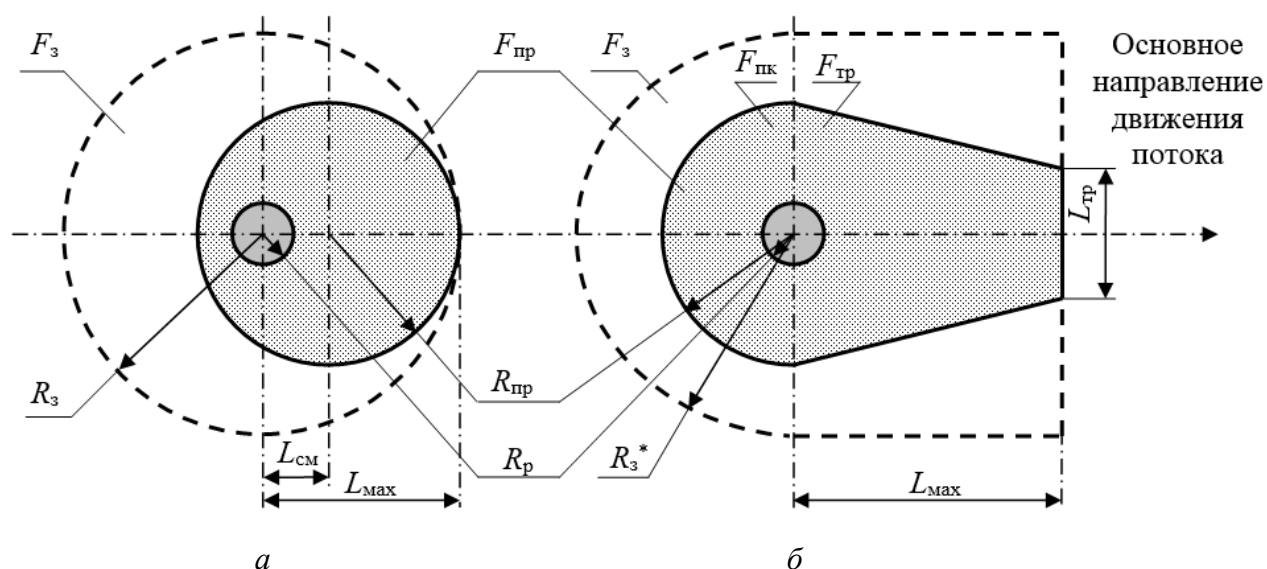


Рисунок 1.30 – Формы площадей проливов жидкостей (сплошная линия) и зон возможного затопления (пунктирная линия) территории с уклоном местности $a - i \leq 1,5$; $b - 1,5 < i \leq 7$:

R_p – радиус РВС, м; $R_{пр}$ – радиус площади пролива жидкости при разрушении РВС, м; $R_з$ – радиус зоны возможного затопления территории жидкостью при разрушении РВС, м; $L_{см}$ – расстояние от центра аварийного РВС до центра окружности, ограничивающей площадь пролива, м; $L_{мах}$ – максимальное расстояние от центра аварийного РВС до границы зеркала пролива жидкости по направлению уклона местности, м; $L_{тр}$ – ширина площади пролива жидкости на территориях с $1,5 \leq i \leq 7$, численно равная $R_{пр}$, м; $F_{пк}$ и $F_{тр}$ – площади полукруга и примыкающей трапеции, соответственно, на территориях с $1,5 \leq i \leq 7$, m^2 ; $F_з$ – площадь зоны возможного затопления территории жидкостью при разрушении РВС, m^2

Под зоной возможного затопления в методике понимается территория объекта и прилегающей к нему местности, участки которой могут быть затоплены жидкостью, находящейся в РВС, при различных направлениях его разрушения. Границей зоны возможного затопления является условная линия, ограничивающая зону затопления, за пределы которой с высокой вероятностью не произойдет пролив жидкости из разрушившегося РВС.

В таблице 1.3 приведены формулы для определения параметров, характеризующих форму площади пролива жидкости и зону возможного затопления территории в зависимости от уклона местности при полном разрушении резервуара с уровнем жидкости, принимаемым равном высоте стенки резервуара.

Таблица 1.3 – Параметры формы и зоны пролива жидкости при разрушении РВС

Уклон, %	Формулы для определения параметров пролива	
$i \leq 1,5$	$F_{\text{пр}} = 5,5V_{\text{ж}}$ $L_{\text{см}} = 3,9R_{\text{р}}$	$R_{\text{пр}} = \sqrt{F_{\text{пр}} / \pi}$ $R_3 = L_{\text{max}} = R_{\text{пр}} + L_{\text{см}}; F_3 = \pi R_3^2$
$1,5 < i \leq 3$	$F_{\text{пр}} = F_{\text{пк}} + F_{\text{тр}} = 7,5V_{\text{ж}}$ $R_{\text{пр}} = L_{\text{тр}} = 6,8R_{\text{р}}$	$F_{\text{пк}} = \pi R_{\text{пр}}^2 / 2; F_{\text{тр}} = F_{\text{пр}} - F_{\text{пк}}$ $L_{\text{max}} = \frac{2F_{\text{тр}}}{3R_{\text{пр}}}; R_3^* = R_3;$ $F_3 = \pi R_3^2 / 2 + 2R_3 L_{\text{max}}$
$3 < i \leq 7$	$F_{\text{пр}} = F_{\text{пк}} + F_{\text{тр}} = 12,5V_{\text{ж}}$ $R_{\text{пр}} = L_{\text{тр}} = 6,3R_{\text{р}}$	

Тогда, для рассматриваемого РВС-20000 (объем жидкости $V_{\text{ж}} \approx 22495,10 \text{ м}^3$) при $i = 2,3 \%$ соответствующие параметры аварийного пролива мазута составят:

$$F_{\text{пр}} = F_{\text{пк}} + F_{\text{тр}} = 7,5V_{\text{ж}} = 7,5 \cdot 22495,10 = 168713,25 \text{ м}^2;$$

$$R_{\text{пр}} = L_{\text{тр}} = 6,8R_{\text{р}} = 6,8 \cdot 19,95 = 135,66 \text{ м};$$

$$F_{\text{пк}} = \pi R_{\text{пр}}^2 / 2 = 3,14 \cdot 135,66^2 / 2 = 28893,71 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{пр}} - F_{\text{пк}} = 168713,25 - 28893,71 = 139819,54 \text{ м}^2;$$

$$L_{\text{max}} = 2F_{\text{тр}} / 3 / R_{\text{пр}} = 2 \cdot 139819,54 / 3 / 135,66 = 687,11 \text{ м};$$

$$L_{\text{см}} = 3,9R_{\text{р}} = 3,9 \cdot 19,95 = 77,81 \text{ м};$$

$$F_{\text{пр}} = 5,5V_{\text{ж}} = 5,5 \cdot 22495,10 = 123723,05 \text{ м}^2;$$

$$R_{\text{пр}} = \sqrt{F_{\text{пр}} / \pi} = \sqrt{123723,05 / 3,14} = 198,50 \text{ м};$$

$$R_3^* = R_3 = R_{\text{пр}} + L_{\text{см}} = 198,50 + 77,81 = 276,31 \text{ м};$$

$$F_3 = \pi R_3^2 / 2 + 2R_3 L_{\text{max}} = 3,14 \cdot 276,31^2 / 2 + 2 \cdot 276,31 \cdot 687,11 = 499575,86 \text{ м}^2.$$

На рисунке 1.31 показаны прогнозируемые границы площади пролива мазута при разрушении РВС-20000 м³ (№ 2) на территории ТЭС «О Мон 1» в сторону р. Хау (сплошная линия, красный фон) и зоны возможного затопления территории мазутом (пунктирная линия).

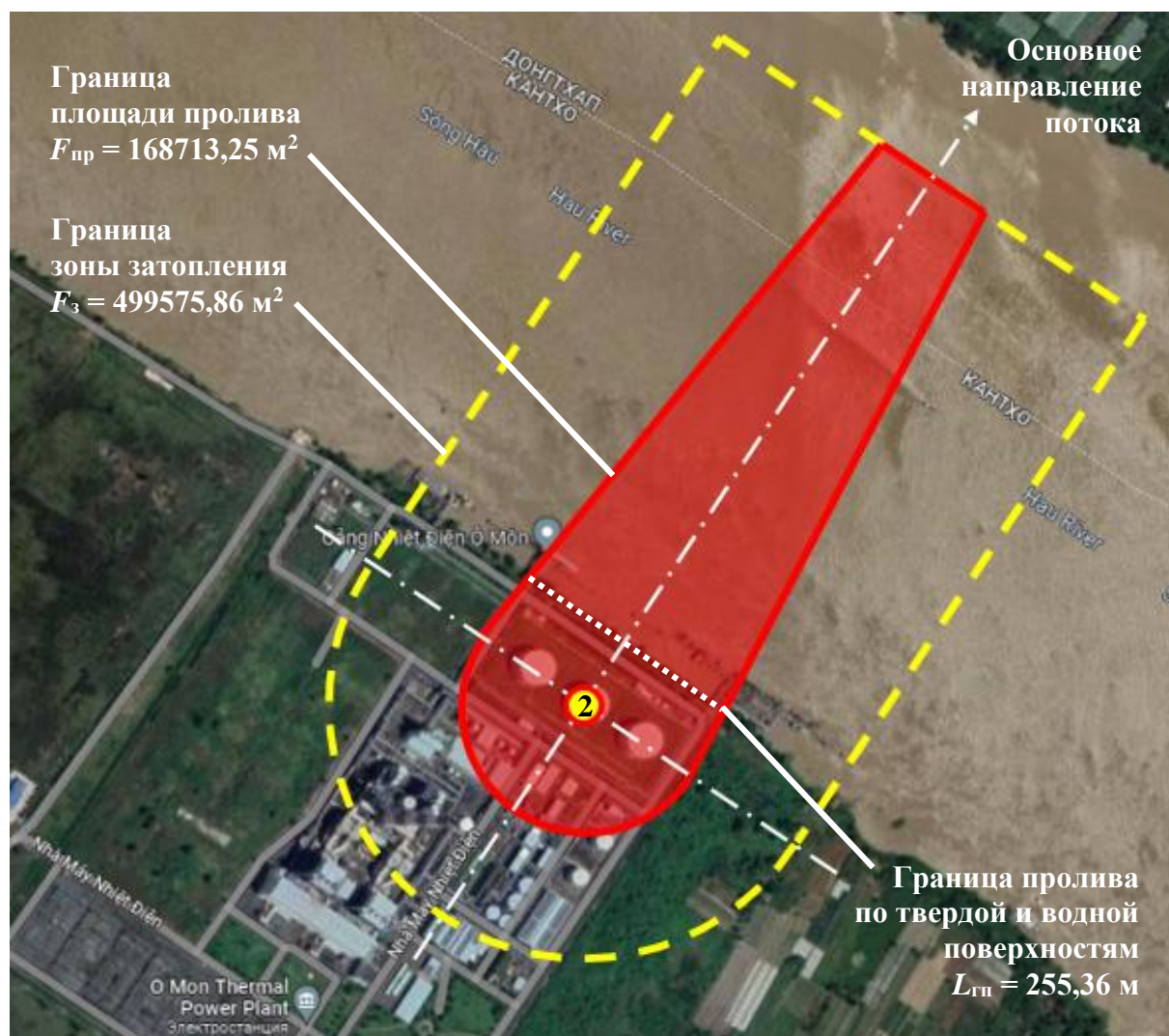


Рисунок 1.31 – Прогнозируемые площадь пролива и зона затопления территории мазутом при разрушении РВС-20000 м³ на ТЭС «О Мон 1»

Следует отметить, что положения рассмотренной методики справедливы для прогнозирования параметров пролива при полном разрушении РВС на твердой поверхности. Однако, при отметке на ситуационном плане объекта в соответствующем масштабе вычисленных параметров можно получить значение расстояния на границе пролива ($L_{гп}$) по твердой и водной поверхностям, необходимого для вычисления окончательной площади пролива по твердой поверхности. В данном случае это расстояние составило около 255,36 м (см. рисунок 1.31). Тогда общая площадь пролива мазута по твердой поверхности составит около 45747,47 м². С учетом толщины слоя мазута ~0,133 м можно сделать вывод о том, что по твердой (земной) поверхности следует ожидать пролива около 6084,41 м³ топлива, соответственно в водоем может попасть до 16410,69 м³ мазута.

Из литературных источников [105], [106] известно, что толщина слоя, разливающегося по водной поверхности мазута составляет от 0,005 до 0,01 м. Таким образом при залповом попадании мазута в р. Хау и принимаемой толщине слоя в 0,01 м можно ожидать в первые часы после аварии РВС разлив на площади до 1,64 км². При этом, в случае непринятия своевременных мер по локализации пролива площадь мазута может быть увеличена в два и более раз с учетом скорости течения р. Хау, которая в этой местности составляет до 3 м/с [107].

Очевидно, что развитие такого сценария в резервуарном парке ТЭС помимо большого экономического ущерба, вызванного потерей резервуарной емкости и топлива, неминуемо приведет к серьезным негативным экологическим последствиям. Кроме этого, разлившейся по течению мазут будет достигать прибрежной зоны соседних с ТЭС производственных объектов, что приведет к их простоям на длительное время. Следует также отметить, что при разрушении любого резервуара в группе в сторону противоположную водоему возможно каскадное развитие аварии вследствие вовлечения в инцидент значительного количества различных сооружений и технологического оборудования ТЭС (см. рисунок 1.31).

Таким образом, разрушение даже одного крупногабаритного РВС с горючей жидкостью способно привести к каскадному развитию аварии или возникновению ЧС и указывает на необходимость применения в резервуарных парках ТЭС способов, направленных на минимизацию возможных негативных последствий разрушений РВС, классификация и анализ которых приведены далее.

1.5 Классификация и анализ способов минимизации негативных последствий разрушений резервуаров с горючей жидкостью

На рисунке 1.32 представлена классификация наиболее широко применяемых способов, направленных на предотвращение возникновения волны прорыва, образующейся при полном разрушении РВС, а также на ее локализацию в пределах

ограждения, в том числе рекомендуемых нормативными документами по пожарной и промышленной безопасности резервуарных парков, действующими как в СРВ, так и в России [37], [48]–[55], [63], [80], [85], [99], [108]–[110].

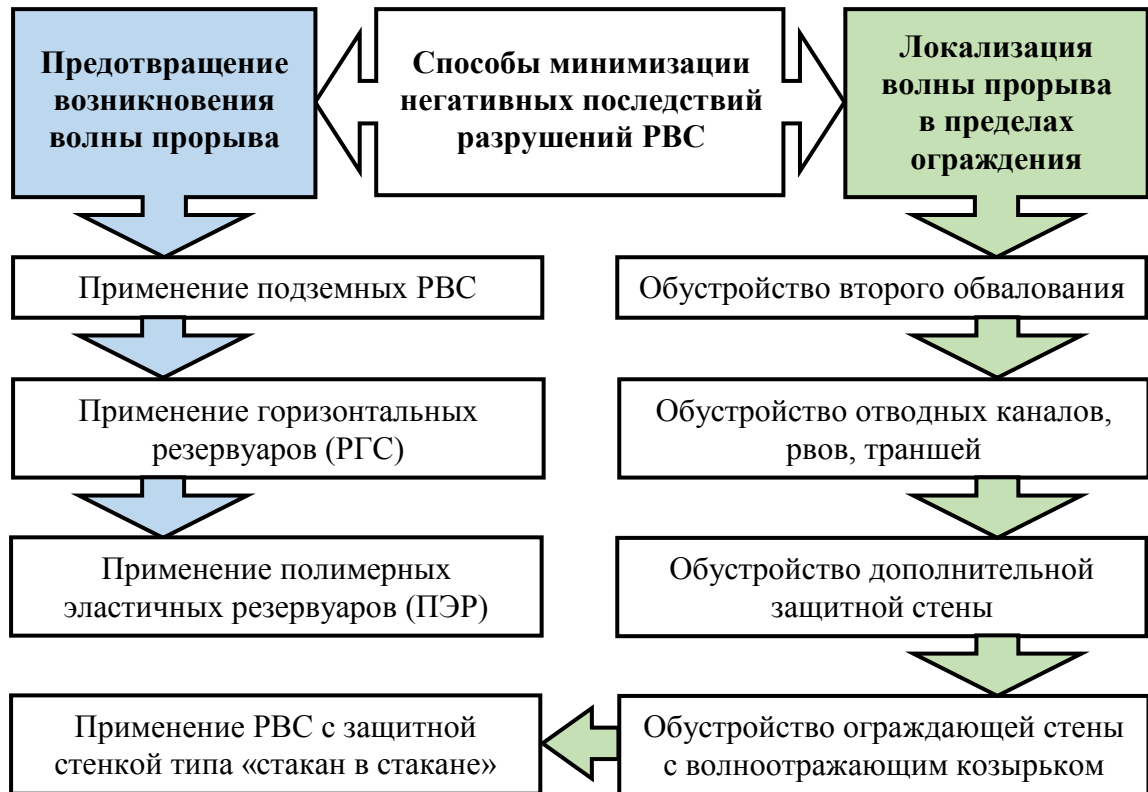


Рисунок 1.32 – Классификация способов минимизации негативных последствий разрушений РВС с горючей жидкостью

Из рисунка 1.32 видно, что рассматриваемые способы могут классифицироваться по признаку предотвращения или локализации волны прорыва, образующейся при полном разрушении РВС. Так, например, с целью устранения непосредственно опасного фактора аварии (волны прорыва) уже на стадии проектирования объекта может рассматриваться вопрос о возможности замены конструкции РВС на подземный или приравненный к нему резервуар. В тоже время подземные резервуары имеют свои недостатки, главным образом, связанные с сохранением герметичности от коррозионного воздействия в период длительной эксплуатации. Кроме этого, сооружение таких типов резервуаров затруднительно вблизи береговой зоны, где наблюдается активность грунтовых вод, питание которых осуществляется, в том числе, за счет фильтрации из водных объектов.

Как отмечалось ранее, резервуарные парки ТЭС в СРВ, в основном, располагаются и проектируются в непосредственной близости к водным объектам (см. таблицы 1.1 и 1.2), вследствие чего применение рассматриваемого способа на практике является весьма проблематичным.

Другим способом может являться замена РВС на горизонтальные стальные резервуары (далее – РГС) или полимерные эластичные резервуары (далее – ПЭР), аварии на которых не приводят к возникновению волны прорыва, поэтому достаточно обустройство нормативного земляного обвалования или ограждающей стены из негорючих материалов, рассчитанных на гидростатическое удержание пролитой жидкости. Однако основным недостатком в этом случае, непосредственно влияющим на экономическую составляющую, будет требование по выделению значительной территории объекта для установки дополнительного оборудования и прокладки трубопроводов. Кроме этого, в случае применения ПЭР осложненным является также обустройство подогрева вязких нефтепродуктов.

Резервуары для хранения топлива на ТЭС в СРВ имеют номинальный объем, как правило от 5000 до 30000 м³, при общей емкости парка как минимум 50000 м³. Очевидно, что замена единичных крупногабаритных РВС на значительное количество РГС или ПЭР экономически нецелесообразна, при этом применение ПЭР для топочного мазута, который исходя из обеспечения технологического процесса должен постоянно находиться в подогретом состоянии, неприемлемо.

В целом, рассматривая тот или иной способ, направленный на предотвращение возникновения волны прорыва, необходимо учитывать, как технологическую возможность его применения, так и экономические затраты.

Относительно применения способов, направленных на локализацию волны прорыва в пределах ограждения, следует еще раз отметить, что нормируемые преграды в виде земляных обвалований, в том числе покрытых железобетонными плитами, или ограждающих стен, выполненных из кирпичной или каменной кладки, а также из железобетонных блоков, не способны локализовать весь объем хранимой в РВС жидкости до аварии, что убедительно подтверждается последствиями разрушений РВС, описания ряда которых были представлены ранее.

Обустройство второго обвалования, в том числе использование приподнятых участков дорог резервуарного парка, как и сооружение отводных каналов или траншей, также является малоэффективным, особенно при разрушении РВС объемом более 5000 м³, что характерно для ТЭС в СРВ. Так, в частности, авария РВС-30000 м³ при проведении гидравлических испытаний на территории мазутного хозяйства «Запорожской» ГРЭС в г. Энергодаре, подробное описание которой представлено ранее (см. рисунок 1.21), показала неспособность даже двойного контура земляного обвалования, усиленного бетонной стяжкой, противостоять размыву и удержать поток воды, который разлился на площади более 0,75 км².

Следует отметить, что для эффективного использования таких способов локализации потока жидкости необходимо, в первую очередь, иметь надежные данные по их геометрическим характеристикам, которые в настоящее время не регламентируются нормативными документами и могут являться предметом дальнейших исследований, а также учитывать необходимость выделения большой площади территории объекта под их сооружение.

К разновидности способов локализации потока жидкости при разрушении РВС посредством обустройства сверхнормативных ограждений следует отнести также сооружение дополнительной защитной стены, метод определения геометрических параметров которой был разработан на кафедре пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России [79], [80] и изложен в ГОСТ Р 53324-2009 [108]. Преграда предназначена для полного удержания части потока жидкости, переливающегося через нормативное земляное обвалование или ограждающую стену отдельно стоящего РВС или группы таких резервуаров, в следующем диапазоне изменения исходных данных:

$$400 \leq V_n \leq 5000; 0,1 \leq a/H_{ж} \leq 0,25; 0,4 \leq L/D_p \leq 1; 0,5 \leq v \leq 5,$$

где V_n – номинальный объем РВС, м³;

a – высота ограждения, м;

$H_{ж}$ – максимальный уровень жидкости в РВС, м;

L – расстояние от стенки РВС до ограждения, м;

D_p – диаметр РВС, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, сСт.

Дополнительная защитная стена представляет собой вертикальную преграду высотой $h_{ст}$, расположенную за нормативным ограждением с одной, двух, трех сторон или по всему периметру ограждения РВС или группы РВС (рисунок 1.33).

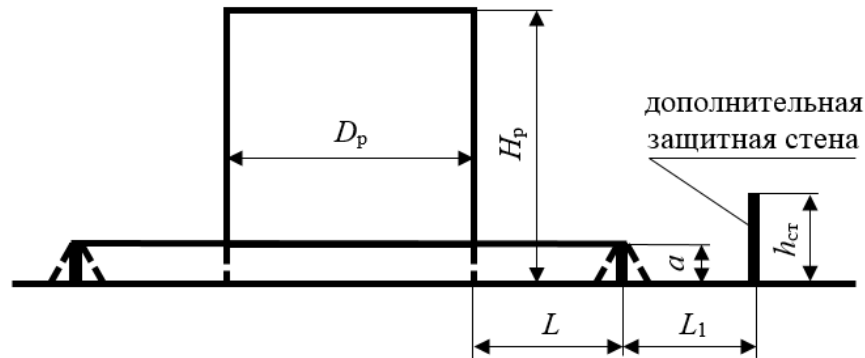


Рисунок 1.33 – Расчетная схема для определения геометрических параметров дополнительной защитной стены (H_p – высота РВС, м)

В зависимости от конструктивного исполнения нормативного ограждения расстояние от него до дополнительной стены (L_1 , м) определяется по формулам:

при земляном обваловании

$$L_1 = D_p[1,516 - 572,34(a/H_{ж})^6 - 0,17(L/D_p)^3]; \quad (1.1)$$

при вертикальной стене

$$L_1 = D_p[-0,259 - 0,562\ln(a/H_{ж}) - 0,543\ln(L/D_p)]. \quad (1.2)$$

Высоту вертикальной стены ($h_{ст}$, м) вычисляют по формуле:

$$h_{ст} = 0,272H_{ж}. \quad (1.3)$$

Таким образом, используя зависимости (1.1)–(1.3), находят оптимальную высоту дополнительной защитной вертикальной стены, необходимую для полного удержания волны прорыва в границах рассматриваемого ограждения.

Однако рассматриваемый способ имеет и существенный недостаток, связанный с ограничением его применимости для РВС номинальным объемом не более 5000 м³. Очевидно, что в резервуарных парках ТЭС в СРВ на ограниченной территории с эксплуатацией, как отмечалось ранее крупногабаритных РВС, использование таких преград также является нецелесообразным.

Принципиально другим способом локализации потока жидкости при разрушении РВС является сооружение взамен земляных обвалований или защитных стен специальных монолитных железобетонных ограждающих стен с волноотражающим козырьком, рассчитанных на гидродинамические нагрузки и способных сохранять устойчивость к воздействию углеводородного режима пожара в течение длительного времени. Конструкция такой преграды была также разработана на кафедре пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России [74], [81], [111], [112], [113] метод определения ее геометрических параметров изложен в ГОСТ Р 53324-2009 [108].

Ограждающая стена с волноотражающим козырьком предназначена для полного удержания волны жидкости при квазимгновенном разрушении наземного вертикального резервуара или группы резервуаров, в следующем диапазоне изменения исходных данных:

$$100 \leq V_n \leq 30000; 3 \leq L \leq 30,$$

где V_n – номинальный объем РВС, м³;

L – расстояние от ограждающей стены до стенки РВС, м.

Высоту ограждающей стены (H_c , м) рассчитывают по формуле:

$$\frac{H_c}{K_3 H_{ж}} = -0,0664 \frac{a_1^2}{\sqrt{a_2}} + 0,0871 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} + 0,0639 \frac{a_1}{a_2}, \quad (1.4)$$

где K_3 – коэффициент запаса, рекомендуемый принимать равным 1,1 для РВС вместимостью не более 5000 м³ и равным 1,2 для РВС большей вместимости;

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

$$a_1 = 15,2(b/H_{ж}) + 0,485; \quad (1.5)$$

$$a_2 = \lg(L_1/R_p), \quad (1.6)$$

где $H_{ж}$ – максимальный уровень жидкости в РВС, м;

R_p – радиус аварийного РВС, м.

Принципиальная схема преграды приведена на рисунке 1.34.

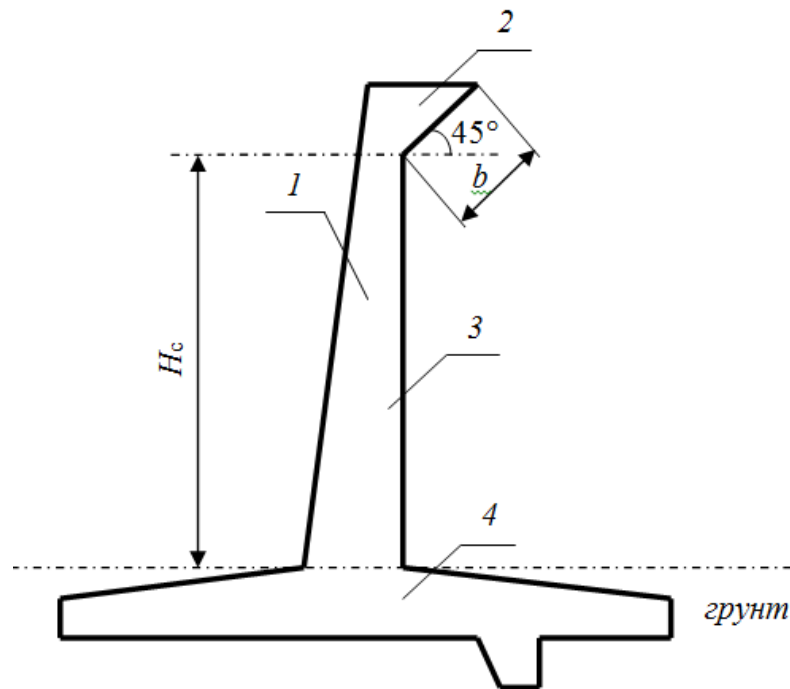


Рисунок 1.34 – Принципиальная схема ограждающей стены с волноотражающим козырьком:

1 – защитная стена; 2 – волноотражающий козырек;
3 – площадка отражения потока; 4 – основание стены

Длину вылета волноотражающего козырька рекомендуется принимать:

- для РВС вместимостью до 700 м^3 – не менее 0,5 м;
- для РВС вместимостью от 700 до 5000 м^3 – не менее 1,0 м;
- для РВС вместимостью от 5000 до 30000 м^3 – не менее 1,5 м.

Таким образом, зависимость (1.4) позволяет на основании эксплуатационных характеристик РВС объемом от 700 до 30000 м³ 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.

Безусловно, применение рассматриваемой преграды в резервуарных парках позволяет полностью удерживать волну прорыва, тем самым не допустить каскадного развития аварии и минимизировать негативные последствия при разрушении РВС. Однако такая конструкция, выполняемая из монолитного железобетона, является достаточно массивным сооружением, при строительстве которого, как правило используется свайный фундамент глубокого заложения (до 10 и более метров). С учетом, как уже отмечалось, близкого расположения РВС на территориях ТЭС в СРВ к водным объектам строительство таких преград весьма проблематично.

По всей видимости, наиболее перспективным может являться рассмотрение способа локализации потока жидкости, основанного на применении резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане» (рисунок 1.35) [48]–[50], [63].

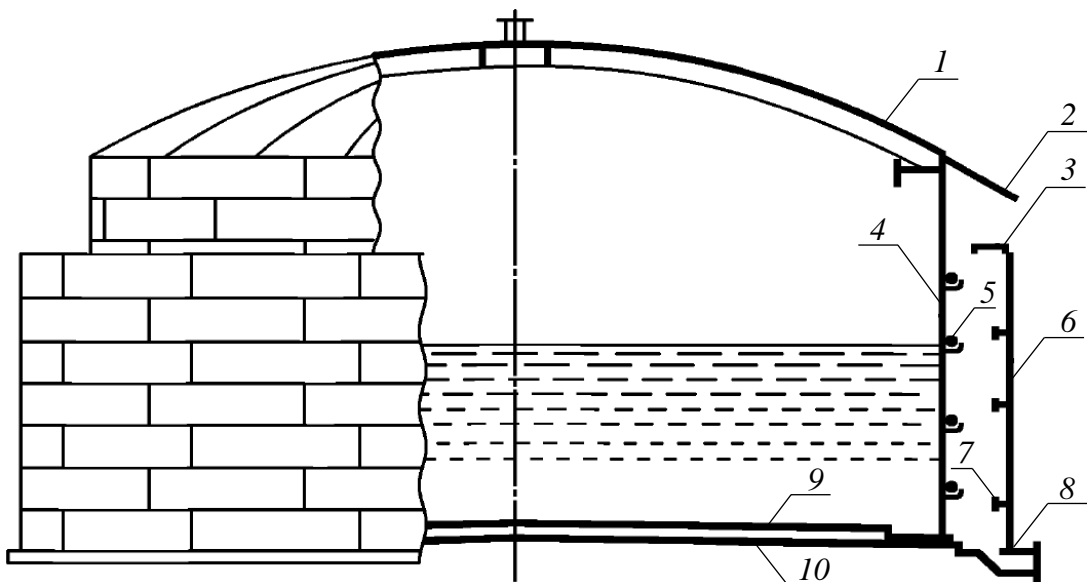


Рисунок 1.35 – Конструктивное решение резервуара с защитной стенкой:
 1 – стационарная крыша; 2 – атмосферозащитный козырек; 3 – ветровое кольцо;
 4 – основная стенка; 5 – аварийные канаты; 6 – защитная стенка; 7 – кольца жесткости; 8 – лотковый зумпф; 9 – основное днище; 10 – защитное днище

При этом, как уже отмечалось во введении, требования действующих как в СРВ, так и в России основных нормативных документов в области обеспечения пожарной безопасности резервуарных парков хранения нефти и нефтепродуктов (TCVN 5684:2003 [51] и СП 155.13130.2014 [52]) не распространяются на проектирование и строительство РВСЗС. В тоже время, отдельные положения действующих в РФ нормативных документов в области обеспечения промышленной безопасности (ГОСТ 31385-2016 [50], СТО-СА-03-002-2009 [48], ИД-2010 [49]) непосредственно посвящены проектированию, изготовлению и монтажу РВСЗС. Следует также отметить, что при разработке указанных нормативов был учтен опыт проектирования и эксплуатации резервуаров на базе зарубежных документов, в том числе API-650 [114], EN 14015 [115] и др.

Так, в ГОСТ 31385-2016 дается следующее определение РВСЗС – конструктивное решение резервуара, включающее в себя внутренний основной резервуар со стационарной или плавающей крышей и наружный защитный резервуар. Непосредственно требования к проектированию РВСЗС в этом документе приводятся в подразделе 6.1.13 «Резервуары с защитной стенкой», где в том числе указывается, что диаметр и высота стенки защитного резервуара должны рассчитываться так, чтобы в случае повреждения внутреннего резервуара и перетекания части продукта в защитный резервуар его уровень был на 1 м ниже верха стенки защитного резервуара, при этом ширина межстенного пространства должна быть не менее 1,8 м. Кроме этого отмечается, что РВСЗС не требуют устройства железобетонного каре для защиты от гидродинамического удара продукта при мгновенном разрушении основного резервуара, а требуют обычной защиты для гидростатического удержания и организованного отвода растекающейся жидкости. Кроме этого, к требованиям рекомендательного характера относятся:

- установка на основной стенке стальных аварийных канатов с целью предупреждения лавинообразного разрушения внутреннего резервуара;
- обустройство на защитной стенке колец жесткости, рассчитанных на гидродинамический удар продукта при аварии основного резервуара;
- перекрытие межстенного пространства атмосферозащитным козырьком.

В СТО-СА-03-002-2009, с учетом дополнений и изменений, изложенных в ИД-2010, приводятся более расширенные требования к РВСЗС, в том числе, касающиеся обустройства систем противопожарной защиты, однако требования к межстенному пространству и высоте защитной стенки полностью дублируются с требованиями ГОСТ 31385-2016. В этой связи важно указать, что в действующих ранее правилах безопасности ПБ 03-381-00 «Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [47], в которых впервые были сформулированы требования к РВСЗС, рассматриваемые нормы также приводились, однако ширина межстенного пространства должна была приниматься не менее 1,5 м, а высота защитной стенки должна была составлять не менее 80 % от высоты стенки основного РВС.

Анализ рассмотренных требований нормативных документов к РВСЗС позволяет сделать следующие выводы:

1) в последующих редакциях нормативных документов значение минимальной ширины межстенного пространства РВСЗС увеличено с 1,5 до 1,8 м. По всей видимости такое решение принято с учетом полученного опыта эксплуатации РВСЗС, в том числе удобства обслуживания и проведения ремонтных работ. В тоже время расстояние в 1,5 м может быть принято в качестве минимального при проведении исследований по оценке необходимой высоты защитной стенки, оборудованной волноотражающим козырьком;

2) в нормативных документах не предъявляются требования к максимальной ширине межстенного пространства РВСЗС. Очевидно, что с увеличением этого расстояния высота защитной стенки должна снижаться. Подтверждением этому являются результаты ранее выполненных на кафедре пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России экспериментальных исследований по изучению влияния потока жидкости при разрушении РВС на ограждения, имеющие различные геометрические параметры [54], [74], [80]. При этом в качестве максимальной ширины может рассматриваться значение в 3 м, что обусловлено, в основном, экономической целесообразностью обустройства защитного резервуара;

3) несмотря на предъявление требований к устойчивости стенки основного резервуара посредством обустройства на ней стальных аварийных канатов, а также к защитной стенке за счет установки колец жесткости, нормами предусматривается необходимость обустройства дополнительных ограждений, рассчитанных на гидростатическое удержание пролитого продукта. То есть требование к высоте защитной стенке в 80 % от стенки основного РВС, по всей видимости, не предполагает полного удержания продукта в границах этого ограждения.

Подтверждение этому предположению также показано в работе [54], где приводятся результаты исследований по оценке доли жидкости, которая может перелиться через защитную стенку в зависимости от ее высоты и межстенного расстояния (см. подраздел 2.1). В частности, установлено, что для полного удержания волны прорыва в границах защитной стенки ее высота должна не менее чем на 10 % превышать максимальный уровень жидкости в основном (внутреннем) резервуаре до аварии. Очевидно, что строительство таких высоких защитных стенок экономически нецелесообразно, при этом могут создаваться условия для образования зон взрывоопасных концентраций даже при нормальной работе резервуара, как в его межстенном пространстве, так и снаружи защитной стенки. Понижение уровня хранимого продукта в основном резервуаре, как способа для снижения высоты защитной стенки, также является нецелесообразным исходя, прежде всего, из экономических соображений. При этом увеличение свободного пространства в основном резервуаре приведет к более частому образованию в нем взрывоопасных концентраций, то есть повысится уровень пожарной опасности резервуара, что является неприемлемым.

В заключении отметим, что конструкции РВСЗС находят все большее применение на практике, особенно при необходимости проектирования резервуарных парков в прибрежной зоне [116]–[119]. При этом важно указать, что информация о разрушениях таких типов резервуаров в литературных источниках не приводится. В тоже время, представляет интерес описание пожара в РВСЗС с понтоном (далее – РВСЗСП) вместимостью 20000 м³, произошедшего в Польше 3 мая 2003 г. на территории Гданьского нефтеперерабатывающего завода (рисунок 1.36) [120], [121].



Рисунок 1.36 – Фрагмент развития пожара в РВСЗСП-20000 м³ с бензином

Резервуар был построен по новой технологии в 1999 г., согласно которой земляное обвалование заменено на защитную стенку и двойное дно с системой контроля герметичности (диаметр основного резервуара – 40 м; высота – 16,5 м; диаметр защитного резервуара – 44,1 м; высота защитной стенки – 13,6 м). В случае возможного разлива хранимой жидкости защитная стенка могла вместить все содержимое основного резервуара и дополнительно 0,45 м огнетушащей пены. Кроме этого, топливные насосы были оборудованы системой контроля температуры перекачиваемой жидкости и системой блокировки при повышении ее температуры более 50 °С. Резервуар также был оборудован стационарной установкой пенного пожаротушения, управление которой могло осуществляться с пульта из помещения пенной насосной, или с поста управления на распределительном щите.

Из описания пожара [120], [121] следует, что в 14 ч 47 мин тремя работниками объекта начал производиться отбор проб бензина во время которого произошел взрыв, приведший к их гибели, с последующим возникновением пожара в резервуаре.

При взрыве установка пожаротушения была повреждена и несмотря на запуск насосов, пена внутрь резервуара не попала, что привело к развитию пожара и созданию условий для его распространения на соседний однотипный резервуар, расположенный в 25 м. Первоначальная попытка потушить пожар была предпринята вскоре после взрыва, но была прекращена из-за слишком низкой мощности и дальности действия имеющегося оборудования. Вместо этого были запущены системы охлаждения на соседних резервуарах в ожидании пополнения сил и техники из соседних районов. При этом производилась откачка бензина из горящего резервуара в другие резервуары парка с целью сохранения продукта.

Кроме этого, с помощью тепловизора производился контроль температуры стенки основного резервуара, которая несмотря на постоянное внешнее охлаждение со временем стала повышаться, создавая угрозу ее разрушения. В связи с этим было принято решение о заполнении межстенного пространства водой. Регистрация температуры стенки резервуара показала, что достигается значительный охлаждающий эффект. Так, температура стенки смоченной водой не превышала 60 °С, а сухой – резко повышалась до 200 °С. Откачка бензина из горящего резервуара была прекращена в 1 ч 5 мин 4 мая, после чего была произведена пенная атака, которая продолжалась до 2 ч 2 мин и закончилась ликвидацией пожара.

Анализируя произошедший пожар можно отметить, что действенной мерой, направленной на недопущение разрушения стенки основного резервуара вследствие ее интенсивного нагрева пламенем горючей жидкости, является заполнение межстенного пространства водой, которая, по всей видимости, может быть рекомендована для внедрения в соответствующие нормативные документы.

Таким образом, для предупреждения каскадного и катастрофического развития пожара в резервуарных парках ТЭС в СРВ актуальными представляются исследования, направленные на нахождение эффективного способа снижения высоты защиты стенки РВСЗС при максимальном уровне заполнения основного резервуара горючей жидкостью. В частности, предлагается рассмотреть возможность обустройства на защитной стенке горизонтального или наклонного волноотражающего козырька, обращенного к стенке основного резервуара.

Эффективность такой конструкции защитного ограждения будет зависеть от геометрических параметров основного резервуара, межстенного расстояния и длины вылета волноотражающего козырька соответствующего вида. Нахождение зависимостей между указанными параметрами и были направлены исследования настоящей работы.

1.6 Цель и задачи исследования

На основе выявленных особенностей размещения резервуарных парков на территориях ТЭС в СРВ, анализа причин и последствий разрушений вертикальных стальных резервуаров с горючими жидкостями в России и за рубежом, прогнозирования каскадного развития аварии на территории ТЭС в СРВ при разрушении типового РВС-20000 м³ с мазутом, классификации и анализа способов минимизации негативных последствий разрушений РВС, отсутствия в СРВ и РФ нормативных документов в области обеспечения пожарной безопасности РВСЗС, а также анализа результатов ранее выполненных исследований по нахождению необходимой высоты защитной стенки РВСЗС, поставлена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Целью диссертационной работы являлась разработка рекомендаций по определению геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком резервуара типа «стакан в стакане» для предупреждения каскадного развития пожара в резервуарных парках ТЭС Вьетнама.

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

- рассмотрение современного состояния ТЭС в СРВ и выявление особенностей их размещения на местности;
- проведение анализа пожарной опасности разрушений РВС с жидкостью, включая прогнозирование каскадного развития аварии на территории ТЭС в СРВ, и обоснование способа минимизации негативных последствий аварий РВС;

- модернизация лабораторного стенда, разработка методики и проведение экспериментов по определению требуемой высоты защитной стенки с обустроенным на ней волноотражающим козырьком горизонтального или наклонного вида;
- получение эмпирических формул для определения высоты защитной стенки в зависимости от геометрических параметров основного РВС, межстенного расстояния и длины вылета волноотражающего козырька соответствующего вида;
- разработка рекомендаций по определению геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком для полной локализации потока жидкости в случае разрушения основного РВС.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ВЫСОТЫ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ С ВОЛНООТРАЖАЮЩИМ КОЗЫРЬКОМ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОСНОВНОГО РЕЗЕРВУАРА

2.1 Обзор результатов исследований геометрических параметров ограждений различной конфигурации

Прежде всего следует отметить, что ограждения с волноотражающим козырьком в виде волноотбойных стен нашли широкое применение в системах берегозащитных сооружений практически во всех странах мира (рисунки 2.1 [122], 2.2 [123]), при этом история их создания может быть отнесена еще к античным временам [123].



Рисунок 2.1 – Волноотбойная стена на пляжной линии в г. Кханьхоа СРВ



Рисунок 2.2 – Общий вид волноотбойной стены на Черноморском побережье РФ

В связи с этим имеется значительное количество научных работ, выполненных как российскими, так и зарубежными учеными, посвященных, в том числе, оптимальной конфигурации такого типа ограждений. Так, например, в работе [124] для уменьшения всплесков массы воды предлагается оборудовать вертикальные берегозащитные сооружения Г-образным козырьком (рисунок 2.3).

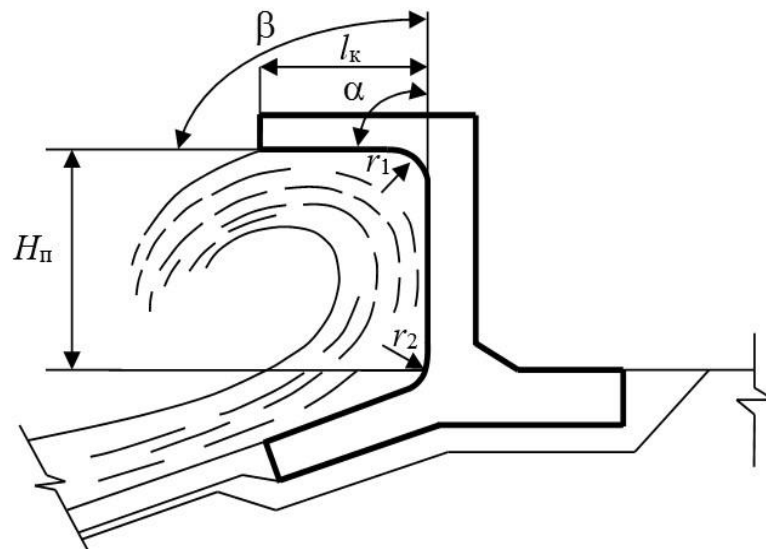


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема к обустройству Г-образного козырька

Лабораторные эксперименты проводились на модельном волновом лотке, имеющим откос с заложением, равным трем, и Г-образный парапет высотой $H_{\text{п}} = 0,1$ м с возвышением подошвы над уровнем воды на $0,105$ м. Сопряжение рабочей поверхности вертикальной стенки с козырьком и наклонным фундаментом выполнено по дуге окружности с радиусами $r_1 = r_2 = 0,25H_{\text{п}}$. По результатам экспериментальных исследований были получены зависимости для определения оптимальных геометрических параметров конструкции и предварительного расчета ее высоты (рисунок 2.4).

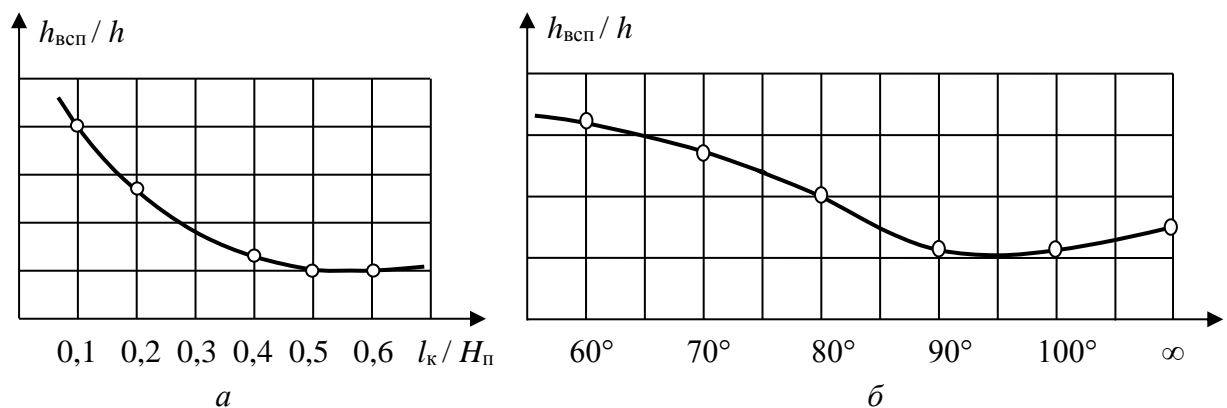


Рисунок 2.4 – Графики для определения высоты парапета в зависимости от длины вылета козырька (*a*) и угла его откоса (*б*)

В работе [125] исследовался волноотражающий козырек, напорная поверхность которого была очерчена по дуге логарифмической спирали. Предполагалось, что такая конструкция обеспечит более плавное отражение набегающих волн, сохраняя функции парапета. При этом целью работы являлось уточнение параметров отраженного потока жидкости, а также получение данных для расчета устойчивости и прочности конструкции козырька.

Лабораторные эксперименты также проводились в волновом лотке длиной 100 м, шириной 4 м, высотой 7,5 м, где для создания периодических волн использовался пневматический волнопродуктор. Конструктивно волноотражающий козырек был изготовлен из листовой стали, толщиной 6 мм, с четырьмя ребрами жесткости, толщиной 10 мм, и имел высоту 950 мм, при этом кривизна козырька была близка к логарифмической спирали (рисунок 2.5).

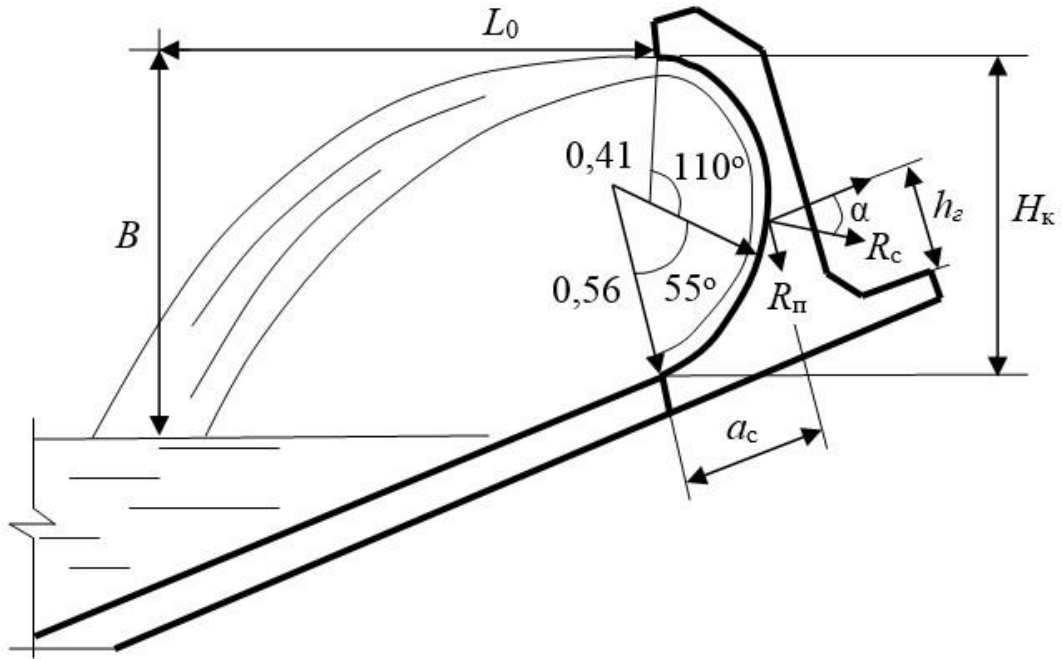


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема козырька логарифмической формы

Следует отметить, что при проведении опытов геометрические размеры конструкции не изменялись. По результатам обработки опытов определена оптимальная высота козырька над уровнем спокойной воды ($1,47H_k$), а также разработаны номограммы для определения силового воздействия волны на козырек при его оптимальной высоте.

В резервуарных парках к одним из первых исследований, направленных на изучение возможности локализации ограждениями с козырьком переливающегося при вскипании или выбросе нефти (мазута) из горящего резервуара, по всей видимости, по аналогии с берегозащитными сооружениями, следует отнести эксперименты, выполненные специалистами компании «Стандарт Ойл оф Калифорния» еще в начале XX-го века [126]. Проблема, побудившая выполнить такие исследования заключалась в том, что часть резервуарных парков в то время не были оборудованы какими-либо ограждениями, а обустроенные земляные обвалования, как показала практика, не способны ограничить распространение пожара при возникновении указанных явлений, что приводило к гибели людей и большому материальному ущербу.

В результате проведенных многочисленных экспериментов по выбросу нефти из резервуаров и испытаниям 66 ограждений различной конфигурации было установлено, что наиболее эффективными конструкциями по удержанию волны вскипания являются вертикальные стенки, оборудованные козырьками шириной 0,2 м, устройство между резервуаром и ограждением промежуточных валов и рвов, а также пересеченный рельеф местности между резервуаром и ограждением. В частности, указывается, что вертикальная стенка высотой 1,5 м с козырьком по своему защитному действию эквивалента защитному действию гладкой стенке высотой 2,9 м.

Также эффективно обустройство козырьков из оцинкованного железа на земляных валах. Если вал высотой 1,5 м усилить стенкой с козырьком высотой 0,9–1,2 м, то он становится эквивалентным по своей защитной способности гладкому валу без козырька высотой в 4,5 м. Еще большая эффективность по сравнению с сооружением стенок с козырьком достигается при обустройстве вспомогательного вала на расстоянии около 9 м от резервуара, так как о такой вал разбивается энергия волны вскипания. Такой же эффект достигается, если вместо вала обустроить ров глубиной 0,6–0,9 м с небольшим валом в сторону от резервуара и со стенками наибольшей крутизны. Столь же эффективно и действие вспаханной между резервуаром и ограждением почвы. При этом, отмечается, что для защиты соседних резервуаров от волны вскипания расстояние между ограждением и резервуаром должно составлять не менее диаметра резервуара, то есть расстояние резервуаров между собой должно быть не менее двух диаметров.

Однако, принимая во внимание малую вероятность появления рассматриваемых событий на правильно сконструированных резервуарах и значительную стоимость предлагаемых ограждений, вопрос о целесообразности их применения дважды рассматривался на специальной комиссии Американского нефтяного института. В результате обсуждения постановили, что для надземных резервуаров с мазутом обустройство таких ограждений нецелесообразно, а резервуары для хранения нефти должны иметь ограждение стенкой или валом, или иным методом, причем ограждение должно удовлетворять следующим требованиям:

- емкость его должна быть равна емкости резервуара, если не предусмотрен отвод жидкости в какое-либо другое углубление;
- ограждение должно быть расположено на расстоянии не менее диаметра резервуара и во всяком случае не ближе 15 м от стенки резервуара;
- ограждение должно быть снабжено козырьком, обращенным в сторону движения выброса.

Это постановление комиссии было принято конференцией Американского нефтяного института и рекомендовано Национальной противопожарной ассоциации для включения в правила противопожарной охраны.

Следует отметить, что на территории Российской Федерации впервые подобное ограждение в виде вертикальной волноотбойной стенки с козырьком было реализовано в старом резервуарном парке Туапсинской нефтебазы. При этом ограждение было небольшой высоты, спроектированное исходя из опыта аварий малогабаритных резервуаров [36].

В дальнейшем, в связи с участвовавшими случаями разрушений резервуаров в 1960–1980 гг. (см. разделы 1.2, 1.3), последствия которых носили катастрофический характер и приводили к большим материальному и экологическому ущербам, а также введение в действие нормативных документов по предотвращению техногенных аварий и катастроф, в частности «Директива Севезо» и позднее «Директива Севезо-II» [18], [23], стимулировали исследования и разработки, в том числе по проблеме удержания потока жидкости, образующегося в случае полного разрушения РВС, ограждениями различного конструктивного исполнения.

Так, например, в конце 1970-х годов было выполнено экспериментально-теоретическое исследование по определению доли жидкости, перелившейся через защитную преграду при разрушении резервуара [127]. Рассматривалась плоская одномерная задача: между двумя створами ($x = -r; 0$) имелся канал, заполненный жидкостью с постоянной глубиной (H_p). На расстоянии $x_0 = L$ располагалась вертикальная стенка определенной высоты (a). В начальный момент времени ($t = 0$) створ канала с координатой $x = 0$ разрушался и жидкость двигалась в направлении вертикальной стенки (рисунок 2.6).

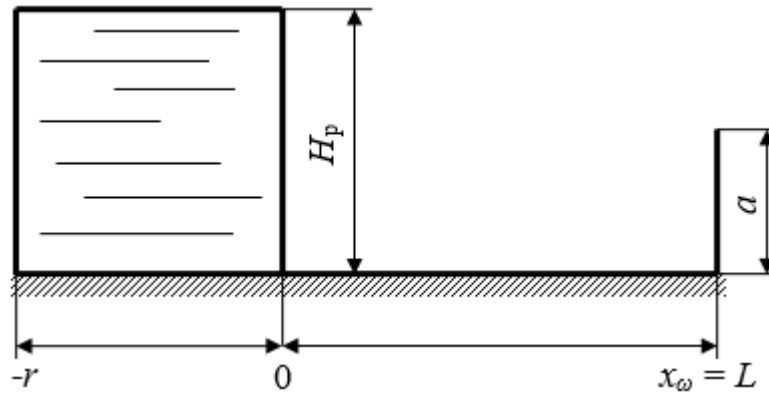


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема резервуара и ограждения

Решение задачи выполнялось с помощью использования положений теории «мелкой воды», успешно применяемой при решении задач о разрушении плотин, нелинейные уравнения в которой, по сути, являются выражением законов сохранения массы и импульса:

$$\begin{cases} 2\left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x}\right) + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + 2c \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (2.1)$$

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 приняты следующие допущения: рассматривалась одномерная задача; движение жидкости происходит в канале прямоугольного сечения; время разрушения резервуара много меньше характерного времени движения потока до ограждения; жидкость является невязкой; трением жидкости о плоскую подстилающую поверхность пренебрегали; уклон канала принят постоянным и равен нулю.

В конечном виде долю жидкости (Q , %), перелившуюся через обвалование, определяли по формуле:

$$Q = \frac{H_p}{r} \int_0^T u_{\omega}(t) c_{\omega}^2(t) dt, \quad (2.2)$$

где u_{ω} – осредненная скорость потока;

c_{ω} – местная скорость звука в точке x_{ω} ;

t – время.

Экспериментальная проверка расчетных значений проводилась на лабораторном стенде, где емкость имела форму куба с размером грани 22,86 см, при этом разрушение резервуара имитировалось быстрым поднятием вверх одной из стенок куба, а движение жидкости происходило в канале прямоугольного сечения. Результаты численных расчетов и экспериментов приведены на рисунке 2.7.

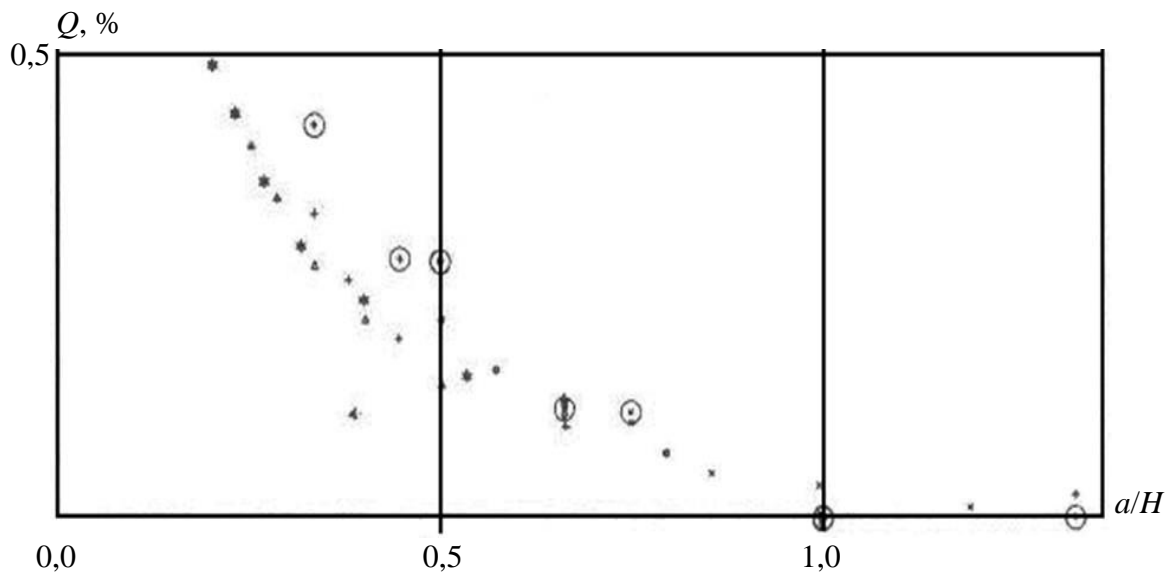


Рисунок 2.7 – Влияние высоты стенки на объем перелившейся жидкости: экспериментальные данные при $L/r = 1/3 - \times$; 1 – O; 2 – +; 3 – Δ ; 4 – *; численные значения – •

По результатам анализа полученных данных сделан, в том числе, вывод о том, что на объем перелившейся через стенку жидкости основное влияние оказывает отношение a/H . Соответствующие численные решения также показали слабую зависимость от отношения L/R .

Относительно выполненных исследований необходимо отметить, что экспериментов с ограждениями, оборудованными козырьками, не проводилось, а лабораторная установка не обеспечивала условие геометрического подобия исследуемых объектов. Так, принятая кубическая форма емкости в экспериментах не соответствует цилиндрической форме натуральных резервуаров. Кроме этого, течение жидкости, возникающее при подъеме одной из граней куба, не совсем соответствует образованию и течению потока при разрушении натурального резервуара, а скорее аналогично истечению жидкости из-под щита, при этом не учитывалось характерное распластывание потока.

Позднее, решение этой же задачи выполнено в работе [128]. При этом математическая модель, позволяющая оценить долю жидкости, перелившейся через обвалование при разрушении резервуара, содержала следующие допущения:

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

Система уравнений, описывающих движение жидкости, имела вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h - h_G)u] = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} + gh \right) = 0, \end{cases} \quad (2.3)$$

- 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:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad u|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=b} = 0; \quad u|_{x=b} = \begin{cases} g^{1/2} (h-a)^{3/2} / h, & \text{если } h > a; \\ 0, & \text{если } h \leq a, \end{cases} \quad (2.4)$$

где a – высота обвалования.

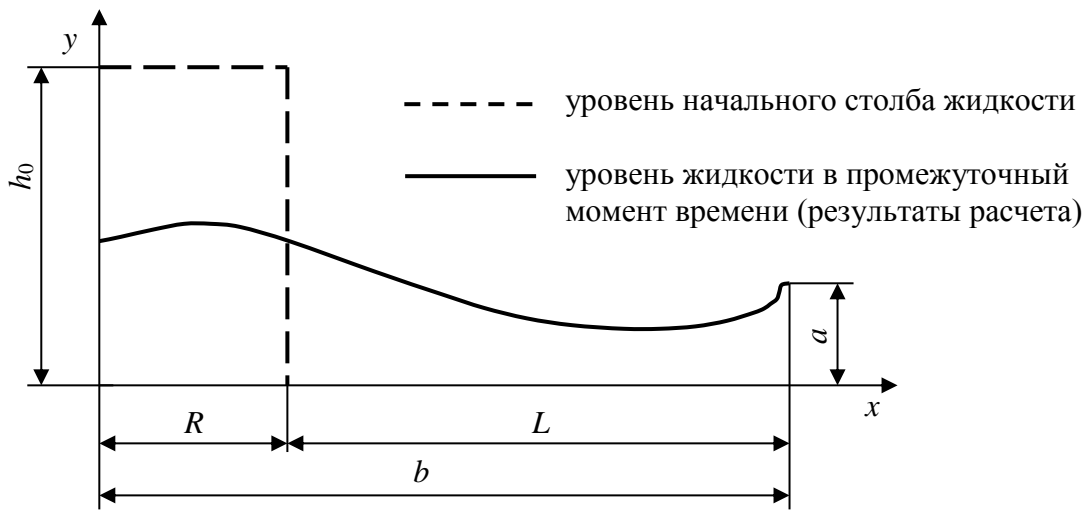


Рисунок 2.8 – Типичная картина движения жидкости в обваловании при разрушении резервуара

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

$$Q = 100 \frac{\int_0^T u_N (h_N - a) dt}{h_0 R}, \quad (2.5)$$

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 (2.3) с граничными условиями (2.4) было найдено с использованием схемы Мак-Кормака, представляющей собой частный случай явной схемы типа «предиктор – корректор». На рисунке 2.9 представлен график указанной функции, а также для сравнения аналогичный график, полученный в результате ранее выполненных экспериментальных исследований, рассмотренных выше [127].

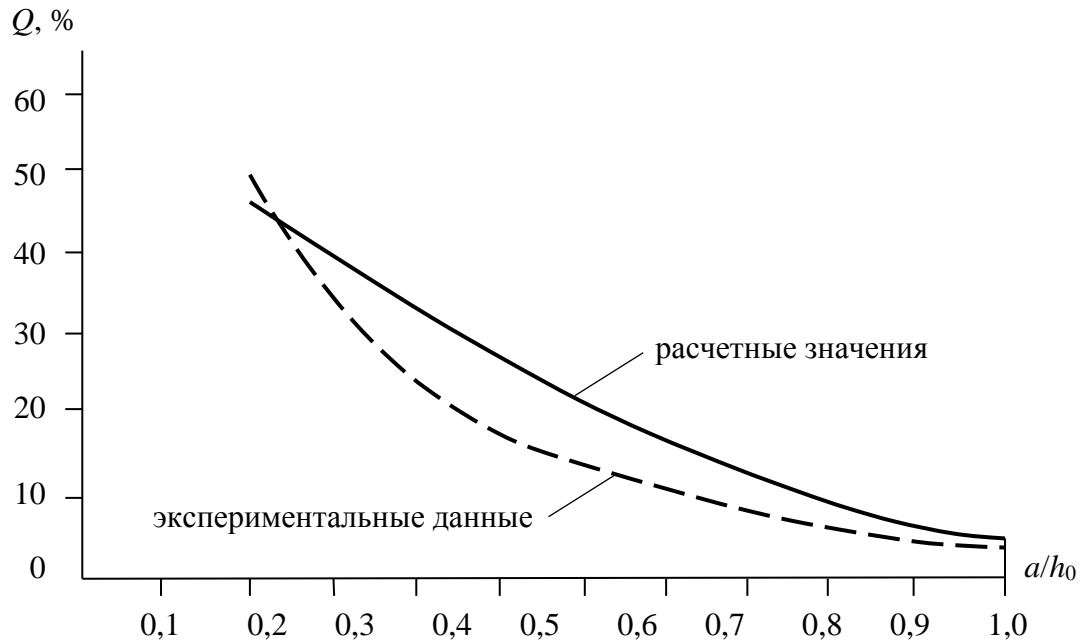


Рисунок 2.9 – Зависимость доли перелившейся через обвалование жидкости (Q) от параметра a/h_0

Необходимо отметить, что представленные на рисунке 2.9 зависимости нашли отражение в ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» [129], а также в «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [130], и рекомендуются к использованию, в частности, при оценке пожарных рисков на объектах хранения нефти и нефтепродуктов в РВС.

Анализируя зависимости на рисунке 2.9 можно видеть, что для определения доли перелившейся через ограждение жидкости не используется такой важный параметр как расстояние от стенки резервуара до ограждения, который, по всей видимости, будет оказывать влияние на искомую величину.

Важно также рассмотреть результаты работы [131], предшествующей выполнению комплексных исследований на кафедре ПБТП Академии ГПС МЧС России, направленных на обеспечение пожарной безопасности нефтебаз, расположенных в границах населенных пунктов, в том числе, связанных с ограничением разлива нефти или нефтепродукта при возможном полном разрушении РВС.

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:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) = 0; \quad (2.6)$$

$$h(x, 0) = \begin{cases} H_{ж} & \text{при } 0 \leq x \leq R_p \\ 0 & \text{при } R_p < x \leq L \end{cases}; \quad (2.7)$$

$$u(x, 0) = 0, \quad u(0, t) = u(L, t) = 0. \quad (2.8)$$

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 [132], [133], в результате чего получены следующие значения (рисунок 2.10).

На рисунке 2.10 видны основные стадии процесса: распространение волны в направлении стенки с понижением уровня жидкости в резервуаре; воздействие волны на стенку и резкий подъем жидкости вверх; образование отраженной от стенки волны, стремящейся к центру резервуара, где в это время образовался провал.

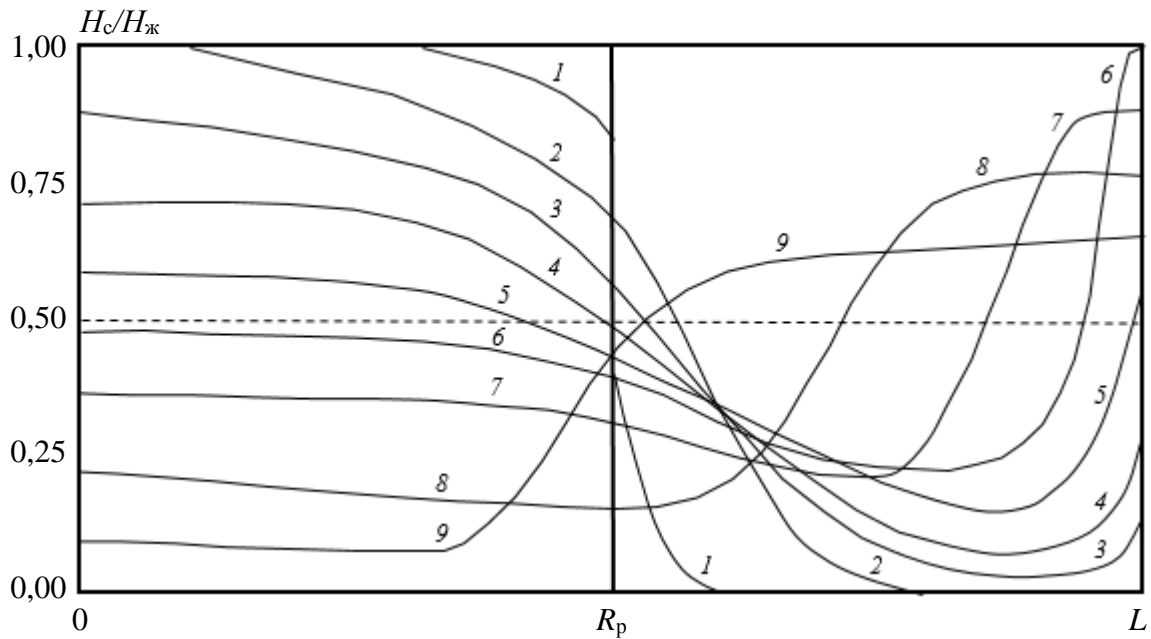


Рисунок 2.10 – Типичные кривые, определяющие профиль потока жидкости в последовательные моменты времени с шагом 0,5 с и взаимодействие его с преградой при разрушении РВС ($R_p = 10$ м; $H_{ж} = 10$ м; $L = 20$ м)

Максимальная высота подъема жидкости на стенке составляла в этом случае 5,3 м. Именно при такой высоте стенке, должен исключаться перелив через нее жидкости. На рисунке 2.11 представлены зависимости безразмерного параметра $H_c/H_{ж}$, определяющего высоту стены, от безразмерного параметра L/R_p , определяющего положение стены по отношению к резервуару, при гидродинамическом и гидростатическом истечении жидкости из резервуара.

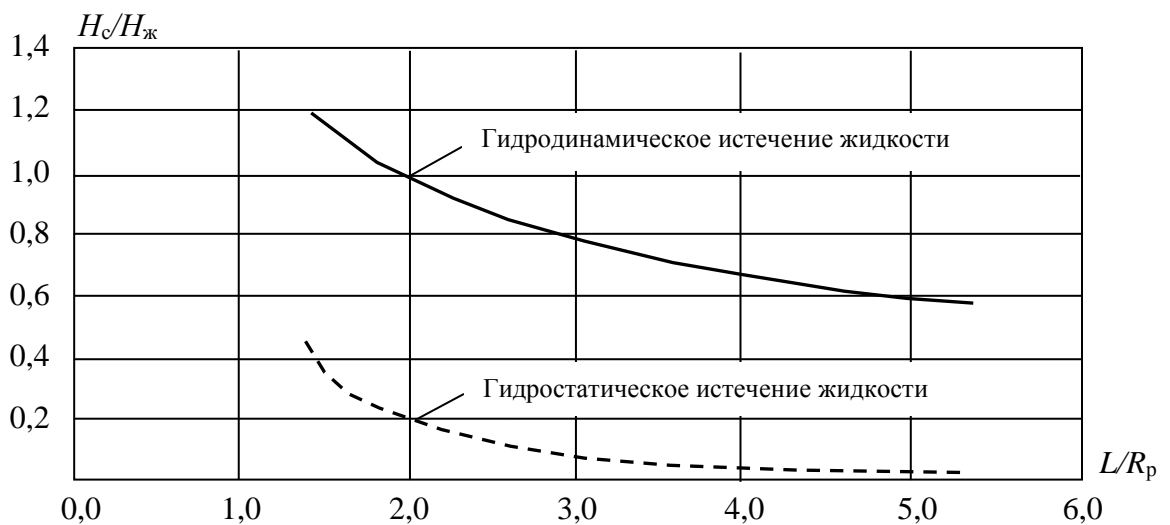


Рисунок 2.11 – Зависимость высоты стены от расстояния до места ее расположения от резервуара

В результате выполненных расчетов показано, что высота защитных стен 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 строительства таких стен, поэтому дальнейшие исследования были направлены на снижение их высоты, в частности за счет обустройства волноотражающего козырька.

Экспериментальная проверка обоснованности разработанной математической модели (см. уравнения 2.6) и полноты учета в ней основных факторов, определяющих характер изучаемого процесса, была произведена на лабораторном стенде, принципиальная схема которого показана на рисунке 2.12 [74].

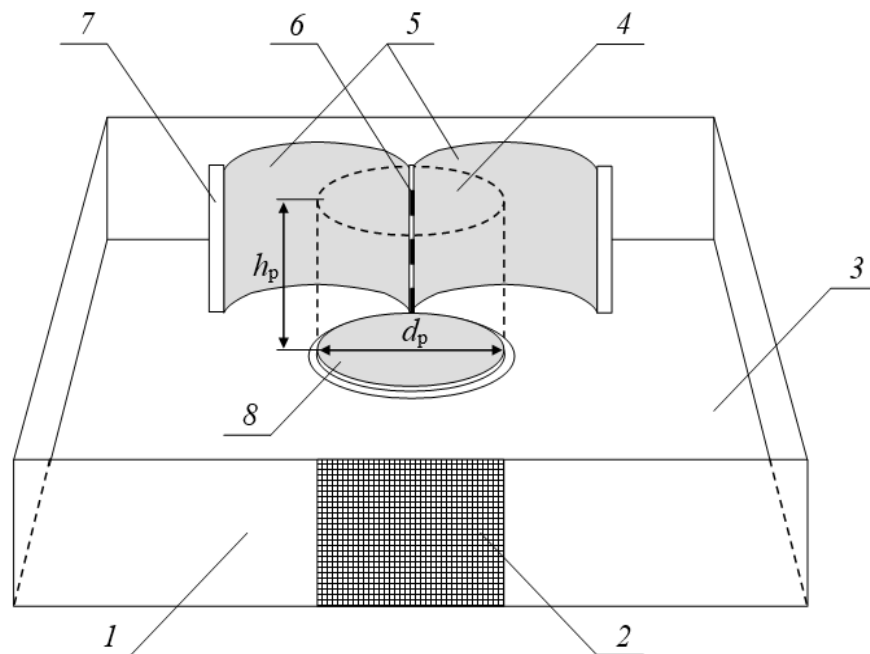


Рисунок 2.12 – Принципиальная схема лабораторного стенда

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. Стенки резервуара 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 м³ (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.

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. Резервуар устанавливали на заданном расстоянии от стены и заполняли жидкостью до определенного уровня. Имитировали разрушение резервуара. Процесс воздействия волны на стену фиксировали видеокамерой, а высоту ее подъема – с помощью координатной сетки. Если жидкость перехлестывала через стену, то высоту стены увеличивали и эксперимент повторяли. Таким образом находили минимальную высоту стены, при которой полностью обеспечивалось удержание волны.

На рисунке 2.13 представлены графики зависимостей высот экспериментальной и теоретической вертикальных преград, необходимых для полного удержания потока при разрушении резервуара, при этом относительное расхождение одноименных величин не превышало 20 %.

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 2.14).

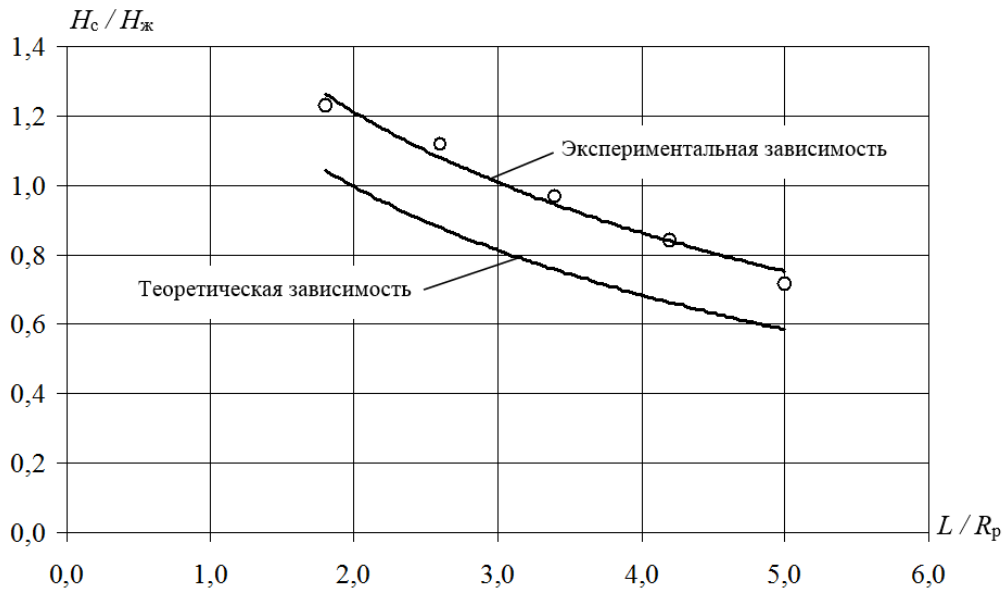


Рисунок 2.13 – График сравнения экспериментальных и теоретических данных

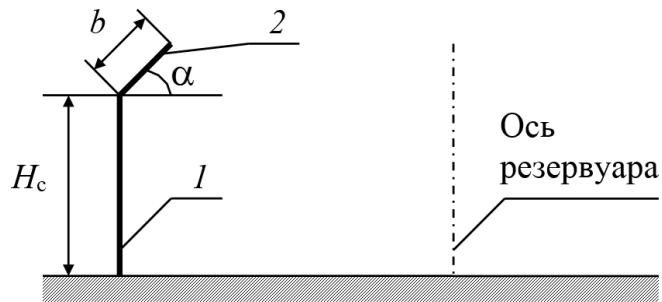


Рисунок 2.14 – Принципиальная схема защитной стены (1) с волноотражающим козырьком (2)

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 $0,02 \text{ м} \leq b \leq 0,04 \text{ м}$. При этом установлено, что наиболее эффективным с точки зрения отражения волны является угол наклона козырька в 45° .

В результате обработки экспериментальных данных была найдена зависимость для определения высоты защитной стены от длины волноотражающего козырька и угла его наклона (см. формулу (1.4) и рисунок (1.34)).

Необходимо отметить, что результаты работ [74], [131] использовались при разработке «Рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтепродуктообеспечения, расположенных на селитебной территории» [111], ГОСТ Р 53324-2009 [108], а также при проектировании и строительстве защитных преград на ряде производственных объектов (рисунки 2.15, 2.16 [113]).



Рисунок 2.15 – Общий вид ограждающей стены с волноотражающим козырьком в резервуарном парке мазутного хозяйства ТЭЦ-11 (г. Москва)



Рисунок 2.16 – Общий вид ограждающей стены с волноотражающим козырьком в резервуарном парке «Шесхарис» (г. Новороссийск)

Представляют практический интерес также результаты исследований [79], [80], посвященных разработке дополнительных защитных преград для снижения опасности разлива нефтепродуктов при разрушениях РВС, обустраиваемых за пределами нормативных ограждений. Для определения геометрических параметров дополнительных защитных преград использовалась модель РВС-2000 м³ в масштабе 1:30 (см. рисунок 2.12).

В качестве дополнительных преград рассматривались рвы различной конфигурации и вертикальные стены (рисунок 2.17), при этом первоначально эксперименты серий А и В, проводились без установки вертикальной стенки на противоположном откосе рва.

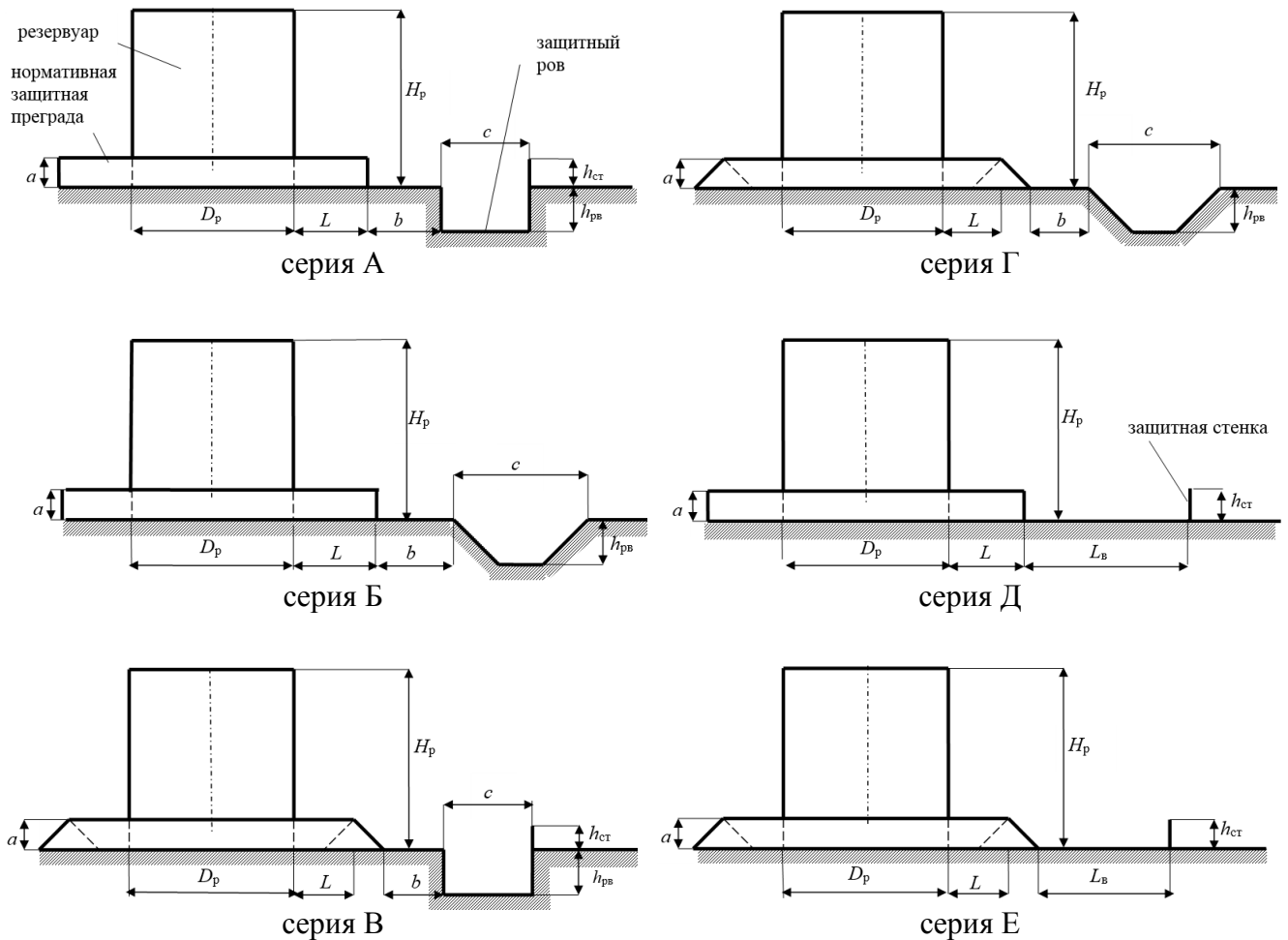


Рисунок 2.17 – Схемы проведения экспериментов по удержанию потока жидкости при разрушении резервуара ограждениями различной конфигурации:

D_p – диаметр резервуара; H_p – уровень жидкости в резервуаре; L – расстояние от резервуара до обвалования; a – высота обвалования; b – расстояние от обвалования до переднего откоса рва; c – ширина рва; $h_{рв}$ – глубина рва; $h_{ст}$ – высота вторичной защитной стены; L_B – максимальное расстояние, на которое обрушится волна

В ходе экспериментов определяли: степень перелива жидкости через ограждение; максимальное расстояние, на которое обрушится волна после взаимодействия с нормативным ограждением; геометрические параметры дополнительной преграды для полного удержания потока жидкости, перелившегося через нормативное ограждение.

Установлено, что степень перелива существенно зависит от вида ограждения и его высоты, при этом слабо зависит от расстояния, на котором оно установлено от резервуара. Применение рвов трапецеидального сечения (см. рисунок 2.17 серии Б и Г) в зоне действия волны является неэффективным мероприятием. В качестве дополнительных защитных преград предлагается использовать рвы трапецеидального сечения с вертикальным откосом ($h_{ст} = 0$), вертикальные стены ($h_{рв} = 0$), а также их комбинацию (рисунок 2.18).

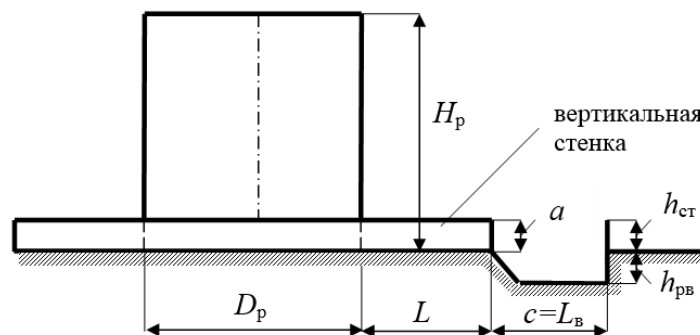


Рисунок 2.18 – Принципиальная схема к определению геометрических параметров дополнительных защитных преград

Как отмечалось ранее (см. рисунок 1.33), результаты работ [79], [80] также использовались при разработке метода определения геометрических параметров дополнительной защитной стены, рекомендуемого ГОСТ Р 53324-2009 [108] для полного удержания потока жидкости, переливающегося через нормативное ограждение отдельно стоящего РВС или группы таких резервуаров.

Непосредственно исследованиям необходимой высоты защитной стенки РВСЗС посвящены работы [53], [54], [77], [78]. Исходя из невозможности проведения натурных экспериментов, прежде всего по экономическим соображениям, авторами был выбран лабораторно-экспериментальный метод нахождения высоты защитной стенки, установленной на различных расстояниях от основного резервуара и необходимой для полного удержания продукта в случае его разрушения.

Для возможности разработки лабораторного стенда, проведения экспериментов и переноса результатов на натурные объекты, прежде всего были выбраны и обоснованы соответствующие критерии подобия и условия моделирования гидравлических явлений [134]–[142], а именно, необходимость соблюдения:

– тождественности критерия Фруда

$$\text{Fr} = \frac{u_{\text{м}}^2}{g_{\text{м}} h_{\text{м}}} = \frac{u_{\text{н}}^2}{g_{\text{н}} h_{\text{н}}}, \quad (2.9)$$

где $u_{\text{м}}$, $u_{\text{н}}$ – характерная местная скорость или скорость фронта потока, м/с (здесь и далее: индексы «н» и «м» относятся соответственно к натуре и модели);

$h_{\text{м}}$, $h_{\text{н}}$ – характерная высота (ширина) потока жидкости, м;

$g_{\text{м}}$, $g_{\text{н}}$ – ускорение свободного падения, м/с²;

– тождественности критерия Струхалия

$$\text{Sh} = \frac{u_{\text{м}} t_{\text{м}}}{h_{\text{м}}} = \frac{u_{\text{н}} t_{\text{н}}}{h_{\text{н}}}, \quad (2.10)$$

где $t_{\text{н}}$, $t_{\text{м}}$ – характерное время процесса, с;

– условий турбулентности потока в натуре и на модели, то есть $\text{Re}_{\text{м}} > \text{Re}_{\text{кр}}$ (здесь $\text{Re}_{\text{м}}$ – критерий Рейнольдса в модели; $\text{Re}_{\text{кр}}$ – критическое значение критерия Рейнольдса, не менее 10^4 [134]):

$$\text{Re}_{\text{м}} = \frac{u_{\text{м}} h_{\text{м}}}{\nu_{\text{м}}}, \quad (2.11)$$

где $\nu_{\text{м}}$ – кинематическая вязкость жидкости (в данном случае для воды при 20 °С – $1,01 \cdot 10^{-6}$ м²/с [143]);

– минимального масштаба модели

$$\lambda_{\text{мин}} = (30 \div 50) \sqrt[3]{u_{\text{н}}^2 h_{\text{н}}^2}; \quad (2.12)$$

– волнового подобия, то есть обеспечения скорости потока на модели более 0,23 м/с.

Для нахождения параметров потока в натуре и получения соответствующих критериев подобия использовались видеоматериалы эксперимента по разрушению РВС-700 м³ с водой (рисунок 2.19) [37], [104], который в дальнейшем был выбран за основу создания модельного резервуара и лабораторного стенда.



№ кадра 226: $l_H = 6$ м; $t_H = 0,533$ с



№ кадра 258: $l_H = 14,5$ м; $t_H = 1,6$ с



№ кадра 246: $l_H = 12$ м; $t_H = 1,2$ с



№ кадра 270: $l_H = 16$ м; $t_H = 2$ с

Рисунок 2.19 – Кадры видеосъемки разрушения РВС-700 м³ с водой (l_H – характерное расстояние от стенки резервуара, пройденное потоком за определенное время t_H)

Кроме этого, для возможности проведения исследований по нахождению высоты защитных стенок для резервуаров большего объема, было выполнено численное моделирование процесса разрушения РВС-30000 м³ с водой (внутренний диаметр $D_{вн} = 45,6$ м; высота стенки $H_{ст} = 18$ м; степень заполнения $\varepsilon = 0,95$; уровень жидкости $H_0 = 17,1$ м) в программном комплексе *LSDYNA* (рисунок 2.20) [37], [54].

Для возможности проведения сравнительного анализа параметров потока и проведения запланированных исследований был разработан лабораторный стенд, принципиальная схема которого приведена на рисунке 2.21.

Вследствие того, что в настоящей работе также использовался лабораторно-экспериментальный метод исследования с использованием указанного стенда модернизированного под поставленные задачи, далее приводится подробное описание его конструктивных особенностей и общего подхода к выполнению опытов.

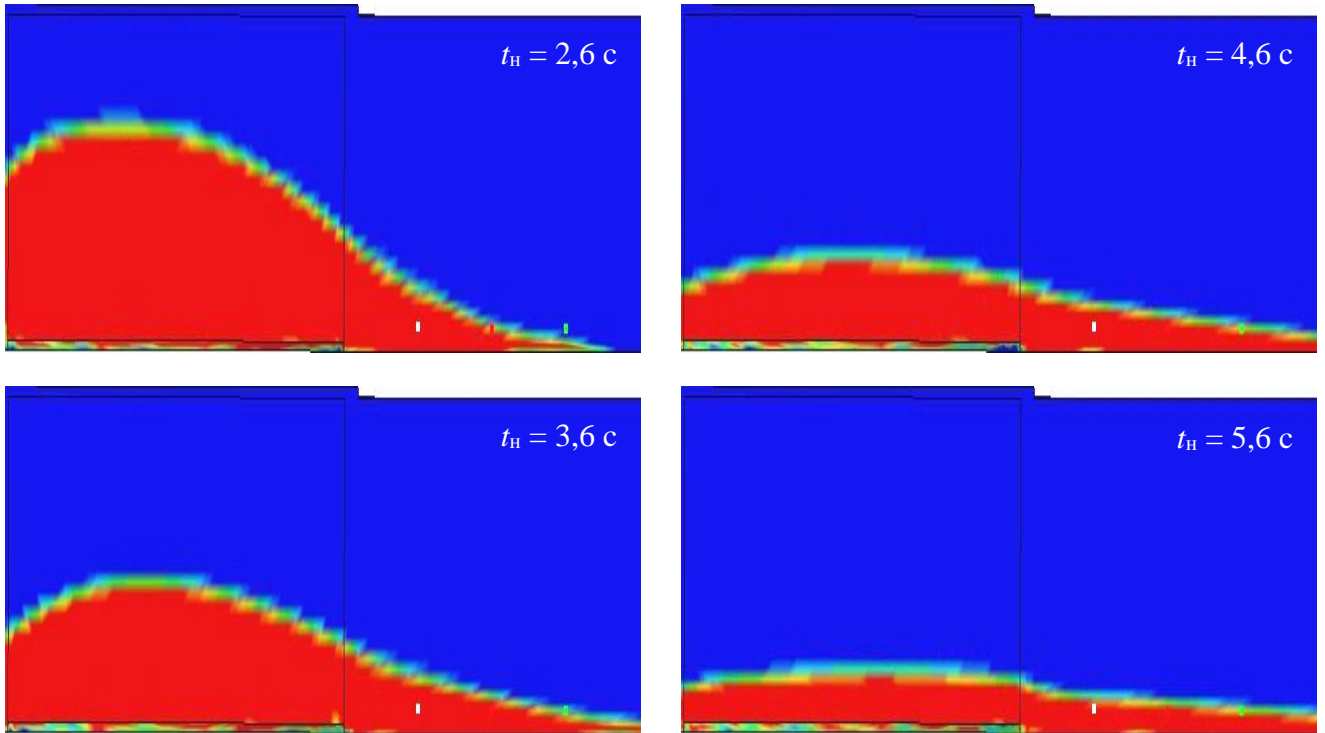


Рисунок 2.20 – Характерные кадры движения воды при моделировании процесса разрушения РВС-30000 м³ в соответствующие моменты времени t_H

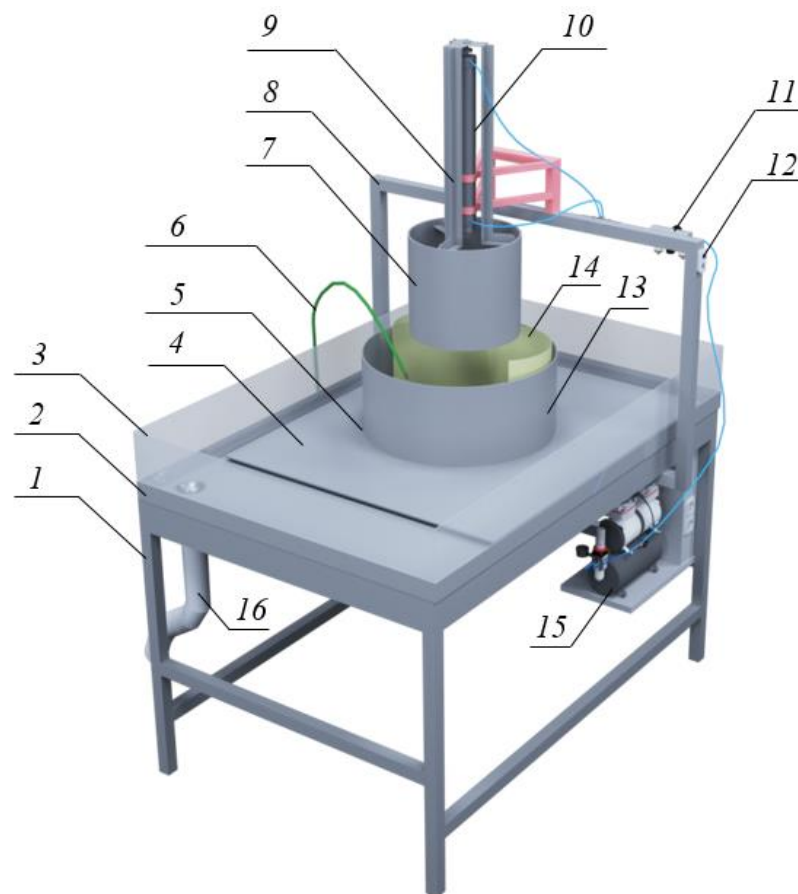


Рисунок 2.21 – Принципиальная схема лабораторного стенда для исследования геометрических параметров ограждений резервуаров

Основой стенда является стальной каркас *1* прямоугольной формы с размерами (В×Ш×Г) 0,9×1,6×1,1 м. В качестве столешницы используется поддон *2* из нержавеющей стали с высотой борта 0,05 м. В углу поддона смонтирована арматура для удаления воды в систему канализации *16* после проведения эксперимента. Для предотвращения перелива воды за борта поддона при проведении опытов 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* из листового алюминия толщиной 0,01 м. В основание встроены два пузырьковых горизонтальных уровня, а также уплотнительное резиновое кольцо *5*, на которое под давлением, создаваемым поршнем *10*, устанавливается модельный резервуар *7*.

Для соблюдения идентичности воспроизведения процесса разрушения стенок РВС 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 его стенкам, 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 стенда *1*. Высота рамы подобрана таким образом, чтобы при поднятии поршнем модельного резервуара, установленный внутри него лист монолитного поликарбоната свободно раскрывался под действием гидростатического напора воды, моделируя разрушение резервуара.

Нагнетание воздуха в поршень обеспечивает воздушный компрессор с ресивером *15*, размещенный на площадке каркаса стенда. На раме *8* установлены манометр с датчиками давления *11* и кнопки управления *12*, посредством нажатия на которые возможно осуществлять резкий подъем резервуара при проведении эксперимента и его плавное опускание на резиновое кольцо с целью создания герметичности при заполнении его водой перед проведением опыта.

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 0,2 м обечайки имеют различный диаметр (от 0,45 до 0,55 м), что позволяет их устанавливать на необходимом для изучения расстоянии от резервуара.

В качестве натурального объекта, как уже отмечалось, был выбран резервуар типа РВС-700 м³ (внутренний диаметр $D_{\text{вн}} = 10,4$ м; высота стенки $H_{\text{ст}} = 9$ м; степень заполнения $\varepsilon = 0,95$; уровень жидкости $H_0 = 8,55$ м). Масштаб моделирования был принят равным 1:30, при этом параметры модельного резервуара 7 составили: внутренний диаметр $d_{\text{вн}} = 0,35$ м; высота стенки $h_{\text{ст}} = 0,3$ м; степень заполнения $\varepsilon = 0,95$; уровень жидкости $h_0 = 0,285$ м. Таким образом модельный резервуар обеспечивал герметичность конструкции при заполнении ее водой, имитацию разрушения резервуара со свободным раскрытием его стенок под действием напора жидкости, образование волны и ее воздействие на защитные ограждения. Общий вид лабораторного стенда показан на рисунке 2.22.



Рисунок 2.22 – Общий вид лабораторного стенда

Для подтверждения возможности проведения экспериментов на лабораторном стенде была проведена 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 резервуар поршнем опускался на резиновое кольцо, обеспечивая герметичность конструкции. Внутри резервуара устанавливалась вкладка из поликарбоната. Резервуар заполнялся водой до уровня 0,285 м. В ресивере компрессором создавалось рабочее давление в 6 кг/см². С помощью кнопок управления резервуар поршнем резко поднимался вверх при этом вставка раскрывалась, имитируя разрушение резервуара с образованием волны прорыва и ее свободным истечением. Процесс распространения потока жидкости регистрировался цифровой фотокамерой, позволяющей создавать 5-ти секундные видеоролики. На рисунке 2.23 представлены характерные кадры видеосъемки при проведении эксперимента.



№ кадра 660: $l_M = 0,3$ м; $t_M = 0,138$ с



№ кадра 722: $l_M = 0,483$ м; $t_M = 0,293$ с



№ кадра 690: $l_M = 0,4$ м; $t_M = 0,213$ с



№ кадра 750: $l_M = 0,533$ м; $t_M = 0,363$ с

Рисунок 2.23 – Кадры видеосъемки разрушения резервуара в масштабе 1:30 к натурному РВС-700 м³ с водой в соответствующие моменты времени (l_M – характерное расстояние от стенки резервуара, пройденное потоком за определенное время t_M)

Аналогично были проведены опыты и с резервуаром в масштабе 1:130 по отношению к РВС-30000 м³, при этом условие геометрического подобия обеспечивали соответствующим уровнем жидкости в резервуаре (0,132 м).

Сравнительный анализ критериев подобия, полученных в результате обработки данных натурного опыта (разрушение РВС-700 м³), численного моделирования (разрушение РВС-30000 м³) и соответствующих лабораторных экспериментов (модели РВС в масштабах 1:30 и 1:130), представлен в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Сравнительная характеристика критериев подобия по результатам обработки данных натурного опыта и лабораторных экспериментов

Натурный опыт			Лабораторный эксперимент		
l_H , м	Fr_H	Sh_H	l_M , м	Fr_M	Sh_M
6,0	12,90	6,0	0,200	13,00	6,06
9,0	15,35	9,0	0,300	14,70	9,09
12,0	10,19	12,0	0,400	10,95	12,12
14,5	8,37	14,5	0,483	8,43	14,65
16,0	6,52	16,0	0,533	6,69	16,16

Таблица 2.2 – Сравнительная характеристика критериев подобия по результатам обработки данных численного моделирования и лабораторных экспериментов

Численное моделирование			Лабораторный эксперимент		
l_H , м	Fr_H	Sh_H	l_M , 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 таблицах 2.1 и 2.2, позволил сделать вывод о тождественности рассматриваемых критериев подобия, а, следовательно, и о подобии потоков в натуре и на модели. При этом числа Рейнольдса, полученные в лабораторных условиях превышали критическое значение для всех диапазонов

изменения параметров, то есть потоки находятся в турбулентном состоянии. Наконец вычисленный по формуле (2.12) наименьший допустимый масштаб модели для исследуемых резервуаров составил 120 и 172 соответственно.

Таким образом, условие масштаба моделирования соблюдалось, при этом скорость потока жидкости при проведении экспериментов в несколько раз превышала критическое значение, обеспечивая волнообразование. В целом, соблюдение критериев подобия и условий моделирования гидравлических явлений позволило сделать вывод о том, что изучаемый процесс находится в автомодельной области, а разработанный лабораторный стенд может использоваться для нахождения оптимальных геометрических параметров ограждений резервуаров, в частности, для РВСЗС, номинальным объемом от 700 до 30000 м³.

Дальнейшие эксперименты были связаны с нахождением необходимой для полного удержания потока жидкости высоты защитной стенки РВСЗС, при этом геометрическое подобие натуральных РВС обеспечивали соответствующим уровнем жидкости в модельном резервуаре (таблица 2.3). Расстояние от защитной стенки до стенки резервуара изменялось в диапазоне от 1,5 до 3 м (таблица 2.4).

Таблица 2.3 – 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	30	0,30
2000	15,18	12	43	0,28
5000	20,92	15	60	0,25
10000	28,50	18	81	0,22
20000	39,90	18	114	0,16
30000	45,60	18	130	0,14

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. На основании лабораторного стенда по периметру резервуара на соответствующем расстоянии обустривалась защитная стенка, конструктивно выполненная в виде стальной обечайки, первоначальная высота которой превышала на 1 м в соответствующем масштабе моделирования уровень жидкости в границах ограждения, образующийся при разрушении резервуара.

Таблица 2.4 – Значения межстенных расстояний РВСЗС 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

Внутри резервуара устанавливалась вкладка высотой, соответствующей уровню жидкости в этом резервуаре. Далее этапы проведения экспериментов аналогичны, описанным ранее. В случаях визуального наблюдения перелива жидкости (рисунок 2.24) 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 защитной стенки.

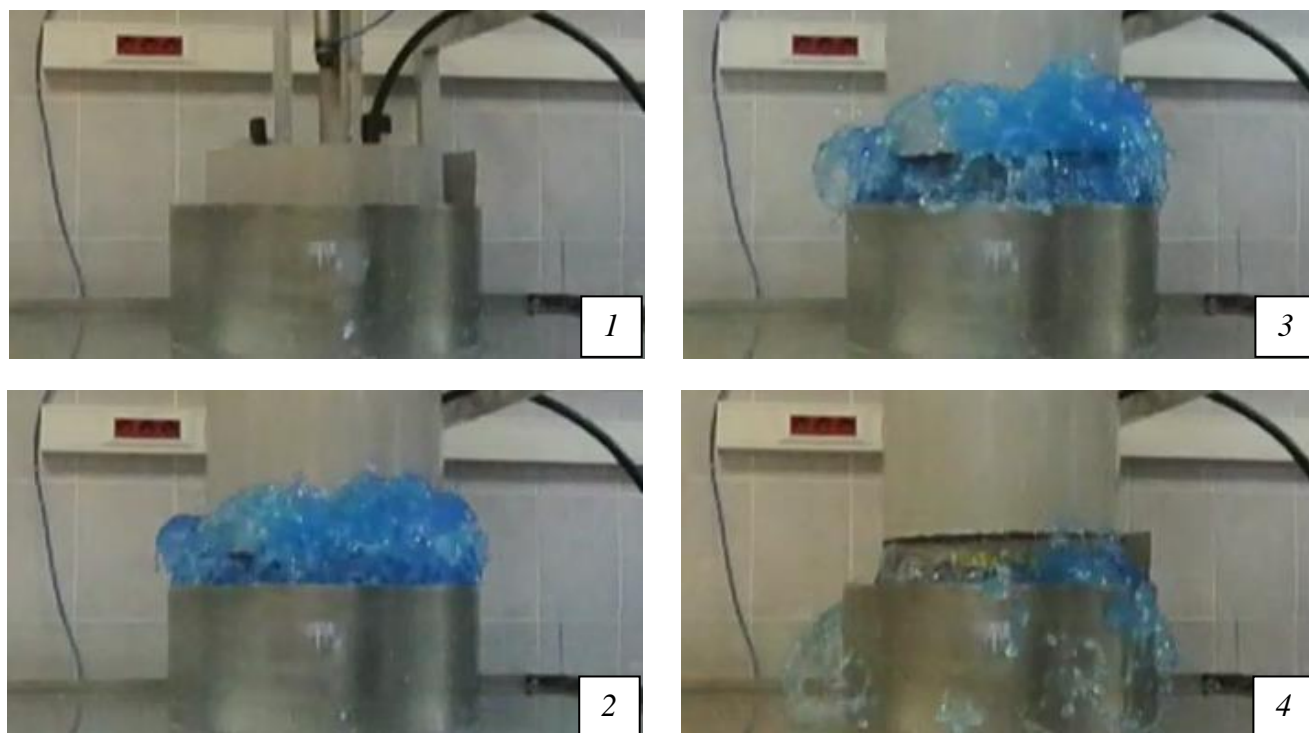


Рисунок 2.24 – Характерные кадры воздействия потока жидкости на защитную стенку при разрушении резервуара в масштабе 1:30

На рисунке 2.25 приведены зависимости безразмерного параметра ($h_{ст}/h_0$), определяющего необходимую высоту защитной стенки ($h_{ст}$, м) для полного удержания потока жидкости при разрушении резервуара с первоначальным уровнем жидкости (h_0 , м), соответствующим высоте стенки этого резервуара, от расстояния (l , м), на котором она может быть установлена. Кроме этого, здесь также приведены зависимости для определения высоты защитной стенки, рассчитанной на гидростатическое удержание пролитого из резервуара продукта [52], а также нормативная зависимость высоты защитной стенки – $0,8h_0$ [48].

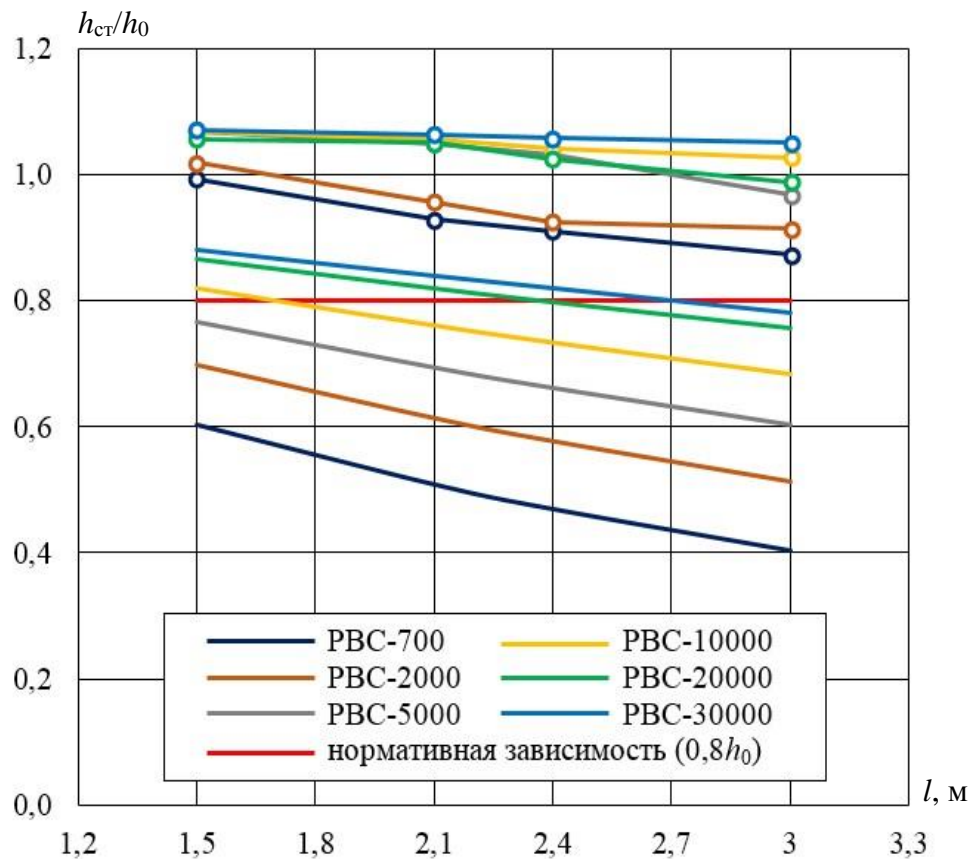


Рисунок 2.25 – Зависимости для определения необходимой высоты защитной стенки от расстояния до стенки резервуара:

—○— гидродинамика; — гидростатика

Из рисунка 2.25 видно, что для всех рассматриваемых резервуаров с целью полного удержания продукта в границах защитной стенки ее высота в исследуемом диапазоне расстояний l должна быть больше не только высоты стенки, рассчитанной на гидростатическое удержание пролитого продукта, но и нормативно рекомендуемой.

При этом, для удержания потока жидкости в границах защитной стенки, с учетом ее расчета на гидродинамические нагрузки и возможное ударное воздействие стенок и других элементов основного резервуара при его разрушении, отношение $h_{ст}/h_0 \geq 1,1$.

В связи с тем, что на практике защитные стенки такой высоты применять экономически нецелесообразно, 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 резервуара при аварии продукта, а также на определение геометрических параметров дополнительного ограждения для резервуара с защитной стенкой.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что для полной локализации потока жидкости, образующегося при разрушении основного резервуара, в границах защитной стенки, установленной от стенки резервуара на расстоянии от 1,5 до 3 м включительно, ее высота должна не менее чем на 10 % превышать первоначальный уровень жидкости в этом резервуаре. При снижении высоты защитной стенки вплоть до минимального значения, соответствующего статическому удержанию пролитого из резервуара продукта, возможен перелив части жидкости за пределы защитной стенки, что и требует обустройства дополнительного ограждения в виде земляного обвалования или ограждающей стены из негорючих материалов.

Анализ рассмотренных исследований, в том числе представленных в подразделе 1.5 настоящей работы, позволяет сделать следующие выводы:

– вопросы движения потока жидкости при разрушении резервуара и его воздействия на вертикальные защитные сооружения (стены) могут успешно решаться как теоретически, так и экспериментально;

– для нахождения оптимальных геометрических параметров защитных сооружений сложной конфигурации (стенки с Г-образным козырьком, в том числе под разным углом наклона, вогнутые, в виде логарифмической спирали, а также рвы различной формы или их комбинация со стенками), как правило, используется экспериментальный метод исследования;

– практически все экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях, где в качестве рабочей жидкости использовалась вода, при этом важно соблюдение основных критериев подобия и условий гидравлического моделирования, непосредственно влияющих на достоверность результатов;

– использовать полученные ранее зависимости для определения необходимой высоты защитной стенки с волноотражающим козырьком РВСЗС не представляется возможным, так как в первую очередь, не соответствует исследуемый диапазон расстояний от защитной стенки до резервуара: для РВСЗС – от 1,5 до 3 м; исследуемый ранее – от 3 до 30 м. Кроме этого, существенное влияние на высоту защитной стенки может оказывать ее вогнутая форма по отношению к набегающему потоку жидкости при разрушении основного резервуара;

– в качестве способа снижения высоты защитной стенки РВСЗС может рассматриваться возможность обустройства на ней ГВК или НВК, обращенных в сторону основного резервуара под углом 90° и 135° соответственно, как наиболее экономически целесообразных и эффективных по удержанию набегающего потока жидкости в случае возможного разрушения основного резервуара;

– для достижения поставленной в работе цели возможно применение лабораторно-экспериментального метода определения необходимой высоты защитной стенки РВСЗС, оборудованной ГВК или НВК, при этом необходимо выполнить соответствующую модернизацию рассмотренного ранее лабораторного стенда.

2.2 Модернизация лабораторного стенда, методика и проведение экспериментов по определению необходимой высоты защитной стенки с волноотражающим козырьком

Для достижения поставленной в настоящей работе цели лабораторный стенд (см. рисунки 2.21 и 2.22) был модернизирован посредством обустройства в соответствующих масштабах моделирования (см. таблицу 2.3) защитных стенок, оборудованных ГВК и НВК (рисунок 2.26).

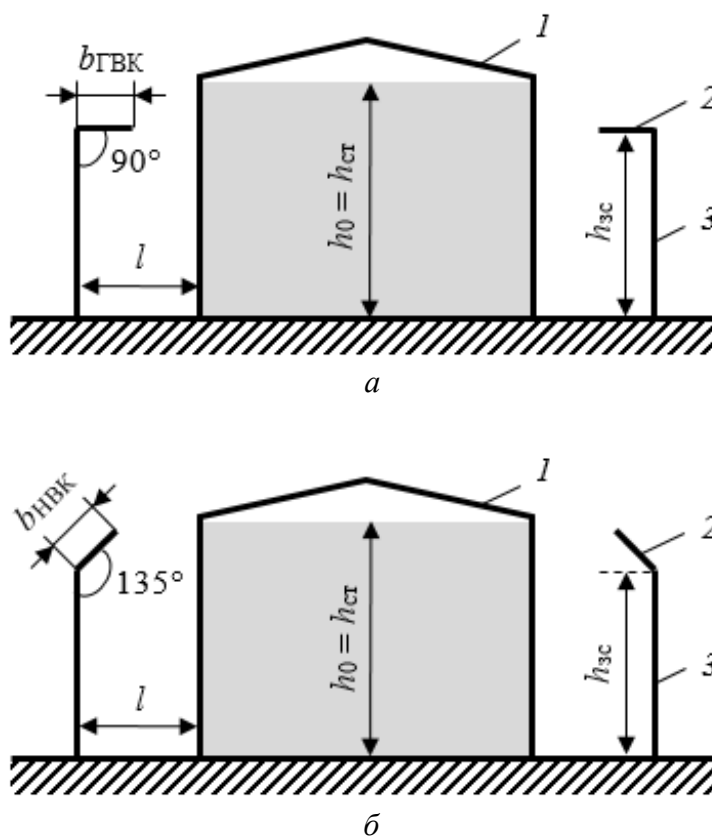


Рисунок 2.26 – Принципиальные схемы к определению необходимой высоты защитной стенки РВСЗС с ГВК (а) или НВК (б):

l – резервуар с максимальным уровнем жидкости $h_0 = h_{ст}$ (здесь $h_{ст}$ – высота стенки основного резервуара); 2 – волноотражающий козырек с длиной вылета $b_{ГВК}$ или $b_{НВК}$; 3 – защитная стенка высотой $h_{зс}$, установленная на расстоянии l от стенки резервуара

На рисунке 2.27 показан общий вид лабораторного стенда с установленной по периметру основного резервуара защитной стенкой с ГВК (а) и НВК (б) соответственно на примере модели в масштабе 1:60 к натурному РВС-5000 м³: $h_0 = 0,25$ м; $l = 0,05$ м; $b_{ГВК} = b_{НВК} = 0,025$ м.

Межстенное расстояние (l) изменялось в соответствующем масштабе моделирования от $l_{\min} = 1,5$ м до $l_{\max} = 3$ м с шагом в 0,3 м, а длина вылета волноотражающего козырька ($b_{ГВК}$, $b_{НВК}$) – от $b_{\min} = 0,5$ м до $b_{\max} = 1,5$ м с шагом в 0,25 м.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. На основании стенда по периметру резервуара на соответствующем расстоянии (см. таблицу 2.4) обустроивалась защитная стенка, конструктивно выполненная в виде стальной обечайки.

*a**б*

Рисунок 2.27 – Общий вид лабораторного стенда для нахождения необходимой высоты защитной стенки РВСЗС в зависимости от ее удаленности от стенки резервуара и длины вылета ГВК (*a*) или НВК (*б*)

Стенка жестко крепилась к основанию стенда посредством болтового соединения, а ее герметичность обеспечивалась за счет применения герметика. Высота стенки соответствовала уровню, образуемому при гидростатическом истечении жидкости из модельного резервуара. Такая конструкция внутренней стенки позволяла закреплять на ней посредством использования замкового устройства дополнительную стальную обечайку, оборудованную ГВК или НВК соответствующей длины вылета (см. рисунок 2.27). Далее в ресивере компрессором создавалось давление в 4 кгс/см^2 . С помощью кнопок управления резервуар под этим давлением поршнем плавно опускался на уплотнительное резиновое кольцо, встроенное в основание лабораторного стенда, тем самым обеспечивая герметичность конструкции. Внутри резервуара устанавливалась вкладка из поликарбоната высотой, соответствующей максимальному уровню жидкости в каждом модельном резервуаре (см. таблицу 2.3). Резервуар заполнялся водой до требуемого уровня, при этом вкладка плотно прижималась к стенкам резервуара, повторяя его оболочку. В ресивере компрессором создавалось рабочее давление в 6 кгс/см^2 . С помощью кнопок управления модельный резервуар под этим давлением поршнем резко поднимался вверх и под действием гидростатического давления столба воды вставка раскрывалась, имитируя разрушение стенок резервуара с образованием потока и его воздействием на защитную стенку. В случаях визуального наблюдения перелива жидкости высоту защитной стенки с ГВК или НВК увеличивали с шагом от $0,001 \text{ м}$, перемещая ее вверх по стальной обечайке и закрепляя замковым устройством. Опыты повторяли до тех пор, пока жидкость полностью не удерживалась в границах исследуемого ограждения. Весь процесс регистрировался цифровой фотокамерой (рисунки 2.28, 2.29).

Вывод о нахождении необходимой высоты защитной стенки с ГВК или НВК делался на основании равенства объемов жидкости в резервуаре до имитации аварии и в границах ограждения после его разрушения. Для возможности проведения соответствующих вычислений перед проведением каждого опыта инструментальной линейкой производился замер уровня воды в резервуаре, а после имитации его разрушения – уровня воды в границах защитной стенки.



Рисунок 2.28 – Характерные кадры взаимодействия потока жидкости при разрушении резервуара в масштабе 1:60 к натурному РВС-5000 м³ с защитной стенкой с ГВК ($h_0 = 0,25$ м; $l = 0,05$ м; $b_{ГВК} = 0,025$ м)

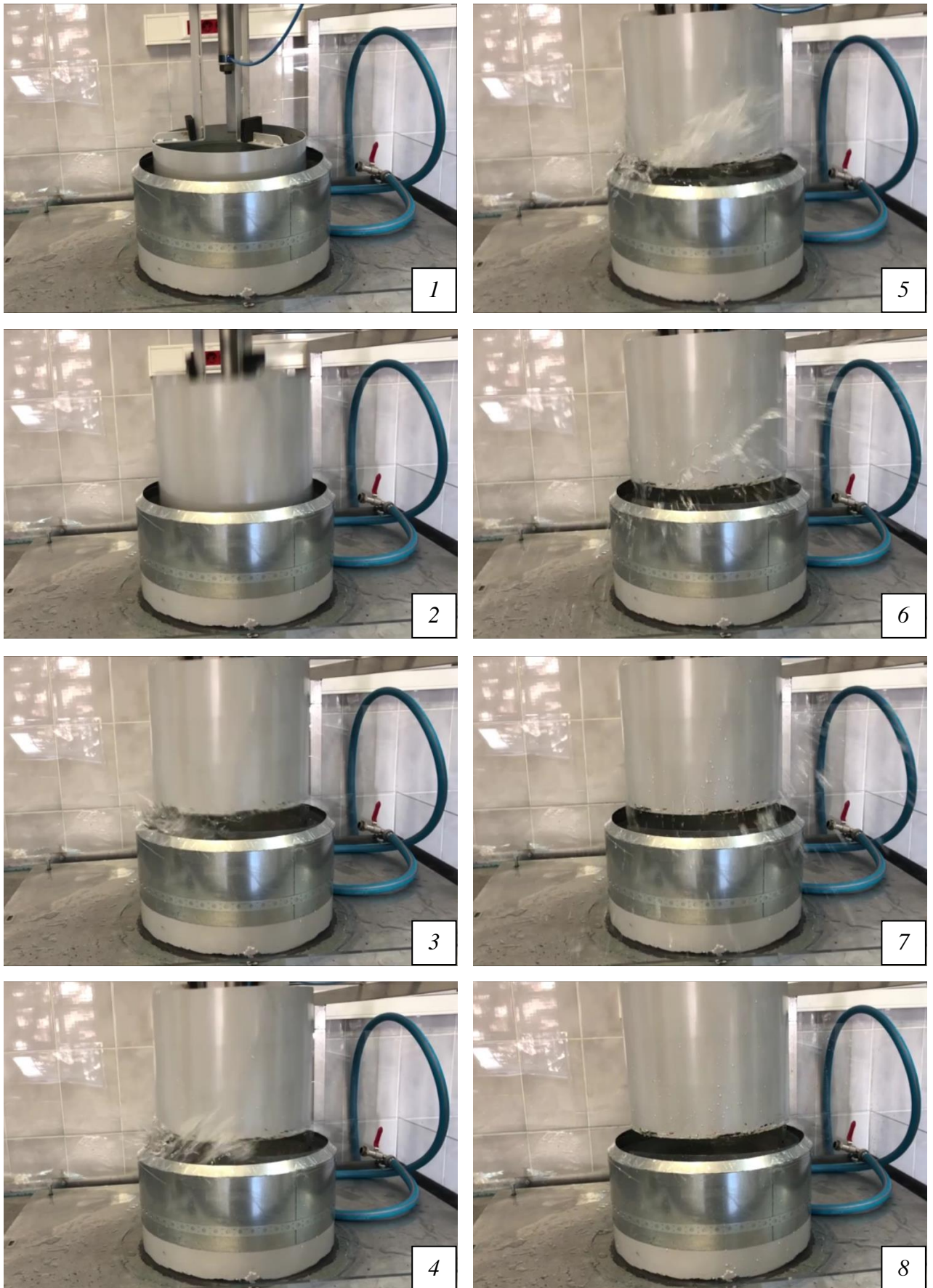


Рисунок 2.29 – Характерные кадры взаимодействия потока жидкости при разрушении резервуара в масштабе 1:60 к натурному РВС-5000 м³ с защитной стенкой с НВК ($h_0 = 0,25$ м; $l = 0,05$ м; $b_{\text{НВК}} = 0,025$ м)

Следует отметить, что при нахождении искомой высоты защитной стенки с соответствующим видом волноотражающего козырька каждый опыт с целью соблюдения повторяемости и достоверности результатов производили не менее трех раз, при этом общее количество выполненных экспериментов превысило 1000. Массив экспериментальных данных представлен в таблицах 2.5–2.16.

Таблица 2.5 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с ГВК при моделировании процесса разрушения РВС-700 м³

$l, \text{ м}$	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета горизонтального волноотражающего козырька $b_{ГВК}$, м				
	0,050	0,042	0,033	0,025	0,017
0,05	0,294	0,299	0,303	0,308	0,312
0,06	0,289	0,294	0,298	0,303	0,308
0,07	0,283	0,288	0,294	0,298	0,303
0,08	0,278	0,283	0,289	0,294	0,299
0,09	0,272	0,278	0,285	0,289	0,294
0,10	0,268	0,274	0,280	0,284	0,290

Таблица 2.6 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с НВК при моделировании процесса разрушения РВС-700 м³

$l, \text{ м}$	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета наклонного волноотражающего козырька $b_{НВК}$, м				
	0,050	0,042	0,033	0,025	0,017
0,05	0,285	0,290	0,295	0,299	0,303
0,06	0,280	0,285	0,290	0,295	0,299
0,07	0,274	0,279	0,284	0,290	0,295
0,08	0,269	0,274	0,279	0,285	0,290
0,09	0,264	0,268	0,273	0,280	0,286
0,10	0,260	0,264	0,269	0,276	0,282

Таблица 2.7 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с ГВК при моделировании процесса разрушения РВС-2000 м³

$l, \text{ м}$	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета горизонтального волноотражающего козырька $b_{ГВК}$, м				
	0,035	0,029	0,023	0,017	0,012
0,035	0,276	0,280	0,283	0,287	0,292
0,042	0,271	0,275	0,279	0,283	0,288
0,049	0,266	0,270	0,275	0,279	0,283
0,056	0,261	0,266	0,271	0,275	0,279
0,063	0,257	0,261	0,267	0,271	0,276
0,070	0,253	0,258	0,264	0,268	0,273

Таблица 2.8 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с НВК при моделировании процесса разрушения РВС-2000 м³

$l, \text{ м}$	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета наклонного волноотражающего козырька $b_{НВК}$, м				
	0,035	0,029	0,023	0,017	0,012
0,035	0,267	0,271	0,276	0,280	0,284
0,042	0,262	0,267	0,272	0,276	0,280
0,049	0,257	0,261	0,266	0,271	0,276
0,056	0,252	0,257	0,262	0,267	0,272
0,063	0,248	0,252	0,258	0,263	0,268
0,070	0,245	0,249	0,255	0,260	0,264

Таблица 2.9 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с ГВК при моделировании процесса разрушения РВС-5000 м³

$l, \text{ м}$	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета горизонтального волноотражающего козырька $b_{ГВК}$, м				
	0,025	0,021	0,017	0,013	0,008
0,025	0,246	0,249	0,251	0,254	0,257
0,030	0,243	0,245	0,248	0,251	0,254
0,035	0,239	0,241	0,244	0,247	0,251
0,040	0,234	0,237	0,240	0,243	0,247
0,045	0,229	0,232	0,236	0,239	0,243
0,050	0,225	0,228	0,233	0,236	0,240

Таблица 2.10 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с НВК при моделировании процесса разрушения РВС-5000 м³

$l, \text{ м}$	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета наклонного волноотражающего козырька $b_{НВК}$, м				
	0,025	0,021	0,017	0,013	0,008
0,025	0,241	0,244	0,247	0,250	0,252
0,030	0,238	0,241	0,244	0,246	0,249
0,035	0,233	0,236	0,239	0,242	0,245
0,040	0,228	0,232	0,235	0,238	0,241
0,045	0,224	0,227	0,230	0,233	0,237
0,050	0,221	0,223	0,226	0,230	0,234

Таблица 2.11 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с ГВК при моделировании процесса разрушения РВС-10000 м³

$l, \text{ м}$	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета горизонтального волноотражающего козырька $b_{ГВК}$, м				
	0,019	0,015	0,012	0,009	0,006
0,019	0,218	0,220	0,223	0,226	0,230
0,022	0,214	0,217	0,220	0,223	0,227
0,026	0,210	0,213	0,216	0,219	0,223
0,030	0,206	0,209	0,213	0,216	0,220
0,033	0,202	0,206	0,209	0,213	0,217
0,037	0,199	0,203	0,207	0,210	0,214

Таблица 2.12 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с НВК при моделировании процесса разрушения РВС-10000 м³

l , м	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета наклонного волноотражающего козырька $b_{НВК}$, м				
	0,019	0,015	0,012	0,009	0,006
0,019	0,212	0,215	0,218	0,221	0,223
0,022	0,209	0,212	0,215	0,218	0,221
0,026	0,204	0,208	0,211	0,214	0,218
0,030	0,200	0,203	0,206	0,210	0,214
0,033	0,197	0,200	0,203	0,207	0,211
0,037	0,194	0,197	0,200	0,204	0,208

Таблица 2.13 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с ГВК при моделировании процесса разрушения РВС-20000 м³

l , м	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета горизонтального волноотражающего козырька $b_{ГВК}$, м				
	0,013	0,011	0,009	0,006	0,004
0,013	0,158	0,160	0,162	0,165	0,167
0,016	0,155	0,157	0,160	0,162	0,164
0,018	0,152	0,154	0,157	0,160	0,162
0,021	0,149	0,151	0,154	0,157	0,159
0,024	0,146	0,148	0,151	0,154	0,157
0,026	0,144	0,146	0,149	0,152	0,155

Таблица 2.14 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с НВК при моделировании процесса разрушения РВС-20000 м³

l , м	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета наклонного волноотражающего козырька $b_{НВК}$, м				
	0,013	0,011	0,009	0,006	0,004
0,013	0,154	0,156	0,158	0,160	0,162
0,016	0,151	0,153	0,155	0,158	0,160
0,018	0,148	0,150	0,153	0,155	0,158
0,021	0,145	0,147	0,150	0,152	0,155
0,024	0,142	0,144	0,147	0,149	0,152
0,026	0,140	0,142	0,145	0,147	0,150

Таблица 2.15 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с ГВК при моделировании процесса разрушения РВС-30000 м³

l , м	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета горизонтального волноотражающего козырька $b_{ГВК}$, м				
	0,012	0,010	0,008	0,006	0,004
0,012	0,135	0,137	0,138	0,140	0,142
0,014	0,133	0,135	0,136	0,138	0,141
0,016	0,131	0,133	0,134	0,136	0,139
0,018	0,128	0,130	0,132	0,134	0,137
0,021	0,125	0,127	0,129	0,131	0,134
0,023	0,124	0,126	0,128	0,130	0,133

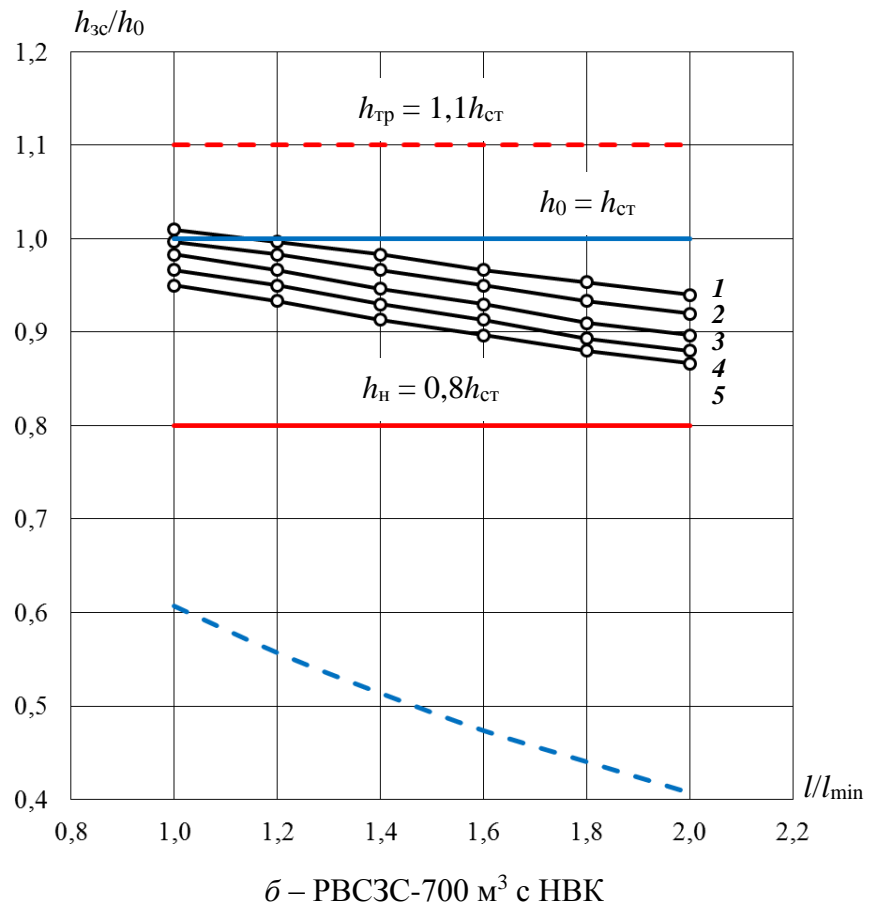
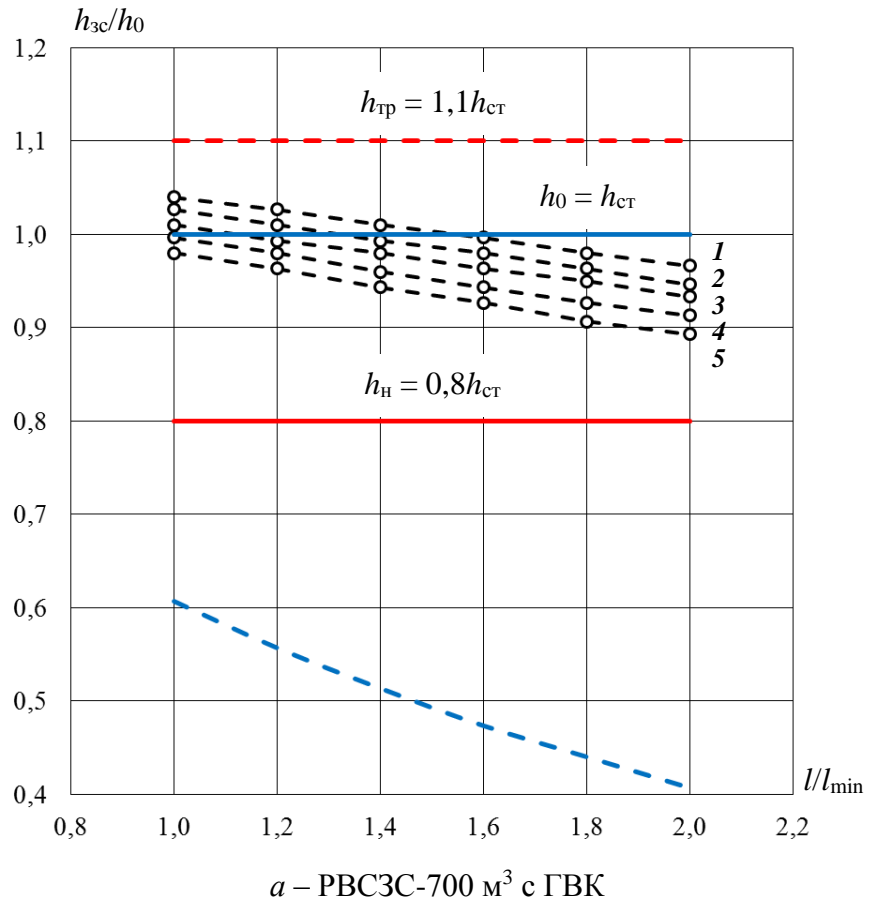
Таблица 2.16 – Результаты экспериментального определения необходимой высоты защитной стенки с НВК при моделировании процесса разрушения РВС-30000 м³

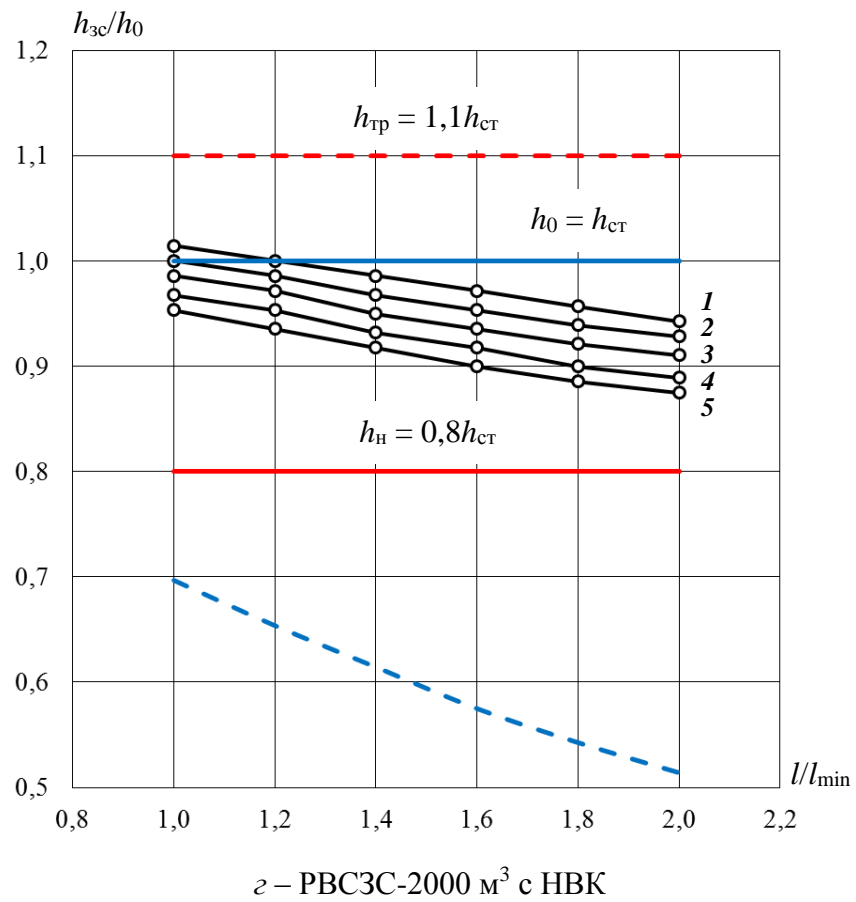
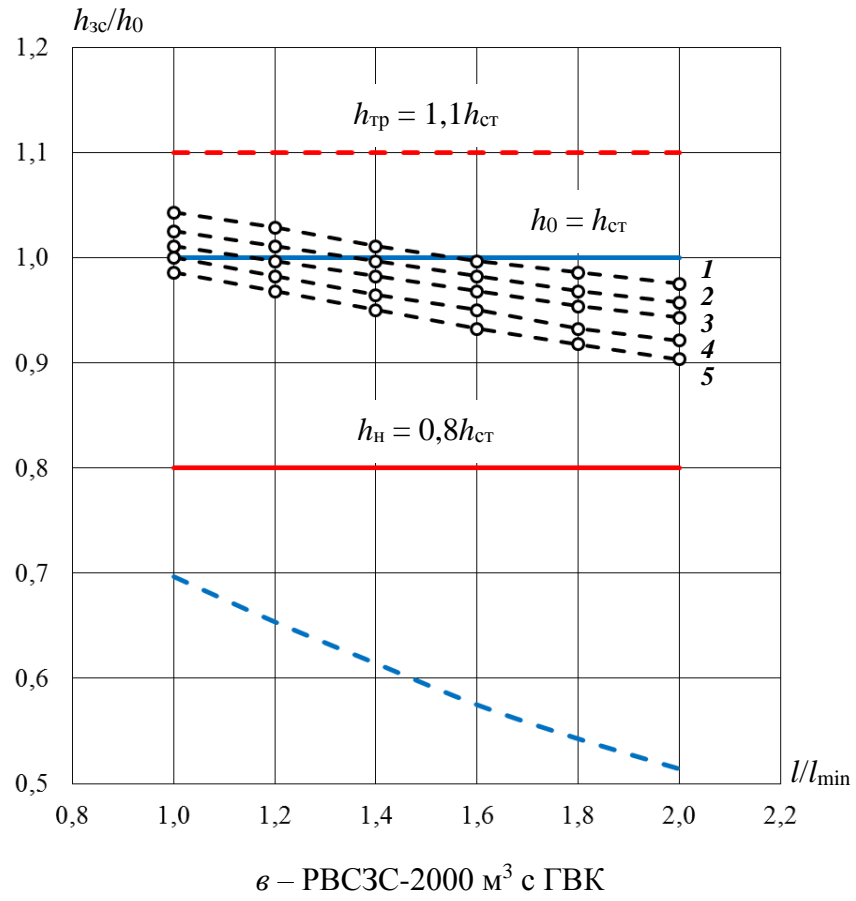
l , м	Высота защитной стенки $h_{зс}$, м в зависимости от длины вылета наклонного волноотражающего козырька $b_{НВК}$, м				
	0,012	0,010	0,008	0,006	0,004
0,012	0,132	0,134	0,136	0,137	0,139
0,014	0,130	0,132	0,134	0,135	0,137
0,016	0,127	0,129	0,131	0,133	0,135
0,018	0,125	0,127	0,129	0,131	0,133
0,021	0,122	0,124	0,126	0,128	0,130
0,023	0,120	0,122	0,124	0,126	0,128

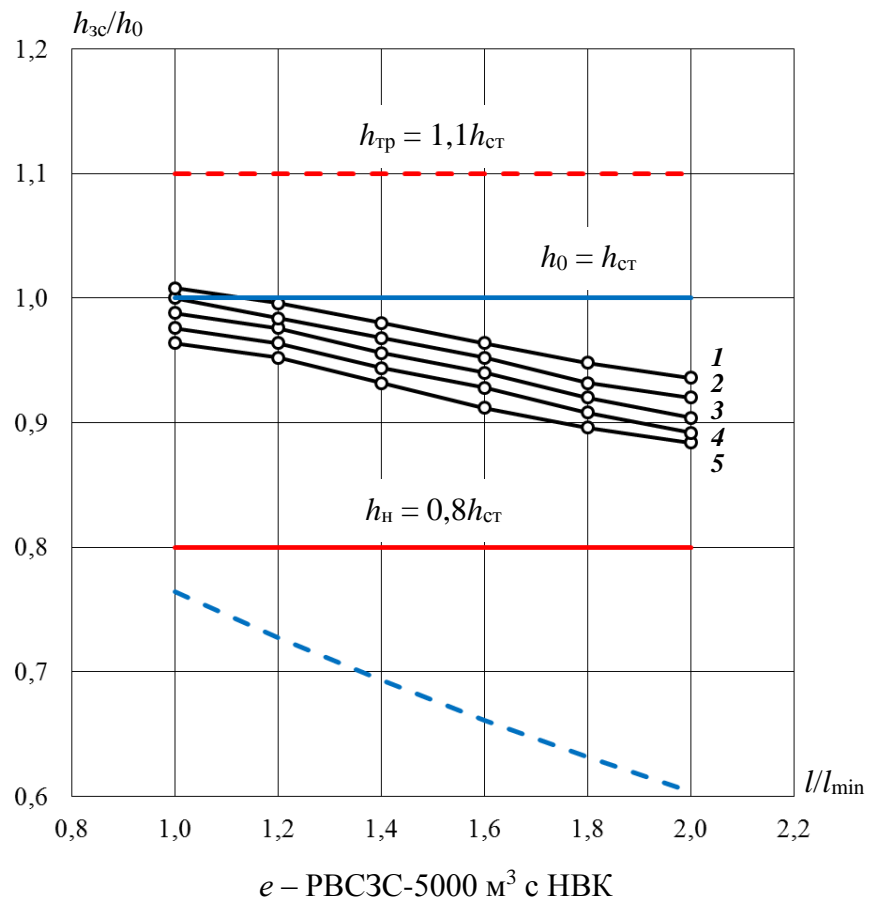
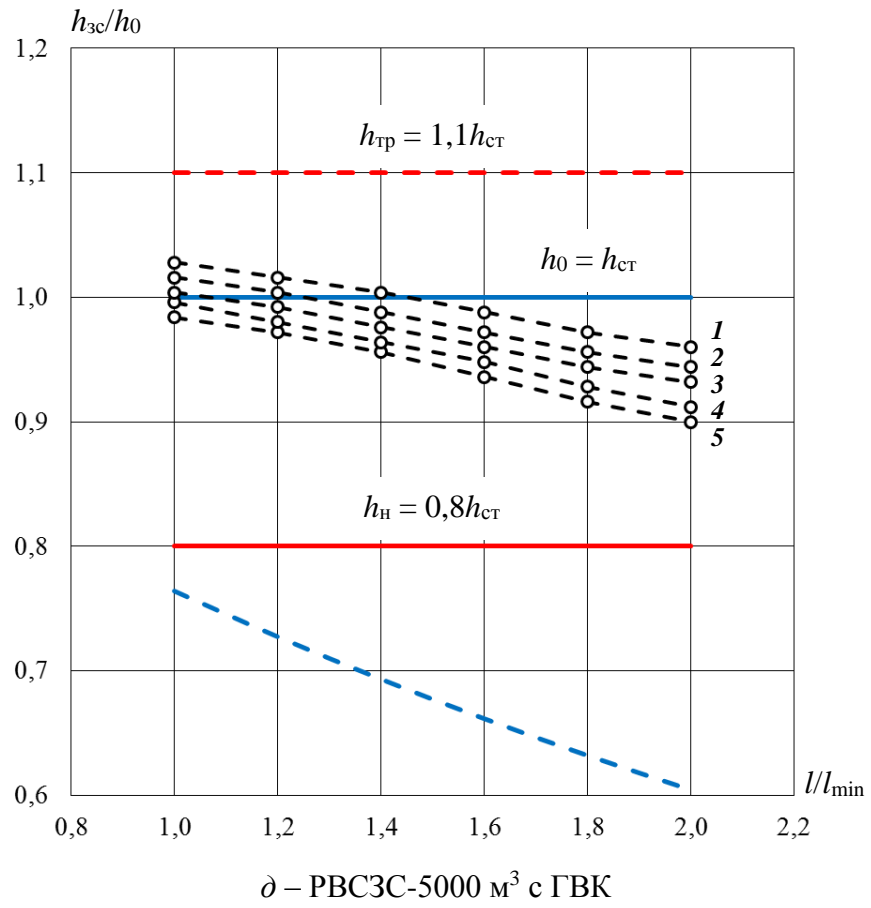
2.3 Анализ результатов экспериментальной оценки влияния наклона волноотражающего козырька на высоту защитной стенки

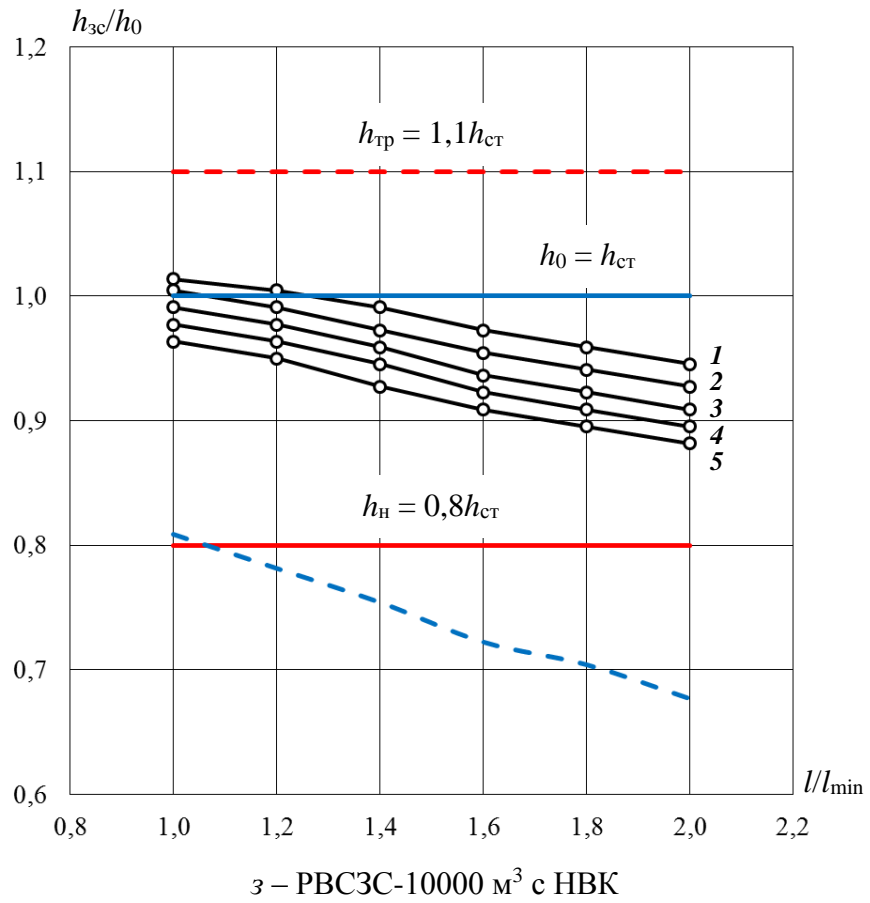
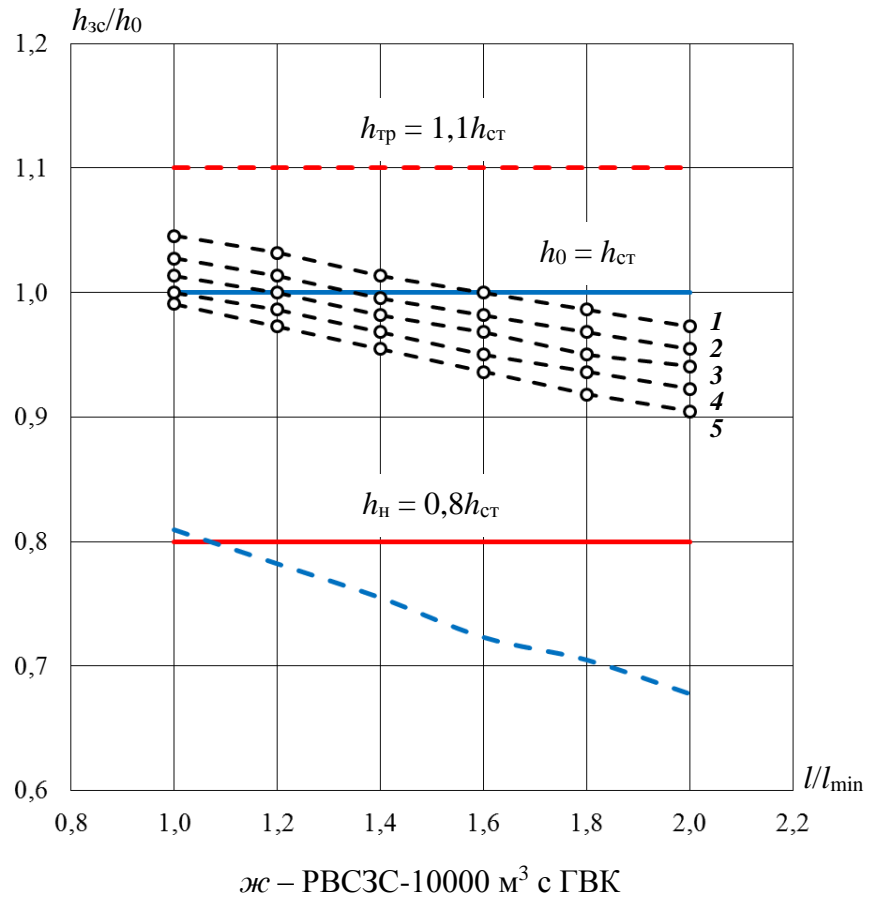
Для анализа влияния наклона козырька на высоту защитной стенки полученные экспериментальные данные были представлены в виде зависимостей безразмерного параметра ($h_{зс}/h_0$), определяющего необходимую высоту защитной стенки для полного ограничения потока жидкости при разрушении резервуара, от безразмерного параметра (l/l_{\min}), определяющего расстояние, на котором может быть установлена защитная стенка, и длины вылета козырька соответствующего вида ($b_{ГВК}$, $b_{НВК}$). Общий вид зависимостей для РВСЗС вместимостью от 700 до 30000 м³ показан на рисунке 2.30, где для сравнения также представлены: красная пунктирная линия – требуемая высота защитной стенки без козырька (см. рисунок 2.25); синяя сплошная линия – максимальный уровень жидкости в резервуаре до аварии ($h_0 = h_{ст}$); красная сплошная линия – нормативная высота защитной стенки ($0,8h_0$ [48]); синяя пунктирная линия – высота защитной стенки без козырька, рассчитанная на гидростатическое удержание пролитого продукта [52].

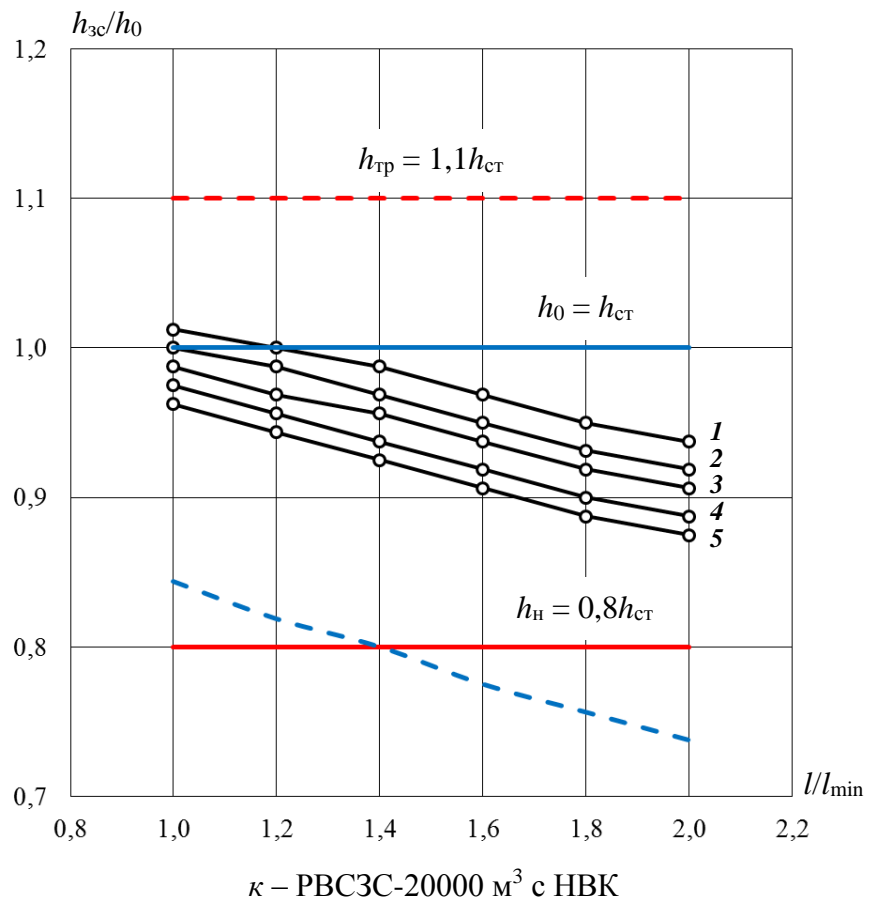
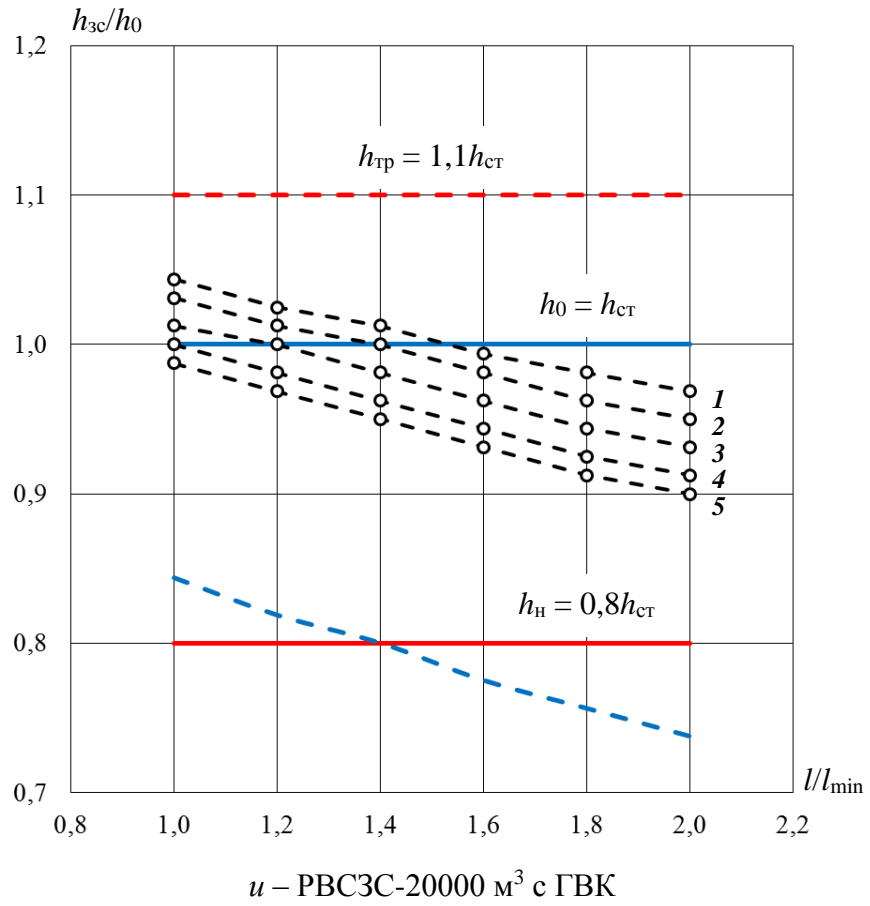
Анализируя представленные на рисунке 2.30 зависимости, с учетом критерия эффективности влияния волноотражающего козырька, в качестве которого рассматривалась возможность снижения высоты защитной стенки с ГВК или НВК до или ниже максимального уровня жидкости в основном резервуаре до разрушения, можно сделать следующие выводы:











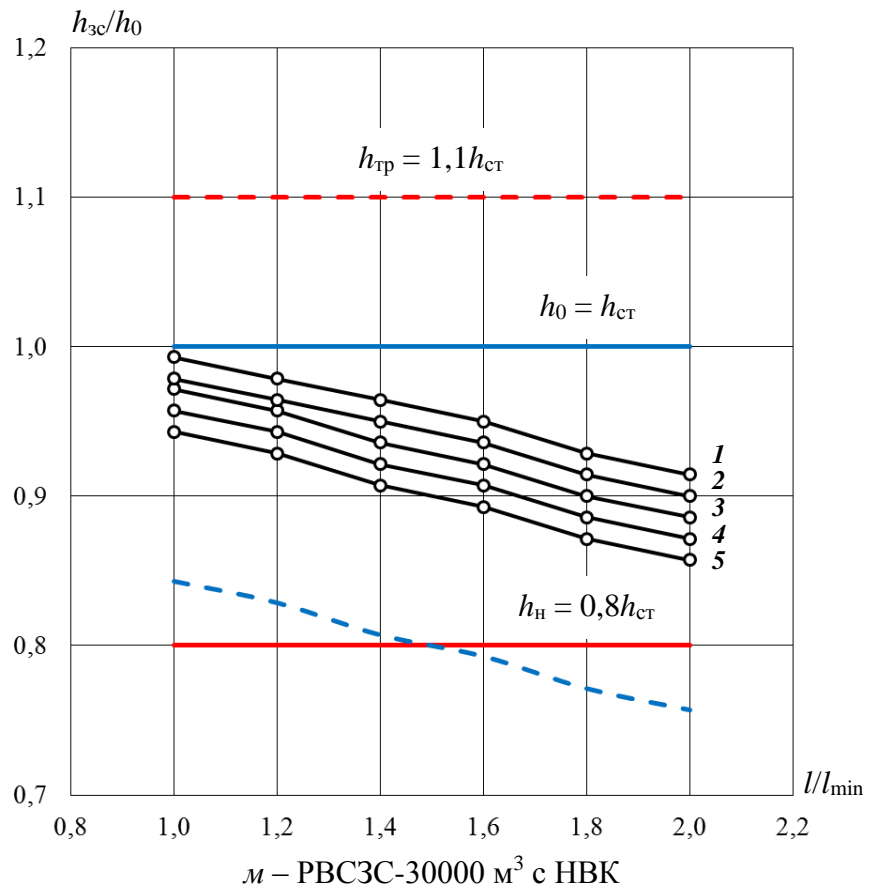
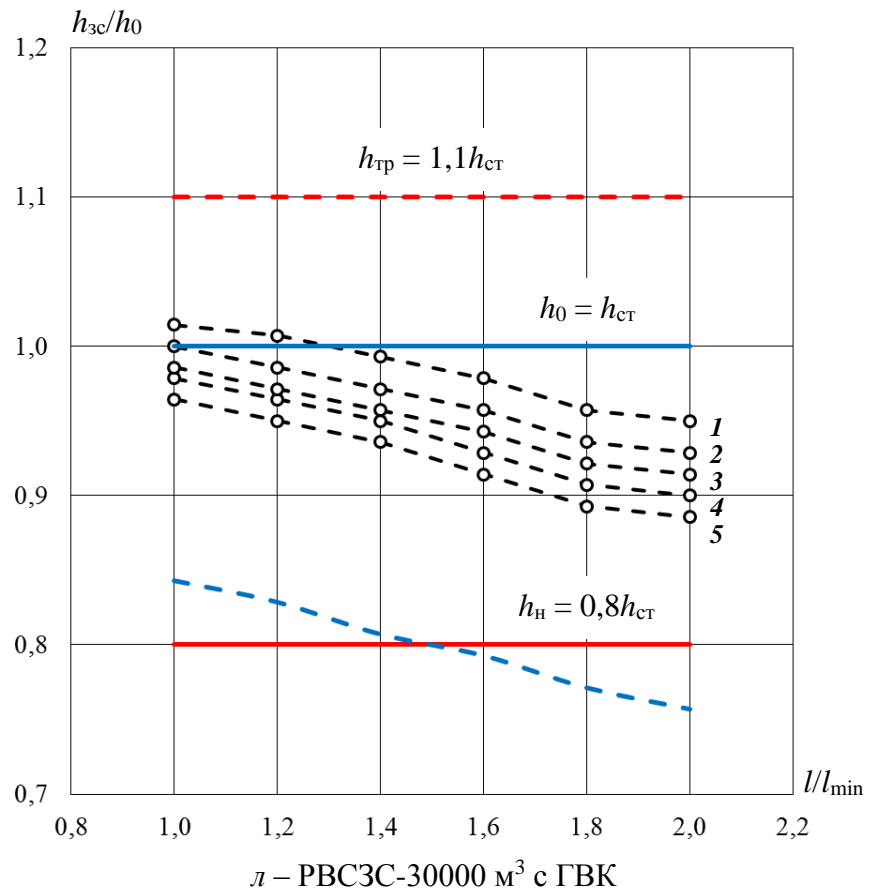


Рисунок 2.30 – Зависимости для определения высоты защитной стенки от расстояния до стенки резервуара и длины вылета козырька ($b_{ГVK} = b_{NBK}$):
 1 – 0,5 м; 2 – 0,75 м; 3 – 1 м; 4 – 1,25 м; 5 – 1,5 м

– независимо от вида волноотражающего козырька (ГВК или НВК) его обустройство на защитной стенке РВСЗС позволяет существенно снизить ее высоту ($0,85h_0 \leq h_{зс} \leq 1,05h_0$) относительно экспериментально установленной требуемой высоты защитной стенки без козырька ($h_{тр} = 1,1h_{ст}$) на всем исследуемом диапазоне межстенных расстояний (от 1,5 до 3 м);

– независимо от вида волноотражающего козырька (ГВК или НВК) и длины его вылета (от 0,5 до 1,5 м) высота защитной стенки будет превышать нормативно установленное значение ($h_n = 0,8h_{ст}$), а также высоту защитной стенки без козырька, рассчитанную на гидростатическое удержание пролитого продукта, на всем исследуемом диапазоне межстенных расстояний;

– наиболее эффективным является обустройство на защитной стенке НВК, позволяющего в диапазоне межстенного расстояния от 1,8 до 3 м с учетом длины его вылета существенно снизить высоту защитной стенки ($0,85h_0 \leq h_{зс} \leq h_0$).

Таким образом, обустройство на защитной стенке ГВК или НВК является эффективным способом, направленным на снижение ее высоты, при этом сооружение дополнительного земляного обвалования или стены из негорючих материалов не требуется, поскольку вся жидкость при возможном разрушении основного резервуара будет удерживаться предложенной конструкцией преграды. Кроме этого, такое ограждение будет частично выполнять роль погодозащитного козырька, нормативно рекомендуемого к установке на РВСЗС для перекрытия межстенного расстояния [48], [50]. Однако важно указать, что при сооружении такой конструкции РВСЗС необходимо обеспечить ее устойчивость не только к гидродинамическому воздействию потока жидкости, но и возможному динамическому воздействию разрушающихся при аварии основного резервуара конструкций, что может являться предметом дальнейших научных исследований.

Отметим также, что полученные результаты позволяют уже на стадии проектирования РВСЗС, например, при заданном межстенном расстоянии, определить ориентировочную длину вылета волноотражающего козырька для обустройства его на защитной стенке, высота которой не будет превышать максимальный уровень жидкости в основном резервуаре.

Для возможности определения оптимальных геометрических параметров защитной стенки с ГВК или НВК полученный массив экспериментальных данных был обработан с использованием метода многофакторного регрессионного анализа. Результаты обработки опытных данных приведены далее.

2.4 Эмпирические зависимости для определения геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком

Вследствие того, что для исследуемых типов резервуаров графическое отображение экспериментальных данных имеет схожий характер (см. рисунок 2.30), то выдвинуто предположение о наличии зависимостей вида [144]–[146]:

$$\frac{h_{зс}}{h_0} = f \left(\frac{d_{вн}}{h_0}; \frac{l}{l_{\min}}; \frac{b_{ГВК(НВК)}}{b_{\min}} \right). \quad (2.13)$$

Нахождение искомых зависимостей производилось методом многофакторного регрессионного анализа [147]–[149] с использованием диалогового статистического пакета для *IBM/PC – STATGRAPHICS* [150]–[153]. Массив исходных данных для получения зависимостей по определению необходимой высоты защитной стенки с ГВК (НВК) представлен в таблицах 2.17–2.22, а результаты их обработки приведены в таблицах 2.23 и 2.24.

В результате обработки экспериментальных данных получены искомые эмпирические зависимости для соответствующего диапазона изменения параметров, а также величины достоверности аппроксимации (R^2), критические значения F -критерия Фишера ($F_{кр}$), значения F -критерия Фишера в модели (F_m), а также доверительные интервалы (Δ) при уровне значимости $\alpha = 5\%$:

$$10,43 \text{ м} \leq d_{вн} \leq 45,6 \text{ м}; 9 \text{ м} \leq h_0 \leq 18 \text{ м}; 1,5 \text{ м} \leq l \leq 3 \text{ м}; 0,5 \text{ м} \leq b_{ГВК, НВК} \leq 1,5 \text{ м};$$

Таблица 2.17 – Значения безразмерных параметров для получения эмпирических зависимостей по определению высоты защитной стенки соответственно с ГВК и НВК при моделировании процесса разрушения РВС-700 м³

d_{BH}/h_0	l/l_{min}	$b_{ГВК(НВК)}/b_{min}$	h_{3c}/h_0	
			с ГВК	с НВК
1	2	3	4	5
1,167	1,0	3,0	0,980	0,950
1,167	1,2	3,0	0,963	0,933
1,167	1,4	3,0	0,943	0,913
1,167	1,6	3,0	0,927	0,897
1,167	1,8	3,0	0,907	0,880
1,167	2,0	3,0	0,893	0,867
1,167	1,0	2,5	0,997	0,967
1,167	1,2	2,5	0,980	0,950
1,167	1,4	2,5	0,960	0,930
1,167	1,6	2,5	0,943	0,913
1,167	1,8	2,5	0,927	0,893
1,167	2,0	2,5	0,913	0,880
1,167	1,0	2,0	1,010	0,983
1,167	1,2	2,0	0,993	0,967
1,167	1,4	2,0	0,980	0,947
1,167	1,6	2,0	0,963	0,930
1,167	1,8	2,0	0,950	0,910
1,167	2,0	2,0	0,933	0,897
1,167	1,0	1,5	1,027	0,997
1,167	1,2	1,5	1,010	0,983
1,167	1,4	1,5	0,993	0,967
1,167	1,6	1,5	0,980	0,950
1,167	1,8	1,5	0,963	0,933
1,167	2,0	1,5	0,947	0,920
1,167	1,0	1,0	1,040	1,010
1,167	1,2	1,0	1,027	0,997
1,167	1,4	1,0	1,010	0,983
1,167	1,6	1,0	0,997	0,967
1,167	1,8	1,0	0,980	0,953
1,167	2,0	1,0	0,967	0,940

Таблица 2.18 – Значения безразмерных параметров для получения эмпирических зависимостей по определению высоты защитной стенки соответственно с ГВК и НВК при моделировании процесса разрушения РВС-2000 м³

d_{BH}/h_0	l/l_{min}	$b_{ГВК(НВК)}/b_{min}$	h_{3c}/h_0	
			с ГВК	с НВК
1	2	3	4	5
1,25	1,0	3,0	0,986	0,954
1,25	1,2	3,0	0,968	0,936
1,25	1,4	3,0	0,950	0,918

Продолжение таблицы 2.18

1	2	3	4	5
1,25	1,6	3,0	0,932	0,900
1,25	1,8	3,0	0,918	0,886
1,25	2,0	3,0	0,904	0,875
1,25	1,0	2,5	1,000	0,968
1,25	1,2	2,5	0,982	0,954
1,25	1,4	2,5	0,964	0,932
1,25	1,6	2,5	0,950	0,918
1,25	1,8	2,5	0,932	0,900
1,25	2,0	2,5	0,921	0,889
1,25	1,0	2,0	1,011	0,986
1,25	1,2	2,0	0,996	0,971
1,25	1,4	2,0	0,982	0,950
1,25	1,6	2,0	0,968	0,936
1,25	1,8	2,0	0,954	0,921
1,25	2,0	2,0	0,943	0,911
1,25	1,0	1,5	1,025	1,000
1,25	1,2	1,5	1,011	0,986
1,25	1,4	1,5	0,996	0,968
1,25	1,6	1,5	0,982	0,954
1,25	1,8	1,5	0,968	0,939
1,25	2,0	1,5	0,957	0,929
1,25	1,0	1,0	1,043	1,014
1,25	1,2	1,0	1,029	1,000
1,25	1,4	1,0	1,011	0,986
1,25	1,6	1,0	0,996	0,971
1,25	1,8	1,0	0,986	0,957
1,25	2,0	1,0	0,975	0,943

Таблица 2.19 – Значения безразмерных параметров для получения эмпирических зависимостей по определению высоты защитной стенки соответственно с ГВК и НВК при моделировании процесса разрушения РВС-5000 м³

$d_{вн}/h_0$	l/l_{min}	$b_{ГВК(НВК)}/b_{min}$	$h_{зс}/h_0$	
			с ГВК	с НВК
1	2	3	4	5
1,4	1,0	3,0	0,984	0,964
1,4	1,2	3,0	0,972	0,952
1,4	1,4	3,0	0,956	0,932
1,4	1,6	3,0	0,936	0,912
1,4	1,8	3,0	0,916	0,896
1,4	2,0	3,0	0,900	0,884
1,4	1,0	2,5	0,996	0,976
1,4	1,2	2,5	0,980	0,964
1,4	1,4	2,5	0,964	0,944
1,4	1,6	2,5	0,948	0,928

Продолжение таблицы 2.19

1	2	3	4	5
1,4	1,8	2,5	0,928	0,908
1,4	2,0	2,5	0,912	0,892
1,4	1,0	2,0	1,004	0,988
1,4	1,2	2,0	0,992	0,976
1,4	1,4	2,0	0,976	0,956
1,4	1,6	2,0	0,960	0,940
1,4	1,8	2,0	0,944	0,920
1,4	2,0	2,0	0,932	0,904
1,4	1,0	1,5	1,016	1,000
1,4	1,2	1,5	1,004	0,984
1,4	1,4	1,5	0,988	0,968
1,4	1,6	1,5	0,972	0,952
1,4	1,8	1,5	0,956	0,932
1,4	2,0	1,5	0,944	0,920
1,4	1,0	1,0	1,028	1,008
1,4	1,2	1,0	1,016	0,996
1,4	1,4	1,0	1,004	0,980
1,4	1,6	1,0	0,988	0,964
1,4	1,8	1,0	0,972	0,948
1,4	2,0	1,0	0,960	0,936

Таблица 2.20 – Значения безразмерных параметров для получения эмпирических зависимостей по определению высоты защитной стенки соответственно с ГВК и НВК при моделировании процесса разрушения РВС-10000 м³

$d_{вн}/h_0$	l/l_{min}	$b_{ГВК(НВК)}/b_{min}$	h_{3c}/h_0	
			с ГВК	с НВК
1	2	3	4	5
1,591	1,0	3,0	0,991	0,964
1,591	1,2	3,0	0,973	0,950
1,591	1,4	3,0	0,955	0,927
1,591	1,6	3,0	0,936	0,909
1,591	1,8	3,0	0,918	0,895
1,591	2,0	3,0	0,905	0,882
1,591	1,0	2,5	1,000	0,977
1,591	1,2	2,5	0,986	0,964
1,591	1,4	2,5	0,968	0,945
1,591	1,6	2,5	0,950	0,923
1,591	1,8	2,5	0,936	0,909
1,591	2,0	2,5	0,923	0,895
1,591	1,0	2,0	1,014	0,991
1,591	1,2	2,0	1,000	0,977
1,591	1,4	2,0	0,982	0,959
1,591	1,6	2,0	0,968	0,936
1,591	1,8	2,0	0,950	0,923

Продолжение таблицы 2.20

1	2	3	4	5
1,591	2,0	2,0	0,941	0,909
1,591	1,0	1,5	1,027	1,005
1,591	1,2	1,5	1,014	0,991
1,591	1,4	1,5	0,995	0,973
1,591	1,6	1,5	0,982	0,955
1,591	1,8	1,5	0,968	0,941
1,591	2,0	1,5	0,955	0,927
1,591	1,0	1,0	1,045	1,014
1,591	1,2	1,0	1,032	1,005
1,591	1,4	1,0	1,014	0,991
1,591	1,6	1,0	1,000	0,973
1,591	1,8	1,0	0,986	0,959
1,591	2,0	1,0	0,973	0,945

Таблица 2.21 – Значения безразмерных параметров для получения эмпирических зависимостей по определению высоты защитной стенки соответственно с ГВК и НВК при моделировании процесса разрушения РВС-20000 м³

$d_{\text{вн}}/h_0$	l/l_{min}	$b_{\text{ГВК(НВК)}}/b_{\text{min}}$	$h_{\text{зс}}/h_0$	
			с ГВК	с НВК
1	2	3	4	5
2,188	1,0	3,0	0,988	0,963
2,188	1,2	3,0	0,969	0,944
2,188	1,4	3,0	0,950	0,925
2,188	1,6	3,0	0,931	0,906
2,188	1,8	3,0	0,913	0,888
2,188	2,0	3,0	0,900	0,875
2,188	1,0	2,5	1,000	0,975
2,188	1,2	2,5	0,981	0,956
2,188	1,4	2,5	0,963	0,938
2,188	1,6	2,5	0,944	0,919
2,188	1,8	2,5	0,925	0,900
2,188	2,0	2,5	0,913	0,888
2,188	1,0	2,0	1,013	0,988
2,188	1,2	2,0	1,000	0,969
2,188	1,4	2,0	0,981	0,956
2,188	1,6	2,0	0,963	0,938
2,188	1,8	2,0	0,944	0,919
2,188	2,0	2,0	0,931	0,906
2,188	1,0	1,5	1,031	1,000
2,188	1,2	1,5	1,013	0,988
2,188	1,4	1,5	1,000	0,969
2,188	1,6	1,5	0,981	0,950
2,188	1,8	1,5	0,963	0,931
2,188	2,0	1,5	0,950	0,919

Продолжение таблицы 2.21

1	2	3	4	5
2,188	1,0	1,0	1,044	1,013
2,188	1,2	1,0	1,025	1,000
2,188	1,4	1,0	1,013	0,988
2,188	1,6	1,0	0,994	0,969
2,188	1,8	1,0	0,981	0,950
2,188	2,0	1,0	0,969	0,938

Таблица 2.22 – Значения безразмерных параметров для получения эмпирических зависимостей по определению высоты защитной стенки соответственно с ГВК и НВК при моделировании процесса разрушения РВС-30000 м³

d_{BH}/h_0	l/l_{min}	$b_{ГВК(НВК)}/b_{min}$	h_{3c}/h_0	
			с ГВК	с НВК
1	2	3	4	5
2,5	1,0	3,0	0,964	0,943
2,5	1,2	3,0	0,950	0,929
2,5	1,4	3,0	0,936	0,907
2,5	1,6	3,0	0,914	0,893
2,5	1,8	3,0	0,893	0,871
2,5	2,0	3,0	0,886	0,857
2,5	1,0	2,5	0,979	0,957
2,5	1,2	2,5	0,964	0,943
2,5	1,4	2,5	0,950	0,921
2,5	1,6	2,5	0,929	0,907
2,5	1,8	2,5	0,907	0,886
2,5	2,0	2,5	0,900	0,871
2,5	1,0	2,0	0,986	0,971
2,5	1,2	2,0	0,971	0,957
2,5	1,4	2,0	0,957	0,936
2,5	1,6	2,0	0,943	0,921
2,5	1,8	2,0	0,921	0,900
2,5	2,0	2,0	0,914	0,886
2,5	1,0	1,5	1,000	0,979
2,5	1,2	1,5	0,986	0,964
2,5	1,4	1,5	0,971	0,950
2,5	1,6	1,5	0,957	0,936
2,5	1,8	1,5	0,936	0,914
2,5	2,0	1,5	0,929	0,900
2,5	1,0	1,0	1,014	0,993
2,5	1,2	1,0	1,007	0,979
2,5	1,4	1,0	0,993	0,964
2,5	1,6	1,0	0,979	0,950
2,5	1,8	1,0	0,957	0,929
2,5	2,0	1,0	0,950	0,914

Таблица 2.23 – Результаты обработки экспериментальных данных по определению необходимой высоты защитной стенки с ГВК РВСЗС

Зависимая переменная: $\frac{h_{зс}}{h_0} = f\left(\frac{d_{вн}}{h_0}; \frac{l}{l_{\min}}; \frac{b_{ГВК}}{b_{\min}}\right)$					
Параметр	Значение	Стандартная ошибка	t-критерий	Вероятность нулевой гипотезы	
Константа	1,16601	0,00344098	338,861	0,0000	
$d_{вн}/h_0$	-0,0109896	0,00110274	-9,96571	0,0000	
l/l_{\min}	-0,0785333	0,00159519	-49,2312	0,0000	
$b_{ГВК}/b_{\min}$	-0,0304333	0,000770552	-39,4955	0,0000	
Дисперсионный анализ					
Источник вариации зависимой переменной	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средне-квадратичное отклонение	F-отношение	Вероятность нулевой гипотезы
Модель	0,218181	3	0,0727271	1360,97	0,0000
Остаток	0,009405	176	0,0000534375		
Сумма	0,227586	179			
<p>Коэффициент детерминации = 95,8675 % Коэффициент детерминации (с поправкой на число степеней свободы) = 95,7971 % Стандартная ошибка оценки = 0,0073101 Средняя абсолютная ошибка = 0,00598116 Критерий Дарбина-Уотсона (вероятность автокорреляции) = 0,342607 (P = 0,0000) Ожидаемый уровень результата авторегрессии 1-го типа = 0,82804</p>					
Описание результатов дисперсионного анализа					
<p>Выходные данные получены в результате применения множественной линейной регрессионной модели, используемой для установления взаимосвязи между $h_{зс}/h_0$ и тремя независимыми переменными. Уравнение модели имеет вид:</p> $\frac{h_{зс}}{h_0} = 1,166 - 0,011 \frac{d_{вн}}{h_0} - 0,078 \frac{l}{l_{\min}} - 0,03 \frac{b_{ГВК}}{b_{\min}}.$ <p>Поскольку вероятность нулевой гипотезы в таблице дисперсионного анализа меньше 0,01, существует статистически значимая связь между переменными на уровне достоверности 99 %. Коэффициент детерминации является индикатором степени приближения модели к экспериментальным данным и равен 95,8675 %. Коэффициент детерминации (с поправкой на число степеней свободы) применяется для сравнения моделей с разным количеством независимых переменных и равен 95,7971 %. Стандартная ошибка оценки характеризует стандартное отклонение остатков регрессии и составляет 0,0073101. Средняя абсолютная ошибка, равная 0,00598116, определяется как среднее значение остатков регрессии. Критерий Дарбина-Уотсона, равный 0,342607, используется для тестирования автокорреляции первого порядка остатков регрессионной модели. Независимые переменные являются статистически значимыми, поскольку вероятности нулевой гипотезы этих переменных меньше 0,001.</p>					

Таблица 2.24 – Результаты обработки экспериментальных данных по определению необходимой высоты защитной стенки с НВК РВСЗС

Зависимая переменная: $\frac{h_{зс}}{h_0} = f\left(\frac{d_{вн}}{h_0}; \frac{l}{l_{\min}}; \frac{b_{НВК}}{b_{\min}}\right)$					
Параметр	Значение	Стандартная ошибка	t-критерий	Вероятность нулевой гипотезы	
Константа	1,14027	0,00339783	335,588	0,0000	
$d_{вн}/h_0$	-0,00866159	0,00108891	-7,95439	0,0000	
l/l_{\min}	-0,0820143	0,00157519	-52,0663	0,0000	
$b_{НВК}/b_{\min}$	-0,0299667	0,000760888	-39,3838	0,0000	
Дисперсионный анализ					
Источник вариации зависимой переменной	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средне-квадратичное отклонение	F-отношение	Вероятность нулевой гипотезы
Модель	0,22537	3	0,0751234	1441,75	0,0000
Остаток	0,00917058	176	0,0000521056		
Сумма	0,234541	179			
<p>Коэффициент детерминации = 96,09 % Коэффициент детерминации (с поправкой на число степеней свободы) = 96,0233 % Стандартная ошибка оценки = 0,00721842 Средняя абсолютная ошибка = 0,00621631 Критерий Дарбина-Уотсона (вероятность автокорреляции) = 0,264372 (P = 0,0000) Ожидаемый уровень результата авторегрессии 1-го типа = 0,857959</p>					
Описание результатов дисперсионного анализа					
<p>Выходные данные получены в результате применения множественной линейной регрессионной модели, используемой для установления взаимосвязи между $h_{зс}/h_0$ и тремя независимыми переменными. Уравнение модели имеет вид:</p> $\frac{h_{зс}}{h_0} = 1,14 - 0,009 \frac{d_{вн}}{h_0} - 0,082 \frac{l}{l_{\min}} - 0,03 \frac{b_{НВК}}{b_{\min}}.$ <p>Поскольку вероятность нулевой гипотезы в таблице дисперсионного анализа меньше 0,01, существует статистически значимая связь между переменными на уровне достоверности 99 %. Коэффициент детерминации является индикатором степени приближения модели к экспериментальным данным и равен 96,09 %. Коэффициент детерминации (с поправкой на число степеней свободы) применяется для сравнения моделей с разным количеством независимых переменных и равен 96,0233 %. Стандартная ошибка оценки характеризует стандартное отклонение остатков регрессии и составляет 0,00721842. Средняя абсолютная ошибка, равная 0,00621631, определяется как среднее значение остатков регрессии. Критерий Дарбина-Уотсона, равный 0,264372, используется для тестирования автокорреляции первого порядка остатков регрессионной модели. Независимые переменные являются статистически значимыми, поскольку вероятности нулевой гипотезы этих переменных меньше 0,001.</p>					

$$\frac{h_{3c}}{h_0} = 1,166 - 0,011 \frac{d_{вн}}{h_0} - 0,078 \frac{l}{l_{\min}} - 0,03 \frac{b_{ГВК}}{b_{\min}}; \quad (2.14)$$

$$R^2 = 95,87 \% \text{ (см. таблицу 2.23); } F_{кр} = 2,662 [154];$$

$$F_M = 1360,97 \text{ (см. таблицу 2.23); } \Delta = 0,014 [155];$$

$$\frac{h_{3c}}{h_0} = 1,14 - 0,009 \frac{d_{вн}}{h_0} - 0,082 \frac{l}{l_{\min}} - 0,03 \frac{b_{НВК}}{b_{\min}}; \quad (2.15)$$

$$R^2 = 96,09 \% \text{ (см. таблицу 2.24); } F_{кр} = 2,662 [154];$$

$$F_M = 1441,75 \text{ (см. таблицу 2.24); } \Delta = 0,014 [155].$$

На рисунке 2.31 показано сравнение экспериментальных данных и соответствующих расчетных значений, полученных по формулам (2.14) и (2.15), на примере определения высоты защитной стенки с ГВК и НВК соответственно для резервуара типа РВС-5000 м³. Следует отметить, что аналогичные зависимости характерны и для остальных рассмотренных типов резервуаров, при этом максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями в исследуемом диапазоне изменения параметров не превышает 2 %.

Высокая достоверность аппроксимации (более 95 %), а также значительное превышение значения F -критерия Фишера в моделях (1360,97 и 1441,75 соответственно) над его критическим значением ($F_{кр} = 2,662 [154]$), позволяют сделать вывод об удовлетворительной сходимости выборок, то есть полученные зависимости адекватно описывают изучаемый процесс и могут использоваться на практике в соответствующем диапазоне изменения исходных параметров.

Таким образом в результате выполненных исследований установлено, что обустройство на защитной стенке РВСЗС ГВК или НВК является эффективным способом, направленным на снижение ее высоты до или ниже максимального уровня горючей жидкости в основном резервуаре.

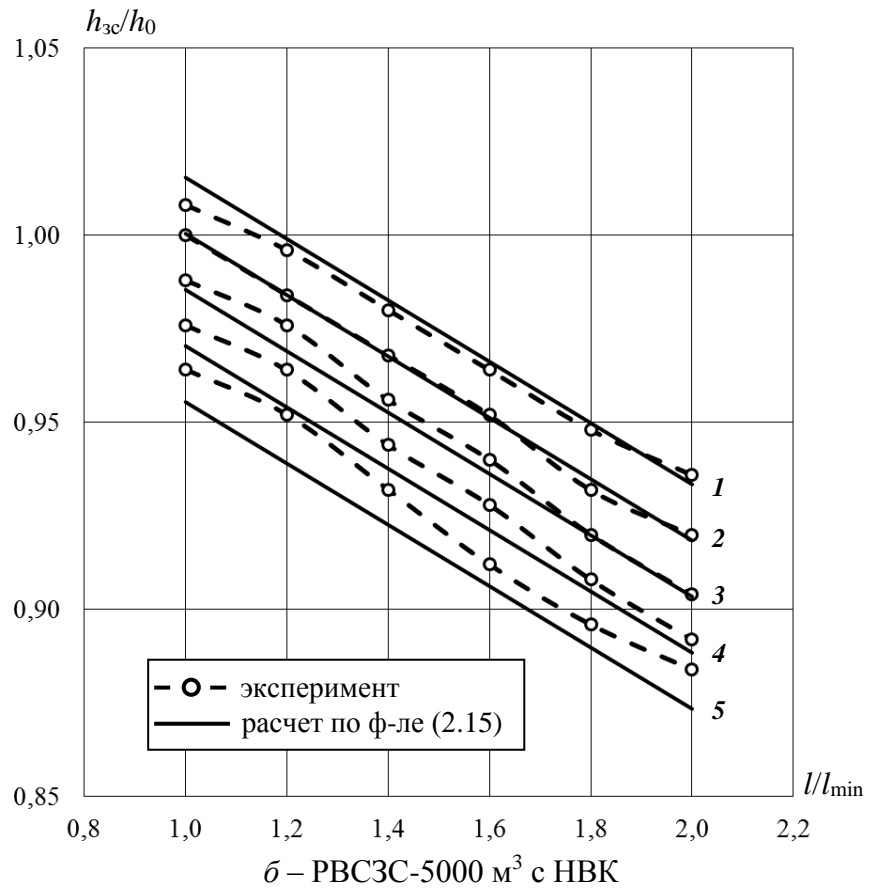
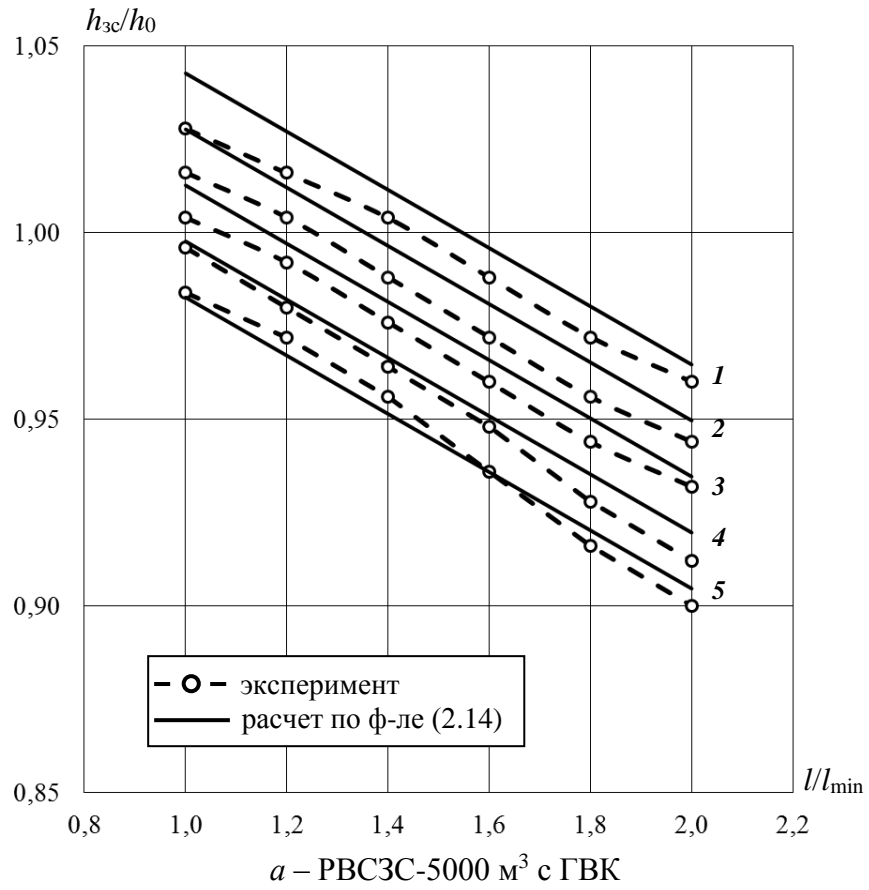


Рисунок 2.31 – Зависимости для определения высоты защитной стенки от расстояния до стенки резервуара и длины вылета козырька ($b_{\text{ГБК}} = b_{\text{НБК}}$):
 1 – 0,5 м; 2 – 0,75 м; 3 – 1 м; 4 – 1,25 м; 5 – 1,5 м

Использование на практике зависимостей (2.14) и (2.15) для нахождения минимальной высоты защитной стенки с волноотражающим козырьком горизонтального или наклонного вида позволяет оптимизировать конструкцию РВСЗС, обеспечивая требуемый уровень пожарной, промышленной и экологической безопасности.

В целом предложенный способ снижения высоты защитной стенки, расчетные схемы и эмпирические зависимости могут являться основой для разработки нормативного документа по обеспечению пожарной безопасности резервуаров типа «стакан в стакане», а также использоваться проектными организациями для нахождения оптимальных решений по конструкции и размещению рассматриваемых типов резервуаров как на объектах ТЭК СРВ, так и России, в том числе, в резервуарных парках ТЭС.

На основе результатов выполненных исследований для практического применения разработаны рекомендации по определению геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком РВСЗС, основные положения которых представлены в следующей главе диссертационной работы.

ГЛАВА 3 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ С ВОЛНООТРАЖАЮЩИМ КОЗЫРЬКОМ РЕЗЕРВУАРА ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ»

3.1 Общие положения

Настоящие рекомендации подготовлены на основании результатов научно-исследовательских работ [156]–[160], выполненных в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, анализа данных о разрушениях РВС на производственных объектах как в России [12]–[16], [26], [36]–[46], [74], [100], так и за рубежом [17]–[37], [100], [101], а также анализа нормативных документов, регламентирующих требования промышленной безопасности к РВСЗС типа «стакан в стакане» [48]–[50].

Рекомендации предназначены для использования в практической работе подразделениями, уполномоченными на решение задач в области пожарной и промышленной безопасности, персоналом, осуществляющим эксплуатацию резервуарных парков хранения горючих жидкостей, организациями, разрабатывающими проектную документацию на РВСЗС, в том числе, при определении расчетных величин пожарного и промышленного рисков.

Изложенные в рекомендациях результаты исследований могут являться основой для разработки нормативного документа (дополнения существующих) в области обеспечения пожарной и промышленной безопасности производственных объектов при хранении горючих жидкостей в РВСЗС.

Рекомендации содержат метод определения геометрических параметров защитной стенки с горизонтальным или наклонным волноотражающим козырьком резервуара типа «стакан в стакане» с целью предотвращения каскадного развития аварии (пожара) или чрезвычайной ситуации в резервуарном парке объекта защиты.

3.2 Метод определения геометрических параметров защитной стенки с горизонтальным или наклонным волноотражающим козырьком резервуара типа «стакан в стакане»

Настоящий метод устанавливает порядок расчета геометрических параметров защитной стенки с горизонтальным или наклонным волноотражающим козырьком резервуара типа РВСЗС, предназначенной для полного удержания волны прорыва при квазимгновенном разрушении основного (внутреннего) резервуара, в диапазоне изменения исходных данных:

$$700 \leq V_{\text{н}} \leq 30000; 10,43 \leq d_{\text{вн}} \leq 45,6; 9 \leq h_0 \leq 18;$$

$$1,5 \leq l \leq 3; 0,5 \leq b_{\text{ГВК, НВК}} \leq 1,5,$$

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

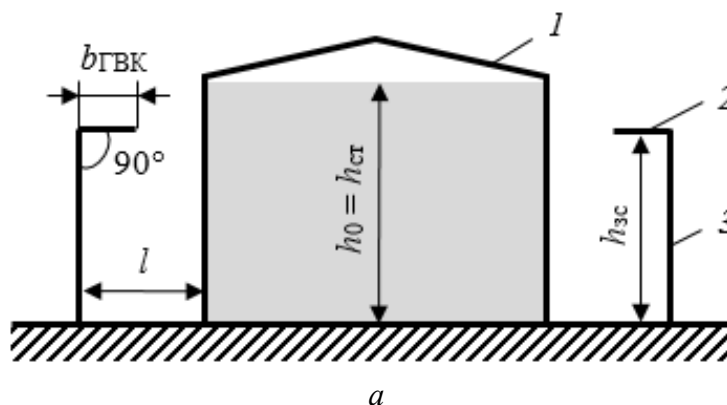
$d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр основного резервуара, м;

h_0 – максимальный уровень жидкости в основном резервуаре, численно равный высоте стенки основного резервуара $h_{\text{ст}}$, м;

l – расстояние от защитной стенки до стенки основного резервуара, м;

$b_{\text{ГВК, НВК}}$ – длина вылета волноотражающего козырька соответствующего вида, м.

На рисунке 3.1 представлены расчетные схемы к определению необходимой высоты защитной стенки РВСЗС с ГВК (а) или НВК (б).



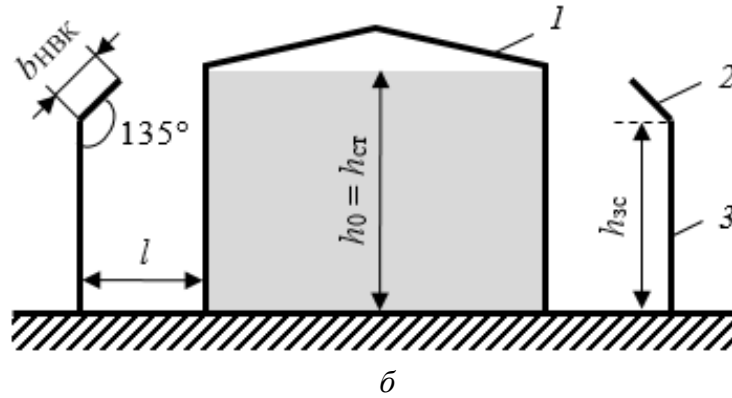


Рисунок 3.1 – Расчетные схемы к определению высоты защитной стенки ($h_{зс}$) с ГВК (а) или НВК (б):
1 – основной резервуар; 2 – волноотражающий козырек; 3 – защитная стенка

Высоту защитной стенки РВСЗС в зависимости от геометрических параметров основного резервуара, величины межстенного расстояния и длины вылета волноотражающего козырька соответствующего вида определяют по формулам:

$$\frac{h_{зс}}{h_0} = 1,166 - 0,011 \frac{d_{вн}}{h_0} - 0,078 \frac{l}{l_{\min}} - 0,03 \frac{b_{ГВК}}{b_{\min}}; \quad (3.1)$$

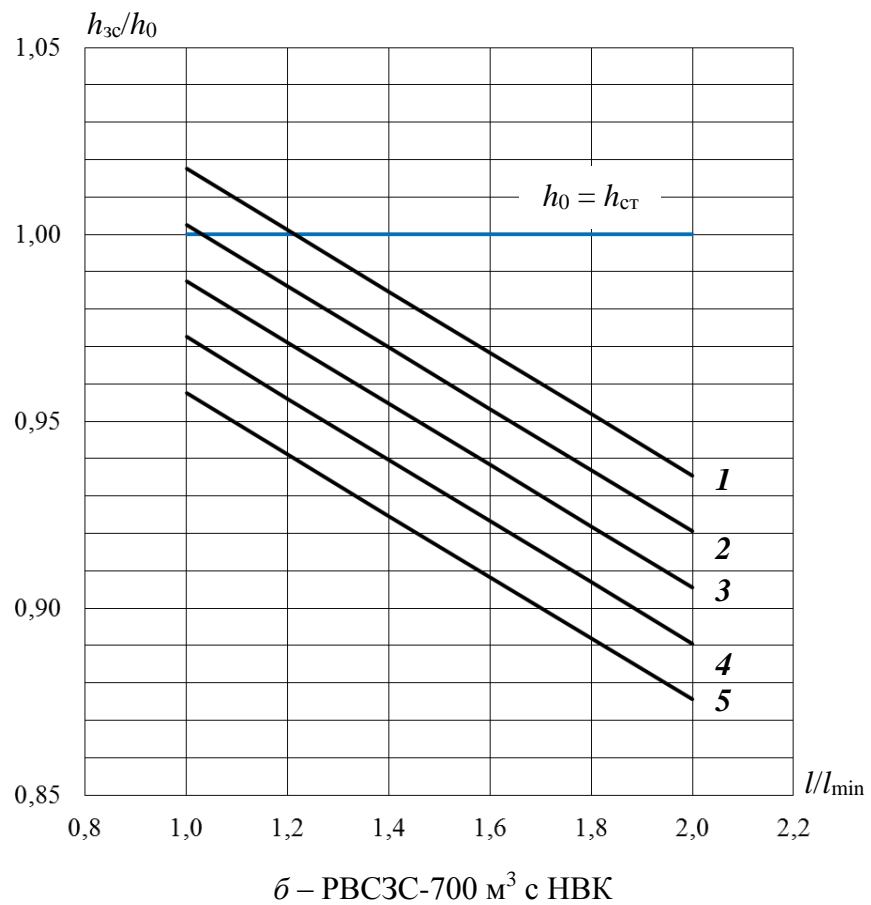
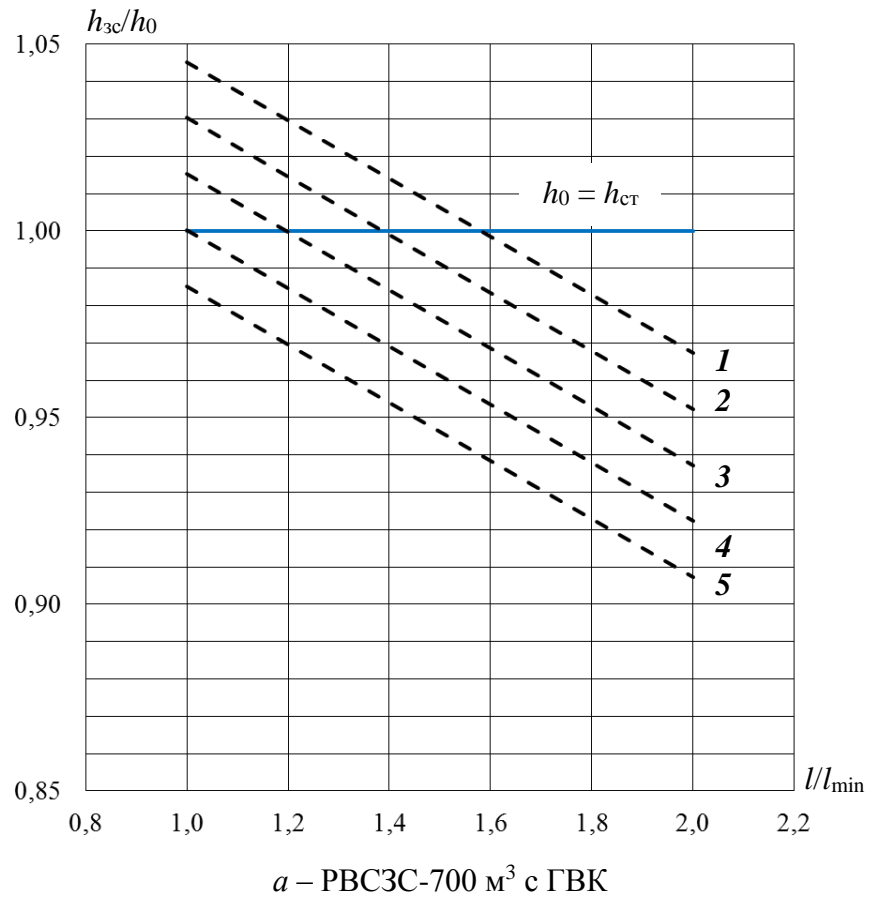
$$\frac{h_{зс}}{h_0} = 1,14 - 0,009 \frac{d_{вн}}{h_0} - 0,082 \frac{l}{l_{\min}} - 0,03 \frac{b_{НВК}}{b_{\min}}, \quad (3.2)$$

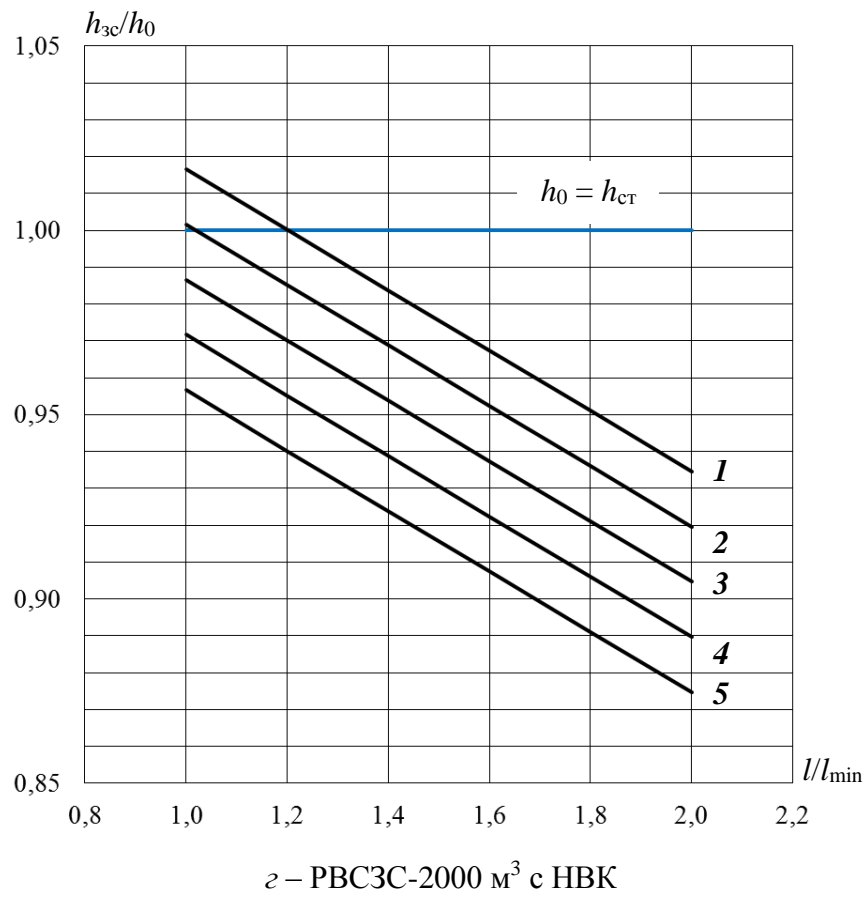
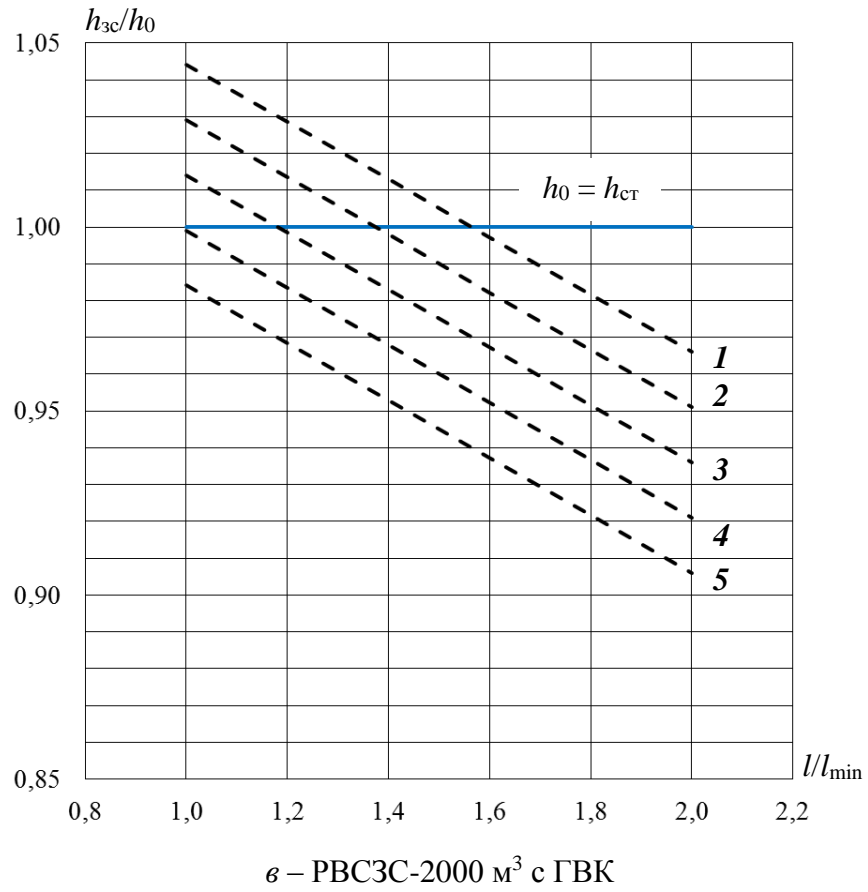
где l_{\min} – минимальное значение межстенного расстояния, численно равное 1,5 м;
 b_{\min} – минимальное значение длины вылета волноотражающего козырька, численно равное 0,5 м.

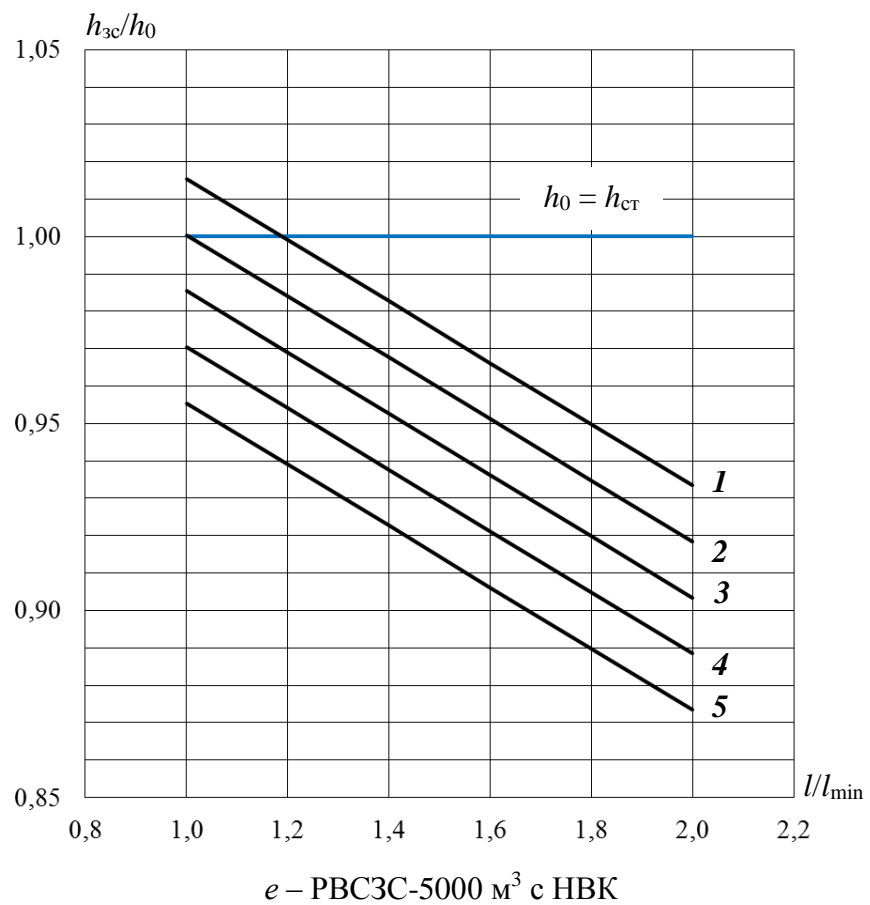
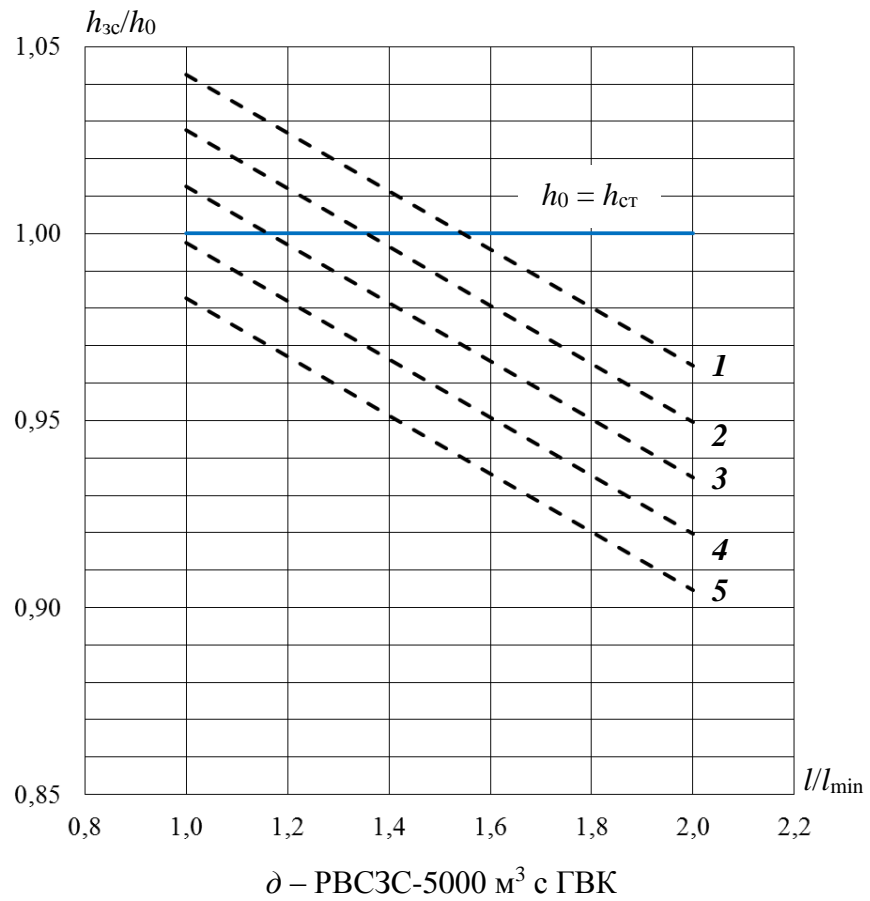
На рисунке 3.2 представлены графические зависимости, построенные по формулам (3.1) и (3.2), для предварительной оценки высоты защитной стенки РВСЗС с ГВК или НВК с целью локализации волны прорыва при квазимгновенном разрушении основного типового резервуара (таблица 3.1).

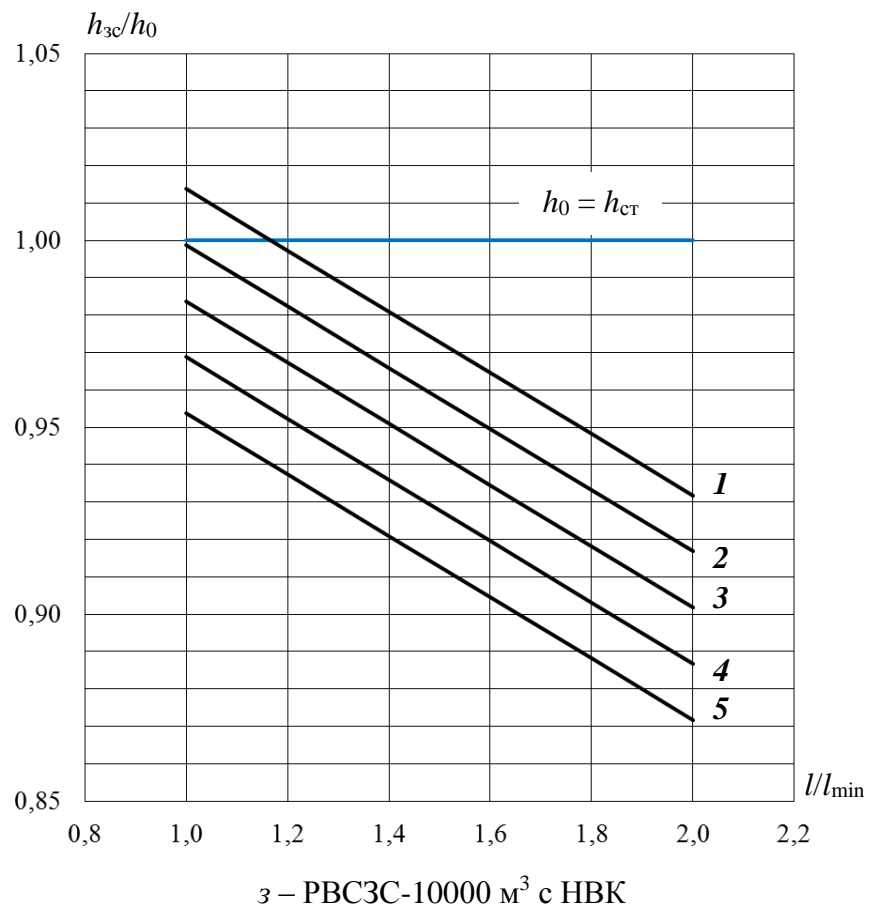
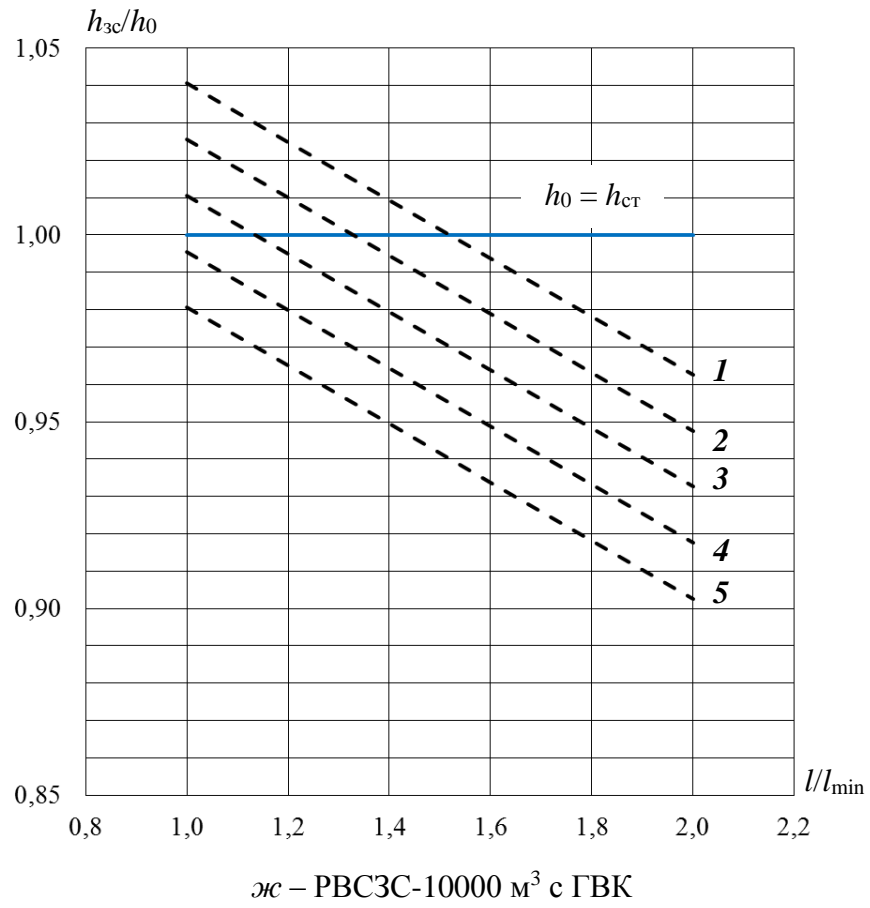
Таблица 3.1 – Параметры типовых резервуаров [50]

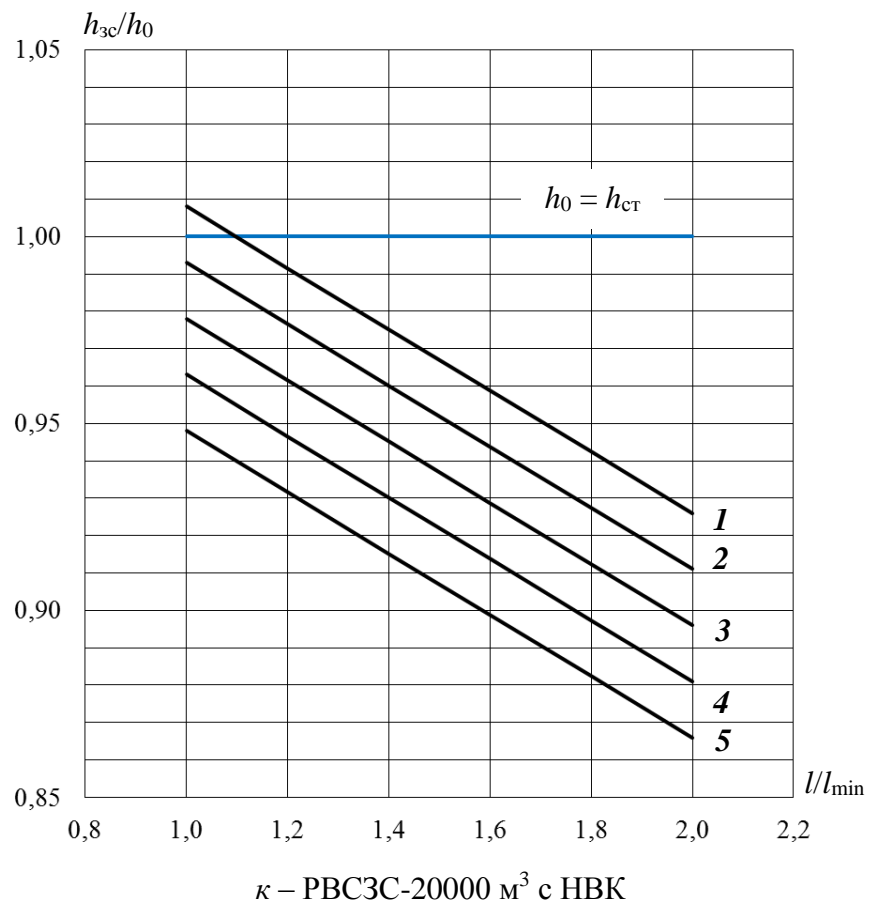
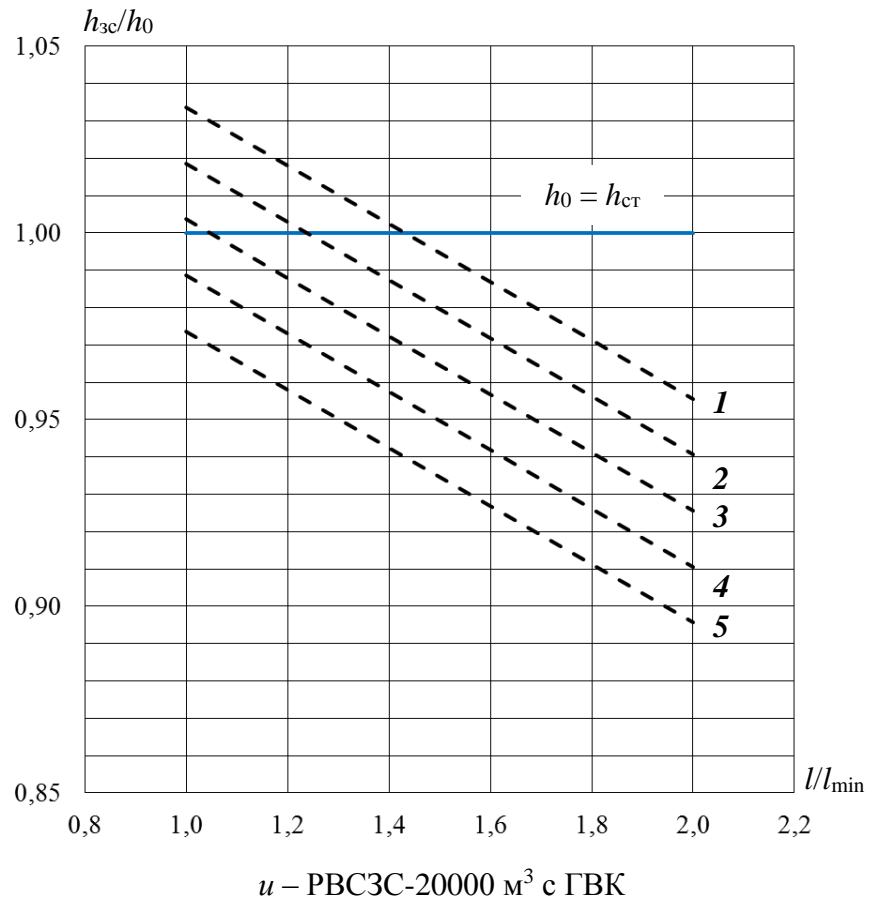
Параметр резервуара	$V_{н}, \text{м}^3$					
	700	2000	5000	10000	20000	30000
$d_{вн}, \text{м}$	10,43	15,18	20,92	28,50	39,90	45,60
$h_{ст}, \text{м}$	9,00	12,00	15,00	18,00	18,00	18,00











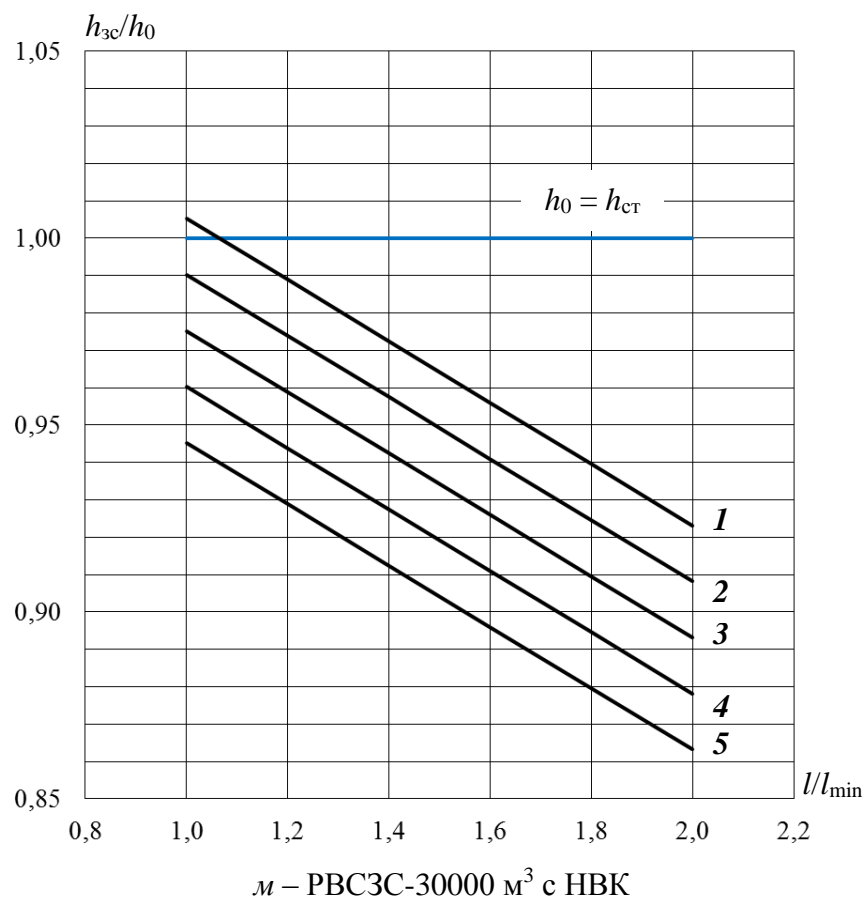
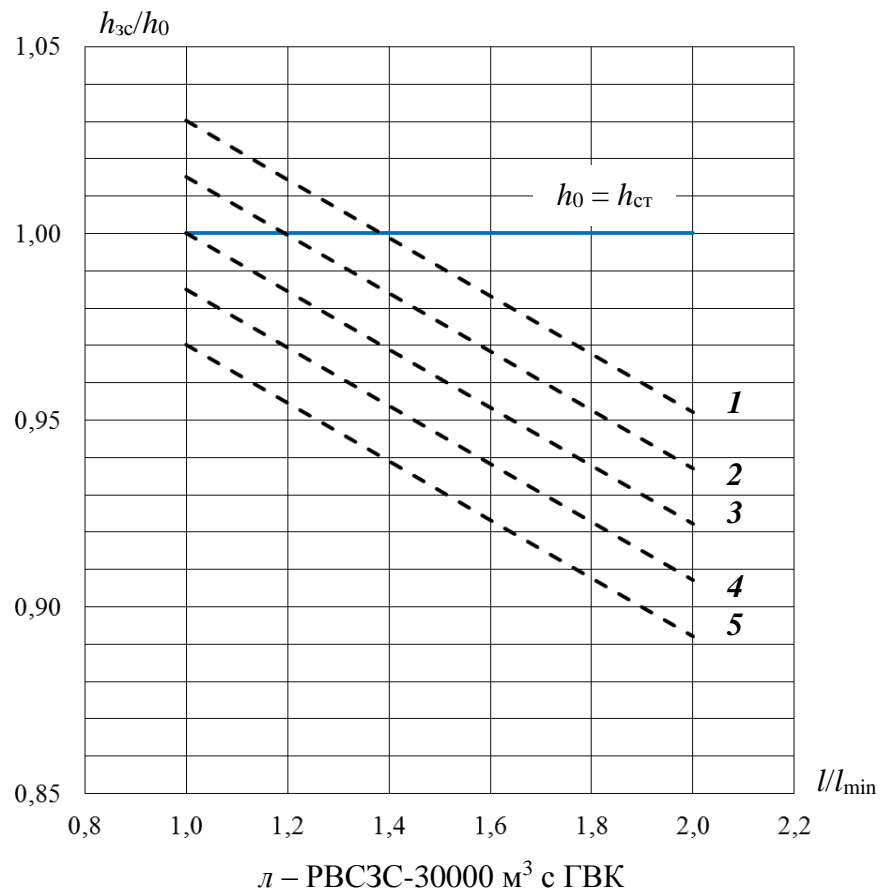


Рисунок 3.2 – Графические зависимости для определения необходимой высоты защитной стенки с ГВК или НВК соответствующей длины вылета:
 1 – 0,5 м; 2 – 0,75 м; 3 – 1 м; 4 – 1,25 м; 5 – 1,5 м

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ современного состояния электроэнергетики, являющейся одной из приоритетных отраслей экономики СРВ показал, что основными производителями электрической энергии являются ГЭС и ТЭС с паротурбинными блоками, работающими на угле, мазуте, дизельном топливе и с комбинированными газопаротурбинными установками. При этом в ближайшие десятилетия на ТЭС будет приходиться до 50 % всей вырабатываемой в стране электрической энергии.

2. В результате анализа территориального размещения ТЭС установлено, что почти все станции (94 %) находятся или проектируются непосредственно в черте плотной застройки населенных пунктов, при этом в 87 % границы их территорий имеют сближения с водными объектами, в основном реками, что обосновывается необходимостью обустройства водоемов-охладителей, приспособленных для отвода значительного количества тепла, образующегося в ходе технологических процессов на ТЭС, а также доставки топлива водным транспортом.

3. Прием, хранение, подогрев, выдача и обезвоживание топлива на ТЭС осуществляется в РВС номинальным объемом от 700 до 30000 м³, которые располагаются в группах, имеющих по периметру замкнутое грунтовое обвалование или железобетонное ограждение, конструктивно выполненное в виде вертикальных стен, рассчитанных на гидростатическое давление пролитой жидкости. При этом примерно на 10 % территорий ТЭС группы РВС не имеют сплошного ограждения, а по периметру отбортованы лишь бордюрным камнем.

4. По результатам анализа статистических данных о разрушениях РВС на объектах ТЭК РФ, а также характерных аварий РВС на объектах ТЭК других стран, в том числе СРВ, доказано, что нормативные ограждения резервуарных парков не способны удержать образующийся в этом случае мощный гидродинамический поток жидкости (волну прорыва), что неоднократно приводило к каскадному развитию аварий или возникновению ЧС, в том числе, экологическим катастрофам, нередко – к гибели и травмам людей.

5. Поскольку большинство эксплуатируемых (проектируемых) резервуарных парков на ТЭС в СРВ находятся (будут находиться) в непосредственной близости к водоемам, в качестве примера выполнено прогнозирование обстановки при разрушении типового РВС-20000 м³ с мазутом на территории действующей ТЭС «О Мон 1» в провинции Кан Тхо в сторону протекающей вблизи р. Хау. Показано, что развитие такого сценария помимо большого экономического ущерба неминуемо приведет к серьезным негативным экологическим последствиям вследствие возможного попадания в реку более 16000 м³ мазута. Кроме этого, при разрушении РВС в сторону противоположную водоему возможно ожидать каскадное развитие аварии (пожара) вследствие вовлечения в инцидент значительного количества различных сооружений и технологического оборудования ТЭС.

6. На основе изучения требований нормативных документов в области пожарной и промышленной безопасности резервуарных парков хранения горючих жидкостей, действующих как в СРВ, так и в РФ, представлена классификация способов, направленных на предотвращение возникновения волны прорыва или ее локализацию в границах ограждения. В результате анализа указанных способов обосновано, что для предотвращения каскадного развития аварий на территориях ТЭС в СРВ наиболее перспективным является способ локализации потока жидкости, основанный на применении РВСЗС, состоящего из основного (внутреннего) резервуара и защитной стенки. При этом выявлено, что требования нормативных документов в области пожарной безопасности как в СРВ, так и в РФ, на проектирование и строительство таких типов резервуаров не распространяются.

7. В результате анализа ранее выполненных исследований по оценке доли жидкости, которая может перелиться через защитную стенку в зависимости от ее высоты и межстенного расстояния установлено, что для полного удержания волны прорыва в границах защитной стенки ее высота должна не менее чем на 10 % превышать максимальный уровень жидкости в основном резервуаре до аварии. Очевидно, что строительство таких высоких защитных стенок экономически нецелесообразно, при этом возможно образование зон взрывоопасных концентраций как в межстенном пространстве резервуара, так и снаружи защитной стенки.

8. Предложен способ снижения высоты защитной стенки на основе обустройства на ней горизонтального или наклонного волноотражающего козырька, обращенного в сторону стенки основного резервуара с учетом его заполнения жидкостью до максимального уровня. Произведена модернизация лабораторного стенда и разработана методика проведения экспериментов по определению необходимой для полного удержания потока жидкости в случае разрушения основного резервуара высоты защитной стенки с обустроенным на ней ГВК или НВК.

9. Экспериментально доказано, что обустройство на защитной стенке ГВК или НВК является эффективным способом, направленным на ее снижение до или ниже максимального уровня жидкости в основном резервуаре, в зависимости от межстенного расстояния и длины вылета волноотражающего козырька:

– независимо от вида волноотражающего козырька его обустройство на защитной стенке позволяет снизить ее высоту ($0,85h_0 \leq h_{zc} \leq 1,05h_0$) относительно ранее установленной требуемой высоты защитной стенки без козырька ($h_{тр} = 1,1h_{ст}$) на всем исследуемом диапазоне межстенных расстояний (от 1,5 до 3 м);

– независимо от вида волноотражающего козырька и длины его вылета (от 0,5 до 1,5 м) высота защитной стенки будет превышать нормативно установленное значение ($h_n = 0,8h_{ст}$), а также высоту защитной стенки без козырька, рассчитанную на гидростатическое удержание пролитого продукта, на всем исследуемом диапазоне межстенных расстояний;

– наиболее эффективным является обустройство на защитной стенке НВК, позволяющего в диапазоне межстенного расстояния от 1,8 до 3 м с учетом длины его вылета существенно снизить высоту защитной стенки ($0,85h_0 \leq h_{zc} \leq h_0$), а в диапазоне от 1,5 до 3 м – до 5 % по сравнению с обустройством ГВК.

10. В результате обработки опытных данных методом многофакторного регрессионного анализа получены эмпирические формулы для определения необходимой высоты защитной стенки для полного удержания потока жидкости в зависимости от геометрических параметров основного резервуара номинальным объемом от 700 до 30000 м³, межстенного расстояния (от 1,5 до 3 м) и длины вылета волноотражающего козырька (от 0,5 до 1,5 м) соответствующего вида.

11. Разработаны рекомендации по определению оптимальных геометрических параметров защитной стенки с ГВК (НВК) РВСЗС с целью предотвращения каскадного развития аварии (пожара) или ЧС в резервуарном парке ТЭС в СРВ, при этом обустройство дополнительного ограждения не требуется, поскольку вся жидкость при возможном разрушении основного резервуара будет удерживаться предложенной конструкцией преграды. Кроме этого, такое ограждение будет частично или полностью выполнять роль погодозащитного козырька, нормативно рекомендуемого к установке на РВСЗС для перекрытия межстенного расстояния. В тоже время необходимо обеспечить устойчивость защитной стенки не только к гидродинамическому воздействию потока жидкости, но и возможному динамическому влиянию разрушающихся при аварии основного резервуара конструкций, что может являться предметом дальнейших научных исследований.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСФ – аварийно-спасательные формирования

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

ГВК – горизонтальный волноотражающий козырек, обустраиваемый на защитной стенке РВСЗС под углом к ней в 90°, обращенный в сторону основного РВС

ГРЭС – государственная районная электростанция

ГЭС – гидроэлектростанция

НВК – наклонный волноотражающий козырек, обустраиваемый на защитной стенке РВСЗС под углом к ней в 135°, обращенный в сторону основного РВС

ПБТП – кафедра пожарной безопасности технологических процессов Академии государственной противопожарной службы МЧС России

ПЭР – полимерный эластичный резервуар

РВС – резервуар вертикальный цилиндрический стальной

РВСЗС – резервуар вертикальный цилиндрический стальной с защитной стенкой, состоящий из основного (внутреннего) резервуара со стационарной или плавающей крышей и наружного защитного резервуара (резервуар типа «стакан в стакане»)

РВСЗСП – резервуар вертикальный цилиндрический стальной с защитной стенкой с понтоном

РВСПК – резервуар вертикальный цилиндрический стальной с плавающей крышей

РГС – резервуар горизонтальный стальной

СНГ – Содружество Независимых Государств

СРВ – Социалистическая Республика Вьетнам

СССР – Союз Советских Социалистических Республик

ТЭК – топливно-энергетический комплекс

ТЭС – тепловая электростанция

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль

ЧС – чрезвычайная ситуация

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об основных направлениях «Национальной стратегии развития энергетики Вьетнама на период до 2030 г., в долгосрочной перспективе – до 2045 г.» [Электронный ресурс]: резолюция Политбюро ЦК КПВ от 11 февраля 2020 г. № 55-NQ/TW. – Режим доступа: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/EN/Tai-nguyen-Moi-truong/Resolution-55-NQ-TW-2020-orientations-of-strategy-for-national-energy-development/519058/tieng-anh.aspx> (дата обращения: 10.04.2023).

2. Нгуен, А.Ф. Роль энергетического комплекса в обеспечении устойчивого развития экономики Социалистической Республики Вьетнам [Текст] / А.Ф. Нгуен // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 8. – С. 84–86.

3. Та, В.Т. Развитие энергетики Вьетнама [Электронный ресурс] / В.Т. Та, Х.М. Ха, О.Л. Ташлыков // Сб. научн. тр.: Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2021. – С. 504–509. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/106199/1/978-5-7996-3379-0_2021_115.pdf (дата обращения: 20.03.2023).

4. Нгуен, А.Ф. Государственная энергетическая политика Социалистической Республики Вьетнам [Текст] / А.Ф. Нгуен // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2022. – № 9(213). – С. 54–60. DOI: 10.33285/1999-6942-2022-9(213)-54-60.

5. Statistical Review of World Energy 2020 [Electronic resource] / BP. 69th edition. 68 p. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> (date of access: 01.04.2023).

6. Statistical Review of World Energy 2021 [Electronic resource] / BP. 70th edition. 72 p. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (date of access: 01.04.2023).

7. Statistical Review of World Energy 2022 [Electronic resource] / BP. 71st edition. 60 p. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (date of access: 01.04.2023).

8. EVN Annual Report 2021 [Electronic resource] / EVN. 29 p. URL: https://www.evn.com.vn/userfile/User/tcdl/files/EVNAnnualReport2021%20final%202022_10_2021.pdf (date of access: 15.04.2023).

9. Кхук, Н.Д. Современные вопросы развития гидроэнергетики в Социалистической Республике Вьетнам (СРВ) [Текст] / Н.Д. Кхук // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – № 10-2(73). – С. 91–99. DOI: 10.24412/2500-1000-2022-10-2-91-99.

10. Нгуен, А.Ф. Вызовы и возможности развития топливно-энергетического комплекса Вьетнама [Текст] / А.Ф. Нгуен // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 4. – С. 309–312.

11. Нгуен, Х.Х. Роль гидроэнергетики в энергосистеме Вьетнама при активном развитии солнечной энергетики [Электронный ресурс] / Х.Х. Нгуен // Vietnam Energy Online. URL: <https://nangluongvietnam.vn/vai-tro-cua-thuy-dien-trong-he-thong-khi-vietnam-phat-trien-manh-dien-mat-troi-25978.html> (дата обращения: 03.02.2023).

12. Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения [Текст] / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. – М.: Стройиздат, 1968. – 206 с.

13. Розенштейн, И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров [Текст] / И.М. Розенштейн. – М.: Недра, 1995. – 253 с.

14. 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.

15. Прохоров, В.А. Оценка параметров безопасности эксплуатации нефтехранилищ в условиях Севера [Текст] / В.А. Прохоров. – М.: Недра-Бизнесцентр, 1999. – 142 с.

16. Аварии резервуаров и способы их предупреждения [Текст]: учеб. пособие / В.Б. Галеев [и др.]; под ред. В.Б. Галеева и Р.Г. Шарафиева. – Уфа: Уфимский полиграфкомбинат, 2004. – С. 5–18.

17. Землянский, А.А. Принципы конструирования и экспериментально-теоретические исследования крупномасштабных резервуаров нового поколения [Текст] / А.А. Землянский. – Саратов: СГТУ, 2005. – 324 с.
18. Маршалл, В. Основные опасности химических производств [Текст] / В. Маршалл; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
19. 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. – С. 2–6.
20. 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. – С. 3–7.
21. Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций [Текст] / Я. Аугустин, Е. Шледзевский; пер. с польск. – М.: Стройиздат, 1978. – 183 с.
22. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков. – М.: Недра, 1984. – С. 12–14.
23. Политика предотвращения техногенных аварий и катастроф [Текст] / Под ред. М.И. Фалеева. – М.: Институт риска и безопасности, 2002. – 316 с.
24. Владимиров, В.А. Катастрофы и экология [Текст]: монография / В.А. Владимиров, В.И. Измалков. – М.: Наука, 2000. – 380 с.
25. Брусневич, Х. Пожары резервуаров с нефтепродуктами – факты и опыт [Текст] / Х. Брусневич. – М.: Недра, 1986. – 134 с.
26. Шкинев, А.Н. Аварии в строительстве [Текст] / А.Н. Шкинев. – М.: Стройиздат, 1984. – 284 с.
27. Corbo L. Raffinerie brand in Stalien [Text] / L. Corbo // Brand aus. – 1986. – В. 90. – № 1. – Р. 392–394.
28. Пожар на нефтехранилище [Текст] // Пожарное дело. – 1986. – № 11. – С. 28–29.
29. Groktener in «feuerseherem» tank [Text] // Gefoikrliche Jadung. – 1983. – № 12. – Р. 520–521.
30. Analysis of a tank fire «Olassic» [Text] // Fire Engineers journal. – 1987. – № 3. – Р. 15–17.

31. Сафарян, М.К. Современное состояние резервуаростроения и перспективы его развития [Текст]: экспресс-информ. / М.К. Сафарян. – М.: ЦНИИТ-Энефтехим: Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1972. – 82 с.
32. Исследование причин разрыва резервуара [Текст] / Пер. с англ. Д.Л. Чернов // Реферативный журнал: Пожарная охрана. – 1988. – № 23. – С. 16.
33. Explosionen, Verpuffungen, Brände bei Arbeiten an Tanks [Text] // Eisen and Stahl. – 1981. – № 10. – P. 384–391.
34. Авария большого резервуара в Японии [Текст] / Пер. с англ. Ж. Хайкан Гидзюцу, 1975. – Т. 8. – № 5.
35. Трагические дни [Текст] // Пожарное дело. – 1972. – № 2. – С. 26–29.
36. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 398 с.
37. Швырков, С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара [Текст]: монография / С.А. Швырков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 289 с.
38. Самоделова, С. Очевидец начала ЧП в Норильске [Электронный ресурс] / С. Самоделова. – Режим доступа: <https://www.mk.ru/incident/2020/06/04/ochevidec-nachala-chp-v-norilske-tyanulas-reka-topliva.html> (дата обращения: 10.02.2023).
39. Кухмарь, К. Ростехнадзор назвал причиной аварии на ТЭЦ в Норильске нарушение эксплуатации резервуара [Электронный ресурс] / К. Кухмарь. – Режим доступа: <https://tass.ru/proisshestviya/9960693> (дата обращения: 11.02.2023).
40. Кожевников, Д. Разлив нефтепродуктов на ТЭЦ в Норильске. Главное [Электронный ресурс] / Д. Кожевников. – Режим доступа: <https://tass.ru/proisshestviya/8638891> (дата обращения: 21.01.2023).
41. Коптев, Д.П. Норильский разлив: уроки и последствия [Текст] / Д.П. Коптев // Бурение и нефть. – 2020. – № 7–8. – С. 3–9.
42. Зайцев, А.М. Причины и последствия аварии на складе ГСМ ТЭЦ-3 города Норильска [Текст] / А.М. Зайцев, С.Г. Тульская, К.А. Складчиков // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2021. – № 3(24). – С. 38–42.

43. Колесников, В. Смыло битумом. Какие уроки надо вынести из аварии с рухнувшим резервуаром [Электронный ресурс] / В. Колесников // Еженедельник Аргументы и Факты. – 2022. – № 11. – Режим доступа: https://penza.aif.ru/society/smylo_bitumom_kakie_uroki_nado_vynesti_iz_avarii_s_ruhnuvshim_rezervuarom (дата обращения: 30.03.2023).

44. Резервуар с битумом в Пензе был официально выведен из эксплуатации – Ростехнадзор. Происшествия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://penzanews.ru/incidents/151803-2022> (дата обращения: 30.03.2023).

45. Взрыв резервуара с битумом в Пензе попал на видео. Происшествия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ria.ru/20220309/razgermetizatsiya-1777302323.html> (дата обращения: 30.03.2023).

46. «Вид Армагеддона». Разгерметизация емкости с битумом в Пензе. Ужасающая картина средствами аэрофотографии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://penza-post.ru/news/09-03-2022/80993#RL> (дата обращения: 30.03.2023).

47. 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). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

48. 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. пр. № 2) // Режим доступа: <http://rustank.ru/standard/> (дата обращения: 15.02.2023).

49. ИД-2010. Изменения и дополнения к СТО-СА-03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [Электронный ресурс]: изм. и доп. (утв. решением НТС НО Ассоциация «Ростехэкспертиза» от 17.11.2010 г. № 5) // Режим доступа: <http://rustank.ru/standard/> (дата обращения: 15.02.2023).

50. 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). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

51. TCVN 5684:2003. Пожарная безопасность нефтяных сооружений. Общие требования [Электронный ресурс]: государственный стандарт министерства науки и технологий Вьетнама (2003). – Режим доступа: <https://vanbanphapluat.co/tcvn-5684-2003-an-toan-chay-cac-cong-trinh-dau-mo-va-san-pham-dau-mo> (дата обращения: 15.01.2023).

52. 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). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

53. 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: 15.03.2023).

54. Швырков, А.С. Нормирование требований пожарной безопасности к геометрическим параметрам ограждений резервуаров типа «стакан в стакане» [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Швырков Александр Сергеевич. – М., 2020. – 141 с.

55. Швырков, С.А. Технологии предотвращения чрезвычайных ситуаций при авариях резервуаров с нефтью и нефтепродуктами [Текст] / С.А. Швырков, К.Т. Буй, В.В. Воробьев, Е.А. Афанасьев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 3. – С. 11–19. DOI: 10.25257/FE.2020.3.11-19.

56. Буй, К.Т. Проблемы локализации разливов нефтепродуктов при авариях резервуаров на объектах нефтегазовой промышленности Вьетнама и России [Текст] / К.Т. Буй // Материалы 30-ой Международной научн.-технич. конф.: Системы безопасности – 2021. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 47–51.

57. Буй, К.Т. Актуальные вопросы пожарной безопасности при проектировании резервуаров с защитной стенкой на объектах нефтегазовой отрасли России и Вьетнама [Текст] / К.Т. Буй, С.А. Швырков // Материалы I Международной научн.-практич. конф.: Система безопасности. – Улан-Батор: Университет Внутренних Дел Монголии, 2021. – С. 116–121.

58. 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: 16.03.2023).

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

60. 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.

61. 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.

62. 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.

63. 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.

64. 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: 08.02.2023).

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

66. Барвинко, А.Ю. Повышение работоспособности двойного днища двухстенных 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.

67. 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.

68. 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.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России. – 2013. – № 2. – С. 68–75.

69. Хиль, Е.И. Противопожарная защита резервуаров с дополнительной защитной стенкой [Электронный ресурс] / Е.И. Хиль, Д.Л. Бастриков, С.С. Воевода, А.Ф. Шароварников // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 3(55). – 4 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-3/16-03-14.ttb.pdf> (дата обращения: 09.03.2023).

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

71. Рубцов, Д.Н. О развитии пожара в резервуаре типа «стакан в стакане» с нефтью и нефтепродуктами [Электронный ресурс] / Д.Н. Рубцов, М.С. Шалымов // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 3(67). – 8 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/23-03-16.ttb.pdf> (дата обращения: 09.03.2023).

72. Рубцов, Д.Н. Огневые испытания защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» при воздействии на нее тепловых нагрузок от пожара в основном резервуаре [Текст] / Д.Н. Рубцов, А.Н. Егоров, В.В. Рубцов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 1. – С. 25–31. DOI: 10.25257/FE.2019.1.25-31.

73. 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.

74. 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.

75. Швырков, С.А. Актуальные вопросы нормирования требований пожарной безопасности к защитной стенке нефтяных резервуаров типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / С.А. Швырков, С.А. Горячев, А.С. Швырков // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 3. – 8 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/32-03-16.ttb.pdf> (дата обращения: 16.03.2023).

76. 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.

77. Швырков, С.А. Лабораторное моделирование волны прорыва при разрушении резервуара типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / С.А. Швырков, С.А. Горячев, В.В. Воробьев, А.С. Швырков // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 2. – 8 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/23-02-17.ttb.pdf> (дата обращения: 16.03.2023).

78. Швырков, С.А. Исследование параметров волны прорыва при разрушении резервуаров объемом до 30000 м³ в лабораторных условиях [Текст] / С.А. Швырков, С.В. Пузач, С.А. Горячев, А.С. Швырков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 1. – С. 12–18. DOI: 0.25257/FE.2019.1.12-18.

79. 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.

80. 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.

81. 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.

82. Нгуен, Д.Д. Решения для реализации обязательств Вьетнама по достижению нулевых выбросов к 2050 году [Электронный ресурс] / Д.Д. Нгуен // Banking review. URL: <https://tapchinganhang.gov.vn/giai-phap-thuc-hien-cam-ket-phet-thai-rong-bang-0-net-zero-va-o-nam-2050-cua-viet-nam.htm> (date of access: 10.02.2023).

83. Рыжкин, В.Я. Тепловые электрические станции [Текст]: учебник для вузов / Под ред. В.Я. Гиршфельда. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

84. О пожарной безопасности [Электронный ресурс]: закон Социалистической Республики Вьетнам от 29 июня 2001 г. № 27/2001/QН10. – Режим доступа: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Luat-phong-chay-chua-chay-2001-47923.aspx> (дата обращения: 15.04.2023).

85. TCVN 5307:2009. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования к проектированию [Электронный ресурс]: государственный стандарт министерства науки и технологий Вьетнама (2009). – Режим доступа: <https://vanbanphapluat.co/tcvn-5307-2009-kho-dau-mo-va-san-pham-dau-mo-yeu-cau-thiet-ke> (дата обращения: 15.04.2023).

86. QCVN 11:2012/VСТ. О допустимых уровнях риска при количественной оценке рисков для нефтегазовой, нефтяной, химической и теплоэнергетической

деятельности [Электронный ресурс]: национальный технический регламент министерства науки и технологий Вьетнама (2012). – Режим доступа: <https://thuvienphapluat.vn/TCVN/Cong-nghiep/QCVN-11-2012-VCT-rui-ro-char-nhan-duoc-cac-hoat-dong-da-u-khi-xang-dau-ho-a-chat-906566.aspx> (дата обращения: 15.03.2023).

87. Положение о формировании и содержании документов по управлению безопасностью при нефтегазовой деятельности [Электронный ресурс]: циркуляр министерства промышленности и торговли Социалистической Республики Вьетнам от 30 октября 2018 г. №: 40/2018/ТТ-ВСТ. – Режим доступа: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Thong-tu-40-2018-TT-VCT-hay-dung-va-noi-dung-tai-lieu-quan-ly-an-toan-trong-hoat-dong-dau-khi-385466.aspx> (дата обращения: 15.03.2023).

88. О безопасности нефтегазовых работ на суше [Электронный ресурс]: постановление Правительства Социалистической Республики Вьетнам от 11 февраля 2011 г. № 13/2011/ND-CP. – Режим доступа: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/tai-nguyen-moi-truong/nghi-dinh-13-2011-nd-cp-an-toan-cong-trinh-dau-khi-118681.aspx> (дата обращения: 10.04.2023).

89. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [Электронный ресурс]: федер. закон РФ от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ: (в ред. от 4 ноября 2022 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

90. Об утверждении Правил формирования и утверждения перечня потенциально опасных объектов [Электронный ресурс]: постановление Правительства РФ от 10 июля 2021 г. № 1155. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

91. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений [Электронный ресурс]: федер. закон РФ от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ (в ред. от 2 июля 2013 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

92. Градостроительный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]: федер. закон РФ от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (в ред. от 28 апреля 2023 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

93. Об утверждении порядка выдачи заключения о готовности потенциально опасного объекта к локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций и достаточности мер по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций [Электронный ресурс]: приказ МЧС России от 26 мая 1999 г. № 284. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

94. Об утверждении Правил разработки критериев отнесения объектов всех форм собственности к потенциально опасным объектам [Электронный ресурс]: постановление Правительства РФ от 14 августа 2020 г. № 1226. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

95. Об утверждении Правил формирования и утверждения перечня потенциально опасных объектов [Электронный ресурс]: постановление Правительства РФ от 10 июля 2021 г. № 1155. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

96. Об утверждении Обязательных для выполнения требований к потенциально опасным объектам в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [Электронный ресурс]: приказ МЧС России от 10 октября 2022 г. № 994. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

97. Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации, а также о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации [Электронный ресурс]: постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 2451. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

98. О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [Электронный ресурс]: постановление Правительства РФ от 21 мая 2007 г. № 304. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

99. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ: (в ред. от 14 июля 2022 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

100. Швырков, С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара [Текст]: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.26.03 / Швырков Сергей Александрович. – М., 2013. – 355 с.

101. Локализация разлива нефтепродуктов на нефтебазе «Льен Чиёу» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nhandan.vn/tin-tuc-xa-hoi/khac-phuc-su-co-tran-dau-tai-kho-va-cang-xang-lien-chieu-596816/> (дата обращения: 19.02.2023).

102. Швырков, С.А. Методика прогнозирования площадей разливов нефти и нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных резервуаров [Текст] / С.А. Швырков, С.В. Батманов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2008. – № 1. – С. 117–124.

103. Расчетное определение параметров аварийного разлива нефти и нефтепродуктов при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара [Текст]: методические указания № П4-05 С-004 М-001 (утв. Приказом от 18 сентября 2006 г. № 242). – М.: «НК «РОСНЕФТЬ», 2006. – 36 с.

104. 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.

105. Spill Behavior, Detection, and Mitigation for Emerging Nontraditional Marine Fuels [Text]: the report of Buildings and Transportation Science Division. ORNL/SPR-2021/1837 / M.D. Kass, C.S. Sluder, B.C. Kaul. – Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2021. – 43 p.

106. Heavy Fuel Oil (HFO) [Text]: a review of fate and behaviour of HFO spills in cold seawater, including biodegradation, environmental effects and oil spill response. TemaNord 2018:549 / J. Fritt-Rasmussen [at all.]. – Nordic Council of Ministers / Publication Unit Ved Stranden, 18, DK-1061, Copenhagen, K, Denmark, 2018. – 92 p.

107. Ресурсы поверхностных вод в провинции Ан Жанг [Электронный ресурс]: Департамент природных ресурсов и окружающей среды провинции Ан Жанг (СРВ). – Режим доступа: https://sotainguyenmt.angiang.gov.vn/TongQuan_TNN1.aspx#:~:text=%2B%20S%C3%B4ng%20H%E1%BA%ADu%3A%20n%E1%BA%B1m%20v%E1%BB%81%20ph%C3%ADa,%E2%80%93%20%2C98m%2Fs (дата обращения: 15.04.2023).

108. ГОСТ Р 53324-2009. Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: национальный стандарт Российской Федерации (введ. в действ. Приказом Ростехрегулирования от 18.02.2009 г. № 100-ст). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

109. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 24.04.2013 г. № 288). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

110. Примеры успешного применения мягких резервуаров в различных отраслях [Электронный ресурс]: обзор продукции ООО «НПФ «Политехника». – режим доступа: <https://poli.ru/articles/primery-uspeshnogo-primeneniya-myagkikh-rezervuarov-v-razlichnykh-otraslyakh/> (дата обращения: 20.05.2023).

111. Рекомендации по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтепродуктообеспечения, расположенных на селитебной территории [Текст]: рекомендации. – М.: ГУГПС МВД России, ВНИИПО МВД России, 1997. – 50 с.

112. Юрьев, Я.И. Огнестойкость монолитных железобетонных ограждающих стен резервуарных парков [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Юрьев Ян Игоревич. – М., 2018. – 152 с.

113. Швырков, С.А. Огнестойкость ограждений резервуаров из монолитного железобетона [Текст]: монография / С.А. Швырков, Я.И. Юрьев, Д.Н. Приступок. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. – 133 с.

114. API STD 650:2001. Сварные стальные резервуары для хранения нефти [Электронный ресурс]: стандарт Американского института нефти (American Petroleum Institute) // Режим доступа: <http://gazovik-pgo.ru/cat/articles2/api650> (дата обращения: 10.02.2023).

115. BS EN 14015:2004. 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 (AMD Corrigendum 15597) [Text]. – London: British Standards Institution, 2004. – 250 p.

116. Чайка, П. Резервуары для хранения объемом 100000 м³ на сырьевой базе St-1 в Адамове [Электронный ресурс] / П. Чайка. – Режим доступа: <https://silo.tips/download/zbiorniki-magazynowe-o-pojemnosi-m-3-w-bazie-surowcowej-st-1-w-adamowie> (дата обращения: 13.02.2023).

117. Больше танков PERN в Гданьске [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://biznes.trojmiasto.pl/Kolejne-zbiorniki-PERN-w-Gdansku-n150539.html> (дата обращения: 13.02.2023).

118. Small Terminal Growing up Fast [Electronic resource] // THE WORLD OF OILTANKING. – 2015. – Vol. 27/2. – Pp. 6, 7. – Режим доступа: https://www.oiltanking.com/fileadmin/oiltanking-relaunch/downloads/connections/Oiltanking_Connections-Magazine_No-27-2_2015-August_en.pdf (дата обращения: 15.02.2023).

119. Петербургский нефтяной терминал получил разрешение на ввод резервуара объемом 40 тыс. м³ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.oilterminal.ru/company/news/item/peterburgskiy-neftyanoy-terminal-poluchil-razreshenie-na-vvod-rezervuara-na-40-tys-m3/> (дата обращения: 15.02.2023).

120. Якубьяк, А. Пожар на Гданьском НПЗ [Электронный ресурс] / А. Якубьяк. – Режим доступа: https://strazacki-pl.translate.google.com/акcje/pozar-w-rafinerii-gdanskiej?_x_tr_sl=pl&_x_tr_tl=vi&_x_tr_hl=vi&_x_tr_pto=wapp (дата обращения: 15.01.2023).

121. Милох, М. Пожар на НПЗ потушен [Электронный ресурс] / М. Милох. – Режим доступа: <https://www.trojmiasto.pl/wiadomosci/Pozar-w-rafinerii-ugaszony-n7441.html> (дата обращения: 15.01.2023).

122. Тхань, К. Кханьхоа: крупный план волнолома стоимостью 88 млрд донгов на пляже Доклет [Электронный ресурс] / К. Тхань // Молодежь онлайн. – Режим доступа: <https://thanhvien.vn/khanh-hoa-can-canh-ke-chan-song-88-ti-dong-gau-quan-ngai-o-bai-bien-doc-let-post1398816.html> (дата обращения: 02.02.2023).

123. Серебряков, Г.Б. Обзор методов берегозащиты на Черноморском побережье России [Электронный ресурс] / Г.Б. Серебряков, Н.А. Гришин // Архитектура Сочи. – 2012. – № 10. – Режим доступа: <https://arch-sochi.ru/2012/10/obzor-metodov-beregozashhityi-na-chernomorskom-poberezhe-rossii/> (дата обращения: 05.03.2023).

124. Кленов, Б.С. Энергогасящий ограничитель наката волн [Текст] / Б.С. Кленов // Волновые воздействия на гидротехнические сооружения и берега: Сб. научн. тр. / ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1987. – С. 14–21.

125. Давлетшин, В.Х. Крупномасштабные исследования отражения волн посредством криволинейного козырька [Текст] / В.Х. Давлетшин, Н.А. Голуб // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 11. – С. 32–36.

126. 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.

127. Greenspane, H.P. Flow over a containment dyke [Text] / H.P. Greenspane, R.E. Young // J. Fluid Mechanics. – 1978. – Vol. 87. – Part 1. – P. 179–192.

128. 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.

129. 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). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

130. 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). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

131. 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.

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

133. 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.

134. Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов [Текст] / В.Т. Чоу. – М.: Стройиздат, 1969. – 464 с.
135. Полтавцев, В.И. Гидрологическое лабораторное моделирование [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Полтавцев [и др.]. – Л.: ЛГМИ, 1982. – 143 с.
136. Богомолов, А.И. Гидравлика [Текст]: учебн. для вузов / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.
137. 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.
138. Леви, И.И. Моделирование гидравлических явлений [Текст] / И.И. Леви. – Л.: Энергия, 1967. – 235 с.
139. Лятхер, В.М. Исследования открытых потоков на напорных моделях [Текст] / В.М. Лятхер, А.М. Прудовский. – М.: Энергия, 1971. – 288 с.
140. Лятхер, В.М. Гидравлическое моделирование [Текст] / В.М. Лятхер, А.М. Прудовский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 392 с.
141. Лабораторные работы по гидротехническим сооружениям [Текст]: учеб. для вузов / Под ред. Н.П. Розанова. – М.: Агропромиздат, 1989. – 208 с.
142. Панова, М.В. Лабораторный практикум по гидравлике [Текст]: учеб. пособие для вузов / М.В. Панова. – М.: Энергия. – 1969. – 128 с.
143. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / Под ред. П.Г. Киселева; изд. 5-е. – М.: Энергия, 1974. – 312 с.
144. ЩигOLEв, Б.М. Математическая обработка наблюдений [Текст]: учебник / Б.М. ЩигOLEв; изд. 3-е. – М.: Наука, 1969. – 344 с.
145. Юдин, Ю.В. Организация и математическое планирование эксперимента [Текст]: учеб. пособие / Ю.В. Юдин, М.В. Майсурадзе, Ф.В. Водолазский. – Екатеринбург: Изд.-во Урал. ун-та, 2018. – 124 с.
146. Макаричев, Ю.А. Методы планирования эксперимента и обработки данных [Текст]: учеб. пособие / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

147. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учебник / В.Е. Гмурман; 12-е изд. – М.: Изд. Юрайт, 2015. – 479 с.

148. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учебник / Н.Ш. Кремер; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

149. Ниворожкина, Л.И. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб. пособие / Л.И. Ниворожкина, З.А. Морозова. – М.: Эксмо, 2008. – 432 с.

150. Тюрин, Ю.Н. Анализ данных на компьютере [Текст]: учеб. пособие / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров; под ред. В.Э. Фигурнова; 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Инфра-М, 2002. – 528 с.

151. Катранов, А.Г. Компьютерная обработка данных экспериментальных исследований [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Катранов, А.В. Самсонова. – СПб: СПб ГУФК им. П.Ф. Лесгафта, 2005. – 131 с.

152. Симчера, В.М. Методы многомерного анализа статистических данных [Текст]: учеб. пособие / В.М. Симчера. – М.: Финансы и статистика, 2008. – 400 с.

153. Пен, Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion [Текст] / Р.З. Пен. – Красноярск: Сибирский гос. техн. ун-т, 2014. – 291 с.

154. Трофимова, Е.А. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб. пособие / Е.А. Трофимова, Н.В. Кисляк, Д.В. Гилев; под. ред. Е.А. Трофимовой. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 160 с.

155. Семенов, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб. пособие. Стандарт третьего поколения / В.А. Семенов. – СПб.: Питер, 2013. – 192 с.

156. Буй, К.Т. Влияние горизонтального волноотражающего козырька на высоту защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» [Текст] / К.Т. Буй, С.А. Швырков // Материалы VIII Международной научн.-практич. конф.: Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации; в 2 ч. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2022. – Ч. 1. – С. 37–43.

157. Буй, К.Т. Горизонтальный волноотражающий козырек для снижения высоты защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» [Текст] / К.Т. Буй, С.А. Швырков, В.В. Воробьев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – № 1. – С. 48–56. DOI: 10.25257/FE.2022.1.48-56.

158. Буй, К.Т. Влияние наклонного волноотражающего козырька на высоту защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» [Текст] / К.Т. Буй, С.А. Швырков // Материалы XI Международной научн.-практич. конф.: Проблемы техносферной безопасности – 2022. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 29–35.

159. Буй, К.Т. Наклонный волноотражающий козырек для снижения высоты защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / К.Т. Буй, С.А. Швырков, В.В. Воробьев, Л.Т. Панасевич // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 2(69). – 12 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2022-2/12-02-22.ttb.pdf>. DOI: 10.25257/TTS.2022.2.96.8-19 (дата обращения: 15.04.2023).

160. Буй, К.Т. Влияние наклона волноотражающего козырька на высоту защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» [Текст] / К.Т. Буй // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – № 2. – С. 5–11. DOI:10.25257/FE.2022.2.5-11.

**Приложение А
(обязательное)**

Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Главного управления
пожарной охраны и аварийно-спасательной
службы Министерства общественной
безопасности Социалистической Республики
Вьетнам к.т.н., доцент, полковник милиции




Нгуен Минь Хыонг

«22» 03 2023 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы Буй Куанг Тиена
на тему: «Предотвращение каскадного развития пожара на тепловых
электростанциях Вьетнама на основе применения резервуаров
с защитной стенкой и волноотражающим козырьком»
в нормативный документ по пожарной безопасности

Комиссия в составе:

- заместителя начальника отдела науки - технологии и обследования средств предупреждения и тушения пожаров, аварийно-спасательных работ к.т.н., подполковника милиции Хоанг Тхо Дыка;
- сотрудника отдела проверки и подтверждения в области пожарной безопасности к.т.н., подполковника милиции Нгуен Тхань Туана;
- сотрудника отдела проверки и подтверждения в области пожарной безопасности к.т.н., майора милиции До Тхань Тунга,

подтверждает, что результаты диссертационной работы капитана милиции Буй Куанг Тиена внедрены в нормативный документ по пожарной безопасности, а именно, использованы при подготовке проекта приложения А «Метод определения геометрических параметров защитной стенки с волноотражающим козырьком резервуара типа «стакан в стакане»» в национальный стандарт Социалистической Республики Вьетнам TCVN 5684:2003 «Пожарная безопасность нефтяных сооружений. Общие требования».

Заместитель начальника отдела
к.т.н., подполковник милиции

Хоанг Тхо Дык

Сотрудник отдела
к.т.н., подполковник милиции

Нгуен Тхань Туан

Сотрудник отдела
к.т.н., майор милиции

До Тхань Тунг



УТВЕРЖДАЮ

Директор тепловой электростанции
«Зуен Хай 2» провинция Ча Винь
Социалистической Республики Вьетнам

Ле Лам Фонг

«26» _____ 04 2023 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы Буй Куанг Тиена на тему: «Предотвращение каскадного развития пожара на тепловых электростанциях Вьетнама на основе применения резервуаров с защитной стенкой и волноотражающим козырьком» в практику противопожарной защиты резервуарного парка ТЭС «Зуен Хай 2»

Комиссия в составе:

- начальника штаба ликвидации чрезвычайных ситуаций Ле Лам Фонг;
- командира пожарной части ТЭС Нгуен Ван Хунг;
- специалиста по охране труда Выонг Фонг;
- специалиста по охране окружающей среды Нгуен Тхи Нга,

подтверждает, что результаты диссертационной работы Буй Куанг Тиена будут использоваться при разработке проектной документации на реконструкцию резервуарного парка ТЭС в 2025 г., предполагаемой, в том числе, строительство и эксплуатацию резервуаров вертикальных стальных цилиндрических типа «стакан в стакане», а также при разработке планов предупреждения чрезвычайных ситуаций, обусловленных аварийными разливами нефтепродуктов, в соответствии с требованиями Постановления Премьер-министра СРВ № 133/QĐ-ТТг от 17.01.2020 г. «Об опубликовании национального плана реагирования на разливы нефти» и Постановления Премьер-министра СРВ № 12/QĐ-ТТг от 24.03.2021 г. «Об опубликовании положения о деятельности по ликвидации разливов нефти».

Начальник штаба ликвидации
чрезвычайных ситуаций
на объектах ТЭК СРВ

Ле Лам Фонг

Командир пожарной части ТЭС
Хунг

Нгуен Ван

Специалист по охране труда ТЭС

Выонг Фонг

Специалист по охране
окружающей среды ТЭС

Нгуен Тхи Нга

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Института пожарной безопасности Министерства общественной безопасности Социалистической Республики Вьетнам к.т.н., доцент, полковник милиции



 Нгуен Тхань Хай

04 / 20 23 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы Буй Куанг Тиена на тему: «Предотвращение каскадного развития пожара на тепловых электростанциях Вьетнама на основе применения резервуаров с защитной стенкой и волноотражающим козырьком» в учебный процесс Института пожарной безопасности МОБ СРВ

Комиссия в составе:

- начальника факультета пожаротушения, к.т.н., доцента, полковника милиции Нгуен Туан Аня;
- преподавателя факультета пожаротушения, к.т.н., подполковника милиции Чу Куок Миня;
- заместителя начальника факультета пожарной профилактики, к.т.н., подполковника милиции Фан Аня,

подтверждает, что результаты диссертационной работы капитана милиции Буй Куанг Тиена внедрены в учебный процесс по дисциплинам «Пожарная тактика» и «Пожарная безопасность технологических процессов», а именно, используются при чтении лекций, проведении практических и семинарских занятий по тематике обеспечения пожарной безопасности резервуарного хранения горючих жидкостей на объектах топливно-энергетического комплекса СРВ с обучающимися Института пожарной безопасности МОБ СРВ.

Начальник факультета пожаротушения,
к.т.н., доцент, полковник милиции

 Нгуен Туан Ань

Преподаватель факультета пожаротушения,
к.т.н., подполковник милиции



 Чу Куок Минь

Заместитель начальника факультета
пожарной безопасности, к.т.н.,
подполковник милиции

 Фан Ань

УТВЕРЖДАЮ

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


_____ В.С. Шнышко
« 15 » _____ 20.23 г.


А К Т

внедрения результатов диссертационной работы Буй Куанг Тиена
на тему: «Предотвращение каскадного развития пожара на тепловых
электростанциях Вьетнама на основе применения резервуаров
с защитной стенкой и волноотражающим козырьком»
в учебный процесс Академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе: начальника кафедры пожарной безопасности технологических процессов (ПБТП) в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты (УНК ПБОЗ), к.б.н., доцента, полковника внутренней службы Агеевой Ольги Владимировны; профессора кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ, д.т.н., профессора Назарова Владимира Петровича; профессора кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ, к.т.н., доцента Рубцова Владимира Валентиновича; профессора кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ, к.т.н., доцента Воробьева Владимира Викторовича подтверждает, что результаты диссертационной работы Буй Куанг Тиена внедрены в учебный процесс по дисциплине «Пожарная безопасность технологических процессов», а именно, используются по теме обеспечения пожарной безопасности резервуарного хранения горючих жидкостей на производственных объектах при чтении лекций, проведении практических и семинарских занятий с обучающимися бакалавриата, специалитета и магистратуры Академии ГПС МЧС России.

Начальник кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ
к.б.н., доцент, полковник внутренней службы

 О.В. Агеева

Профессор кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ
доктор технических наук, профессор

 В.П. Назаров

Профессор кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ
кандидат технических наук, доцент

 В.В. Рубцов

Профессор кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ
кандидат технических наук, доцент

 В.В. Воробьев