

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

Академия Государственной противопожарной службы

На правах рукописи



Егоров Андрей Николаевич

**УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ
ПЛАМЕНИ ПОЖАРА В РЕЗЕРВУАРЕ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ»**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Рубцов Дмитрий Николаевич

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К УСТОЙЧИВОСТИ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРОВ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ» ПРИ ПОЖАРЕ.....	11
1.1 Современные тенденции резервуаростроения в нефтегазовой отрасли	11
1.2 Конструктивные особенности резервуара с защитной стенкой.....	13
1.3 Анализ нормативных требований к устойчивости защитной стенки.....	17
1.4 Анализ научно-исследовательских работ, посвященных изучению поведения резервуаров с защитной стенкой в условиях пожара	30
Выводы по первой главе	40
ГЛАВА 2 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ МОДЕЛИ РЕЗЕРВУАРА ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ» В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА.....	41
2.1 Постановка задачи численного моделирования	41
2.2 Обзор и выбор метода проведения математического моделирования	42
2.3 Математическое моделирование нагрева защитной стенки при пожаре в основном резервуаре типа «стакан в стакане»	46
2.4 Результаты математического моделирования.....	54
Выводы по второй главе	57
ГЛАВА 3 ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО НАГРЕВУ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ МОДЕЛИ РЕЗЕРВУАРА ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ» В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА.....	59
3.1 Обзор моделей нефтяных резервуаров, применяемых в научных исследованиях по пожарной безопасности	59
3.2 Разработка проекта стенда для проведения огневых испытаний.....	66
3.3 Постановка задачи экспериментальных исследований.....	72
3.4 Измеряемые величины и средства измерения.....	73
3.5 Методика проведения огневых испытаний	79

3.6 Обсуждение полученных результатов огневых испытаний	82
Выводы по третьей главе.....	92
ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	94
4.1 Анализ требований пожарной безопасности к защитной стенке резервуара типа «стакан в стакане»	94
4.2 Практическое применение численного метода расчёта для определения устойчивости защитной стенки при пожаре.....	98
Выводы по четвертой главе.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты внедрения результатов диссертационной работы.....	127

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современным подходом к обеспечению пожарной безопасности технологий хранения нефти и нефтепродуктов является применение резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане» (резервуар с защитной стенкой). Защитная стенка (ЗС) резервуара предназначена для ограничения площади разлива хранящихся горючих жидкостей (ГЖ) в случае аварийной разгерметизации основного резервуара (ОР) [1, 2].

Вместе с этим, анализ литературных источников [3–19], посвящённых проблематике пожарной безопасности нефтяных резервуаров, показал отсутствие научно обоснованных данных о закономерностях развития пожара такой технологической системы как «основной резервуар с нефтепродуктом – защитная стенка», а также ограниченное количество информации, касающейся экспериментально-теоретических исследований поведения ЗС при воздействии на неё тепловых нагрузок пожара.

Анализ требований нормативных документов в области обеспечения пожарной и промышленной безопасности [1–2, 20–22] определил необходимость обоснования размещения стационарных установок пенного пожаротушения и водяного охлаждения на ЗС с учётом её расчётного состояния и возможных деформаций при пожаре, а также интенсивности подачи воды на её охлаждение при пожаре на основе теплотехнического расчёта. Для реализации возможности выполнения указанного расчёта необходимо наличие экспериментально-теоретических данных, позволяющих прогнозировать её устойчивое состояние при пожаре в ОР.

Таким образом, отсутствие научно обоснованных данных о закономерностях развития пожара в ОР резервуара с защитной стенкой, отсутствие нормативных требований к устойчивости ЗС при пожаре, а также необходимость проведения расчётных обоснований для проектирования систем противопожарной защиты

(СПЗ), размещаемых на ЗС, обуславливают научную и практическую актуальность решения теплотехнической задачи, направленной на обеспечение пожарной безопасности резервуаров данного типа.

Степень разработанности темы исследования.

Диссертационная работа является продолжением и развитием комплекса научных исследований в области обеспечения пожарной безопасности объектов нефтегазовой отрасли, проводимых на кафедре пожарной безопасности технологических процессов (ПБТП) Академии ГПС МЧС России.

При анализе научно-исследовательских работ О.В. Дидковского, Э.Я. Еленицкого, А.А. Катанова, С.Г. Иванцовой, Б.Ф. Беляева, Х.М. Ханухова, И.С. Ломкова и других [3–10] выявлено, что в основном они связаны с изучением проектирования и обеспечения безопасной эксплуатации резервуаров с защитной стенкой. Работы [11–19], в которых отражаются проблемы обеспечения пожарной безопасности резервуаров указанного типа, принадлежат таким учёным, как С.А. Швырков, А.С. Швырков, Ф.В. Демёхин, А.А. Таранцев. Однако анализ этих работ показал, что в них рассматривались вопросы физического и математического моделирования нестационарного процесса движения потока жидкости при разрушении основного резервуара, нагрев защитной стенки в условиях пожара исследован не был.

Вместе с тем известно, что теоретические исследования в области нестационарной теплопроводности, возникающей при пожаре, не являются новыми, а вопросы изучения поведения корпуса классического нефтяного резервуара вертикального цилиндрического стального (РВС) в условиях пожара, его СПЗ и ранее рассматривались такими ведущими учеными, как В.И. Блинов, Г.Н. Худяков, А.С. Измаилов, Б.В. Грушевский, Я. Решетар, Н.П. Копылов, Ю.Н. Шебеко, О.М. Волков, В.П. Сучков, Р.М. Джумагалиев, Е.Н. Иванов, В.П. Молчанов, С.В. Пузач, Р.Ш. Хабибулин [23–45] и др. Однако результаты этих работ использовать в полной мере при исследовании поведения ЗС резервуара не представляется возможным в силу его конструктивных особенностей, которые ранее не были учтены ввиду относительной новизны технического решения её

использования. Указанное обстоятельство обосновывает необходимость продолжения изучения проблемы в указанной области научных исследований.

Таким образом, **целью** диссертационной работы является экспериментально-теоретическая оценка нестационарного температурного поля защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» с нефтью и нефтепродуктами для прогнозирования её устойчивости при пожаре.

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

– проведение анализа научно-технической и нормативной литературы, посвященной изучению поведения защитной стенки резервуара в условиях пожара, и нормативных требований пожарной безопасности к её устойчивости при воздействии на неё тепловых нагрузок пожара;

– разработка математической модели и проведение численного моделирования взаимодействия пламени пожара с защитной стенкой резервуара для определения её нестационарных температурных полей;

– разработка экспериментального стенда и методики проведения огневых экспериментов на модели резервуара типа «стакан в стакане» для определения влияния пламени пожара на тепловое состояние защитной стенки и верификации математической модели;

– проведение апробации разработанного и обоснованного метода численного моделирования нагрева защитной стенки натурального резервуара типа «стакан в стакане» для прогнозирования её устойчивости при пожаре.

Объект исследования – защитная стенка резервуара типа «стакан в стакане» в условиях пожара.

Предмет исследования – процесс нестационарного теплообмена при нагреве защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» пламенем пожара нефтепродукта.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

– предложена и обоснована математическая модель для расчёта температурного поля ЗС резервуара типа «стакан в стакане» при воздействии тепловых нагрузок, возникающих при пожаре в основном резервуаре;

– получены результаты численного решения математической модели по определению температурного поля защитной стенки резервуара с защитной стенкой, позволяющие прогнозировать время потери её устойчивости;

– разработаны физическая модель резервуара в масштабе 1:7 к натурному резервуару типа «стакан в стакане» номинальным объемом 700 м³ и методика огневых испытаний, в результате проведения которых получены поля распределения тепловых нагрузок на защитной стенке, возникающих при пожаре в основном резервуаре;

– показана удовлетворительная сходимость результатов численного моделирования с данными огневых испытаний, что позволило сделать вывод об адекватности предложенной математической модели и возможности её использования для обеспечения пожарной безопасности резервуара типа «стакан в стакане».

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в возможности:

– использования предложенной математической модели для прогнозирования нестационарного температурного поля на защитной стенке при пожаре в основном резервуаре и обоснования времени начала её интенсивного охлаждения стационарными установками водяного орошения;

– использования полученных результатов для обоснования размещения автоматических систем противопожарной защиты при их проектировании на стенке основного резервуара и защитной стенке резервуара типа «стакан в стакане»;

– применения полученных результатов при проектировании резервуарных парков с использованием резервуаров типа «стакан в стакане», а также разработке планов пожаротушения, локализации и ликвидации пожаровзрывоопасных ситуаций для предотвращения каскадного и катастрофического развития пожара на объекте защиты.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы использовались методы математического моделирования с применением современного программного обеспечения; физического эксперимента;

наблюдения; сравнения; определения эмпирических зависимостей на основе математической обработки экспериментальных данных; описания и обобщения. Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные научные, правовые и нормативно-технические источники, материалы с описанием характерных пожаров и ранее выполненные научно-исследовательские работы в области оценки поведения корпуса нефтяных резервуаров в условиях пожара.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты анализа требований нормативных документов к устойчивому состоянию защитной стенки при пожаре в резервуаре, необходимые для проектирования резервуаров типа «стакан в стакане»;

– результаты численного моделирования по определению теплового состояния защитной стенки модели резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре в основном резервуаре;

– описание экспериментального стенда и методики проведения огневых испытаний защитной стенки физической модели резервуара типа «стакан в стакане»;

– результаты экспериментальных исследований по определению теплового состояния защитной стенки модели резервуара типа «стакан в стакане»;

– результаты численного моделирования по определению теплового состояния защитной стенки натурального резервуара типа «стакан в стакане», выполненного в натуральную величину.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается:

– использованием современного валидированного и верифицированного программного комплекса COMSOL Multiphysics при проведении численного моделирования;

– соблюдением условий подобия при разработке физической модели резервуара типа «стакан в стакане»;

– использованием при проведении экспериментальных исследований реальных условий воздействия углеводородного температурного режима пожара на физическую модель резервуара типа «стакан в стакане»;

– использованием современных поверенных измерительных приборов и измерительной аппаратуры, обеспечивающих достаточную точность измерений при проведении экспериментальных исследований и обработки экспериментальных данных;

– удовлетворительной сходимостью полученных результатов численного моделирования с результатами огневых испытаний физической модели резервуара типа «стакан в стакане»;

– внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с данными других исследователей.

Материалы диссертационной работы реализованы при:

– обосновании возможного размещения резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане» в рамках перспективного проекта, связанного с повышением категории вместимости склада хранения нефтепродуктов на АО «Серпуховская нефтебаза», а именно при расчетном моделировании теплового состояния защитной стенки в случае пожара в основном резервуаре типа «стакан в стакане» при подготовке комплекса мер по их противопожарной защите;

– разработке концепции модернизации резервуарного парка линейной производственно-диспетчерской станции «Володарская» в случае его технического перевооружения и обоснования возможности использования в его составе резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане», а именно, для оценки теплового состояния защитной стенки в случае пожара светлых нефтепродуктов в основном резервуаре и использовании указанных сведений для планирования действий пожарных подразделений.

Основные результаты работы были доложены на V Международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); 25-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2016» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); VI Международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017);

VII Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018); XII Международной научно-практической конференции курсантов, студентов и слушателей «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (г. Минск, Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, 2018); V Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (г. Иваново, Ивановская пожарно-спасательная Академия ГПС МЧС России, 2018); Международной научно-практической конференции «Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности», посвященной юбилею Академии (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018), 32-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2023» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 6 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России для публикации основных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 129 страницах машинописного текста, включает в себя 9 таблиц, 43 рисунка, список литературы состоит из 114 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К УСТОЙЧИВОСТИ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРОВ ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ» ПРИ ПОЖАРЕ

1.1 Современные тенденции резервуаростроения в нефтегазовой отрасли

Резервуар с защитной стенкой типа «стакан в стакане» – конструктивное решение резервуара, включающее в себя основной (внутренний) резервуар со стационарной крышей, с понтоном или плавающей крышей и защитный (наружный) резервуар. Под защитным резервуаром понимается защитная стенка [1, 2, 12].

Предложение о строительстве резервуаров с защитной стенкой большой вместимости было внесено в 90-х годах прошлого века. Американским нефтяным институтом (API) и Европейским сообществом предприняты исследования и разработки по созданию норм проектирования резервуара с двойной стенкой [24].

Резервуары с защитной стенкой стали приобретать все большую популярность, особенно в странах с небольшими территориями или в условиях, где требуется повышенная экологическая и пожарная безопасность [24]. Применение резервуаров с защитной стенкой позволяет увеличивать объемы резервуарных парков за счёт повышенных требований экологической и пожарной безопасности.

В 1992 г. в Словакии на нефтеперекачивающей станции «Тура» были построены резервуары с защитной стенкой вместимостью по 30000 м³. В 1997 г. введены в эксплуатацию еще 2 резервуара вместимостью по 75000 м³ с плавающей крышей, защитной стенкой и двойным днищем.

В 1993 г. в Венгрии на придунайской электростанции построены 3 резервуара по 30000 м³ для топливного мазута со стационарной крышей, ЗС и двойным днищем. Также в Венгрии на НПЗ «Сосхоломбата» в районе г. Будапешт построены два резервуара вместимостью по 80000 м³ с плавающей крышей, ЗС и двойным днищем для хранения нефти.

В России резервуары с защитной стенкой стали входить в эксплуатацию относительно недавно. Связано это с тем, что только в 2000 году в стране вышли первые правила устройства вертикальных стальных резервуаров, разрешающие использовать резервуары с защитной стенкой – ПБ 03-381-00 «Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [46], которые к настоящему времени утратили свою силу.

Между тем, очень часто нефтяные компании работают в таких условиях, когда использование одностенных резервуаров или просто невозможно, или серьезно угрожает безопасности людей и окружающей среде [19].

Характерным примером такой ситуации является нефтеперерабатывающий завод в г. Туапсе. Указанный завод расположен в зоне городской застройки. Для объектов с подобным уровнем потенциальной пожарной опасности необходимо разрабатывать специальные технические условия (СТУ), отражающие специфику обеспечения пожарной безопасности, в том числе для резервуаров с защитной стенкой. В случае аварийного разрушения основного резервуара ЗС препятствует растеканию нефти или нефтепродукта за пределы резервуара [15]. Такая конструкция, а также двойное днище повышают эксплуатационную надежность, позволяя своевременно обнаружить утечки.

При пожаре в резервуаре для хранения нефти и нефтепродуктов на соседние резервуары оказывают влияние различные факторы, начиная от попадания обломков крыши взорвавшегося резервуара и заканчивая мощным тепловым воздействием при развитии пожара в обваловании. В результате воздействия этих факторов происходит каскадное развитие пожара, что осложняет условия работы подразделений пожарной охраны и влечет за собой огромный ущерб [15].

Такая ситуация очень характерна для одностенных резервуаров, расположенных в общем обваловании. Конструктивное решение резервуаров с защитной стенкой повышает их устойчивость к внешним воздействиям и обеспечивает более высокую пожарную и экологическую безопасность [1, 2, 15, 19].

Кроме того, обычные одностенные резервуары должны быть установлены в «обваловании» – земляной вал или бетонная стенка, что во многих местах невозможно осуществить.

Резервуары с защитной стенкой обеспечивают повышенный уровень безопасности людей и окружающей среды в случае аварии резервуара и разливов хранимого продукта. Использование резервуаров с защитной стенкой рекомендуется при повышенных требованиях к безопасности, например, при расположении резервуаров вблизи жилых зон или по берегам водоемов, а также на производственных площадках, при недостаточности места для устройства обвалования или каре вокруг резервуаров [1, 2].

Резервуары с защитной стенкой должны повышать устойчивость ОР к внешним разрушающим воздействиям, возникающим в случае пожара в резервуарном парке. Однако открытым остаётся вопрос о поведении таких резервуаров в случае пожара на них самих, то есть об их устойчивости при внутренних разрушающих воздействиях пожара.

Вышесказанное приводит к следующим выводам. Использование резервуаров с защитной стенкой – перспективное и актуальное направление, которое является очередной ступенью к повышению надежности и безопасности резервуарных парков [18]. На сегодняшний день отсутствуют научно обоснованные данные о закономерностях развития пожара для такой технологической системы как «резервуар с защитной стенкой – нефтепродукт», также значительно ограничены требования пожарной безопасности к огнестойкости защитной стенки и способам её повышения [18]. Данный тип резервуаров недостаточно изучен, и ряд вопросов в области обеспечения пожарной безопасности требует научно обоснованных ответов.

1.2 Конструктивные особенности резервуара с защитной стенкой

В нефтегазовой отрасли для хранения нефти и нефтепродуктов применяются различные виды резервуаров. Резервуар представляет собой цилиндрическое хранилище с определёнными геометрическими характеристиками: высотой и диаметром.

Основоположником резервуаростроения является выдающийся русский инженер В.Г. Шухов. Предложенная им конструкция резервуаров отличается простотой и экономичностью. Современные цилиндрические резервуары-нефтехранилища и сейчас строятся по основным принципам, разработанным В.Г. Шуховым [47]. На рисунке 1.1 представлена классификация резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.



Рисунок 1.1 – Классификация резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов [1]

По положению в пространстве различают горизонтальные и вертикальные резервуары. Рекомендуемый объем горизонтальных резервуаров от 3 м³ до 100 м³, объем вертикальных цилиндрических резервуаров колеблется от 100 м³ до 50000 м³ и более [1]. Самый крупный резервуар на территории Российской Федерации имеет объем 100000 м³.

В зависимости от материала, из которого изготавливаются резервуары, они бывают металлические и неметаллические. Металлические резервуары в основном производят из стали, реже из алюминия. К неметаллическим резервуарам относятся железобетонные и пластмассовые.

По схеме установки резервуары делятся на надземные, днище которых находится на уровне или выше уровня планировочной отметки площадки, и подземные, у которых уровень разлива ниже планировочной отметки не менее чем на 0,2 м [1].

По конструктивным особенностям резервуары делятся на следующие типы [1, 2, 46]:

- резервуары со стационарной крышей;
- резервуары с понтоном (РВСП);
- резервуары с плавающей крышей (РВСПК).

При размещении резервуарных парков нефти и нефтепродуктов на площадках, имеющих высотные отметки выше, чем отметки населенных пунктов, железных дорог общей сети, водоемов и рек, расположенных на расстоянии менее 200 м, необходимо предусматривать дополнительные мероприятия, препятствующие аварийному разливу нефти и нефтепродуктов [20, 21, 48–51]. Одним из таких мероприятий является применение резервуаров с защитной стенкой.

В соответствии с документами [1, 2] РВС, РВСП и РВСПК могут оборудоваться защитной стенкой. При наличии у резервуаров ЗС условное обозначение резервуаров, соответственно, принимается: РВС ЗС; РВСП ЗС; РВСПК ЗС [2].

Диаметр и высота стенки должны рассчитываться так, чтобы в случае повреждения ОР и перетекания части продукта в межстенное пространство уровень продукта был на 1 м ниже верха ЗС, при этом ширина межстенного пространства должна быть не менее 1,8 м [1].

Резервуары с защитной стенкой состоят из ОР, предназначенного для хранения продукта, и защитного резервуара (ЗР), предназначенного для удержания продукта в случае аварии или нарушения герметичности ОР [1, 2].

ОР может выполняться со стационарной или плавающей крышей. ЗР выполняется в виде открытого стакана, в котором расположен ОР, в его конструкции может также предусматриваться атмосферный козырек.

Высота ЗР должна быть не менее 80% высоты ОР, а диаметр должен быть таким, чтобы при разгерметизации ОР и перетекании продукта в ЗР уровень нефти или нефтепродукта был на 1 метр ниже верха стенки ЗР [1, 2, 46, 52].

Резервуары такой конструкции используются на производственных площадках, где нет возможности устройства обвалования. Также резервуары с защитной стенкой строятся вблизи водоемов и жилых поселений для обеспечения

безопасности окружающей среды и населения. ЗС монтируется с целью исключить разлив продукта при разгерметизации ОР. На рисунке 1.2 представлена схема резервуара с защитной стенкой, на рисунке 1.3 – фрагмент эксплуатации резервуаров с защитной стенкой на Калининградском нефтетерминале «Лукойл».

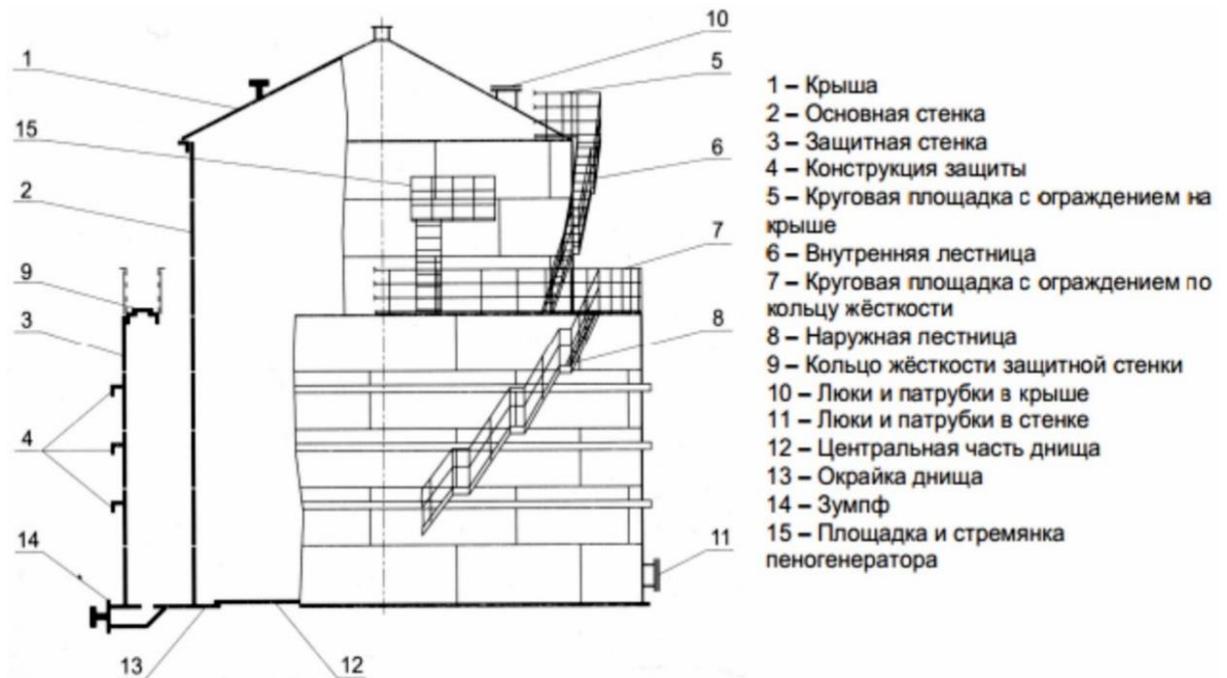


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема резервуара с защитной стенкой [52]



Рисунок 1.3 – Резервуары с защитной стенкой [11]

К основным конструктивным элементам резервуара с защитной стенкой относятся [1, 2]:

- дыхательный клапан для сокращения потерь продуктов от испарения в резервуаре. Исходя из условия прочности и устойчивости конструкции резервуаров дыхательные клапаны рассчитаны на давление 200 мм вод. ст. и вакуум 25 мм вод. ст.;
- предохранительный клапан для дублирования работы дыхательных клапанов в случае выхода их из строя;
- пробоотборник для полуавтоматического отбора проб по всей высоте налитой в резервуар жидкости и слива пробы у основания резервуара;
- приемно-раздаточные патрубки для заполнения и опорожнения резервуара;
- люк-лаз для доступа внутрь резервуара рабочих для ремонта и зачистки скопившейся на дне грязи и вентиляции резервуара перед проведением огневых работ [22];
- водоспускной кран для периодического удаления подтоварной воды, собирающейся над днищем резервуара [41];
- ЗС для удержания нефти и нефтепродуктов при аварийном разрушении ОР.

1.3 Анализ нормативных требований к устойчивости защитной стенки

Пожары в РВС происходят нередко. Связано это с тем, что в резервуаре, заполненном нефтью или нефтепродуктом, существует возможность образования пожаровзрывоопасной и пожароопасной среды. Также при эксплуатации резервуаров существует определённый перечень потенциально возможных источников зажигания, к ним относятся: разряды атмосферного электричества, фрикционные искры, электрические искры, открытое пламя при проведении ремонтных огневых работ, самовозгорание пирофорных отложений.

В работе [53] отмечается, что только в странах СНГ в эксплуатации находится более 40 тысяч вертикальных и горизонтальных резервуаров. Большая часть аварийных ситуаций (более 80% аварий) на объектах хранения нефти и

нефтепродуктов связана с попаданием продукта хранения из резервуара в обвалование и за его пределы [30]. В таблице 1.1 приведены причины таких пожаров за период с 1970 по 1990 гг. [54]. Однако попадание нефти и нефтепродуктов из резервуара в окружающую среду может быть вызвано не только различного рода повреждениями герметичности оборудования и нарушением техники безопасности, но и в результате выброса и вскипания нефти при пожаре в резервуаре.

Таблица 1.1 – Причины групповых пожаров на резервуарах со стационарной крышей в 1970–1990 гг. [54]

Показатель	Объект				Всего
	Нефтепромысел	НПЗ	Нефтебаза	Насосная станция	
Загазованность территории	3	4	7	1	15
Аварийное растекание жидкости	2	3	4	2	11
Всего	5	7	11	3	26

В РВСП за тот же период произошло 5 групповых пожаров. Так, в 1974 г. на нефтебазе в Куйбышевской области обрушение зависшего понтона в резервуаре с подогретым дизельным топливом привело к взрыву и пожару, в результате чего были уничтожены 4 резервуара типа РВСП-700 [54].

В рамках исследования были собраны статистические данные, связанные с пожарами на объектах хранения нефти и нефтепродуктов. В системе Главтранснефти происходит около 10 % всех пожаров, на нефтепромыслах – 14 %, на нефтеперерабатывающих заводах – 27,7 % Наибольшая доля пожаров (48,3 %) приходится на нефтебазы [55]. Из статистики видно, что 32,4 % от общего числа пожаров приходится на резервуары с сырой нефтью, 53,8 % – на резервуары с бензином и 13,8 % – на резервуары с другими видами нефтепродуктов (мазут, керосин, дизельное топливо и др.) [55].

Пожары в обваловании наиболее опасны с точки зрения распространения пожара на соседние резервуары, теплового воздействия на трубопроводную арматуру, находящуюся в обваловании, что влечет к ее разгерметизации и попаданию новых порций горючего в зону горения [56]. При пожаре в обваловании

в разы увеличивается его площадь по сравнению с пожаром в резервуаре, возрастает плотность теплового потока, все это осложняет процесс тушения и приводит к огромному ущербу, как экономическому, так и экологическому.

Пожары в резервуарах со светлыми нефтепродуктами обычно начинаются со взрыва паровоздушной смеси в газовом пространстве резервуара и срыва крыши, или с горения паровоздушной смеси в газовом пространстве резервуара без срыва крыши, но с нарушением целостности ее в отдельных наиболее слабых местах [57].

В результате воздействия высокой температуры на стенку резервуара выше уровня жидкости она начинает деформироваться, что приводит к перетеканию горящих нефтепродуктов в обвалование.

Рассмотрим крупный пожар, произошедший в 2009 г. в резервуарном парке линейной производственно-диспетчерской станции (РП ЛПДС) «Конда», расположенной в Кондинском районе Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (рисунок 1.4).

Общая вместимость резервуарного парка 160000 м³ (I категория) в составе восьми РВС-20000. Высота резервуаров 12,8 м, внутренний диаметр 45,6 м.

Резервуары № 1, 2 используются как аварийные, расположены в отдельно стоящей группе и в результате пожара не пострадали [57, 58]. Резервуары № 4, 5, 7, 8 используются для хранения товарной нефти.

На 17 ч 35 мин происходило горение РВС № 7 на площади 1632 м², а также разлитой нефти между РВС № 7 и РВС № 8 на площади 300 м². Дыхательная арматура РВС № 5, 8 не закрыта.

В 17 ч 35 мин происходит взрыв паровоздушной среды РВС № 8, в результате которого:

- 1) разрушается полностью РВС № 8, фрагменты которого взрывной волной разбрасываются по территории парка и за его пределы в радиусе до 500 метров;
- 2) взрывной волной и фрагментами корпуса РВС № 8 нарушается целостность крыши РВС № 5 и возникает горение нефти в нём;
- 3) частично разрушается обвалование РВС № 8, ввиду чего горящая нефть переливается за пределы резервуарного парка;

- 4) площадь пожара увеличивается до 14 500 м²;
- 5) фрагментом крыши РВС № 8 перегораживается проезд по периметру парка с западной стороны.



Рисунок 1.4 – Пожар в РП ЛПДС «Конда» [58]

В 21 ч 01 мин произошло разрушение стенок РВС № 7 с разливом нефти из каре в сторону нефтеналивной эстакады.

В 23 ч 03 мин и 23 ч 40 мин происходило вскипание нефти в РВС № 5 с увеличением высоты пламени до 50 метров в сторону РВС № 3 и № 4. Площадь пожара не увеличилась и составляла 14500 м².

В 04 ч 02 мин 23 августа 2009 г. произошло вскипание нефти из РВС № 5 с разливом горячей нефти по территории РП ЛПДС на площадь 40000 м², возгоранием РВС № 4 (от теплового воздействия произошел взрыв газовой смеси с последующим горением).

В 07 ч 00 мин горение нефти на площадке дожимных насосов ликвидировано [57, 58].

В период с 02 ч 00 мин до 02 ч 30 мин 24 августа 2009 г. была проведена пенная атака на РВС № 4 через проемы пенокамер.

После успешно проведенной пенной атаки на РВС № 4 проводилось охлаждение с помощью двух гидромониторов «Кросфайер».

В 02 ч 30 мин на месте пожара сложилась следующая обстановка:

- открытое горение в РВС № 4 ликвидировано;
- продолжается охлаждение РВС № 1, 2, 4;
- происходит открытое горение в обваловании РВС № 5, 6, 7, 8 на площади 20000 м²;

– в связи с недостаточным количеством огнетушащих средств для тушения пожара на площади 20000 м² РТП-4 совместно с администрацией станции принимают решение об отжиге нефти.

В 05 ч 54 мин объявлена локализация, угроза соседним резервуарам ликвидирована. К 12 ч 00 мин нефть в обваловании РВС № 5, 6, 7, 8 выгорела. В 12 ч 10 мин объявлена ликвидация [57, 58].

Далее рассмотрим пожар резервуара с защитной стенкой (рисунок 1.5), который случился 3 мая 2003 года на Гданьском нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) в Польше. Резервуар имел конусную крышу и понтон. Параметры ОР: диаметр 40 м, высота 16,5 м, поверхность 1256 м², объем 20000 м³. Параметры ЗС: диаметр 44,1 м, высота 13,6 м. Количество бензина в резервуаре 19000 м³. В результате нарушения требований безопасности при отборе проб топлива с верха резервуара произошел взрыв, погибли три оператора. Конусную крышу взрыв сбросил с резервуара, понтон затонул, возникло горение по всей площади резервуара.

Попытку потушить пожар предприняли сразу после взрыва, но прекратили из-за ограниченного набора располагаемого оборудования. Вместо этого начали охлаждать соседние резервуары и ждать помощи из соседних провинций. Тем временем откачивали бензин в другие резервуары, чтобы по возможности сохранить продукт. 4 мая в 01 ч 08 мин, после 9 часов свободного горения, начали пенную атаку, используя две установки Торнадо (5000 и 8000 л/мин), 1 монитор с

54-метрового коленчатого подъемника «Bronto Skylift» (3600 л/мин), 1 монитор с крыши автомобиля Chubb «Pathfinder» (6800 л/мин) и 7 мобильных мониторов Total производительностью по 40 л/с. Мониторы не использовали одновременно, но средняя интенсивность подачи раствора была почти 500 л/с, удельная интенсивность 0,4 л/м²·с, то есть в несколько раз больше нормативной. Использовали различные пены. Через 17 минут пожар локализовали, через 37 минут – ликвидировали [24].



Рисунок 1.5 – Пожар резервуара с защитной стенкой типа «стакан в стакане» [24]

Необходимо отметить, что данных о деформации ЗС в результате воздействия на неё пламени пожара в течение практически 10 часов не приведено, следовательно, можно предположить, что конструктивная целостность ЗС сохранилась. Предположительно это связано с подачей воды на орошение и

огнетушащих веществ на тушение с интенсивностью, превышающей нормативное значение.

Однако утверждать о возможностях ЗС противостоять возмущающему воздействию пламени пожара нет оснований, так как при обзоре научной литературы, посвящённой проблематике пожарной безопасности резервуаров с защитной стенкой, определилось отсутствие какой-либо экспериментальной информации, касающейся изучения поведения ЗС при пожаре в ОР, что также подтверждает актуальность настоящей работы.

При изучении поведения ЗС резервуара в условиях пожара необходимо опираться на ключевой термин, который бы описывал состояние указанной технологической конструкции и выступал в качестве некоторого прогностического инструмента, позволяющего оценивать влияние опасных факторов пожара на её состояние.

Такой термин впервые вводится в отечественных научно-исследовательских работах [24–29] и определяется как «живучесть технологического аппарата». Данному термину авторы работы дают следующее определение: живучесть технологического аппарата – это его свойство сохранять или быстро восстанавливать свою работоспособность в условиях пожара.

Термин «устойчивость объекта при пожаре» впервые появляется в нормативном документе по пожарной безопасности [59]. В указанном документе приводится следующее его определение: устойчивость объекта при пожаре – свойство объекта предотвращать воздействие на людей и материальные ценности опасных факторов пожара и их вторичных проявлений.

В нормативно-техническом документе рекомендательного характера межотраслевого применения [2] приводятся такие термины как «устойчивость положения резервуара» и его «предельное состояние». Под устойчивостью положения резервуара понимается способность конструкции и ее элементов противостоять усилиям, стремящимся вывести его из исходного состояния статического равновесия.

В соответствии с указанными документами факторы, которые влияют на устойчивость стенки резервуара, классифицируются определённым образом [2]. Классификация указанных факторов приведена на рисунке 1.6.

В свою очередь, предельное состояние – состояние, при котором резервуар и его основание перестают удовлетворять заданным свойствам на стадиях изготовления, транспортирования, монтажа, испытаний и эксплуатации [2]. То есть возмущающее воздействие высоких температур пожара и его тепловой поток возможно рассматривать в качестве усилий, которые могут повлиять на равновесно-статическое состояние резервуара и повлиять на предельное состояние ЗС, при котором наступит отказ в выполнении заданных свойств.

Необходимо отметить, что п. 17.2.3 [2] предполагает проведение расчёта ЗС на прочность и устойчивость для основных и особого сочетания нагрузок. В условиях аварийной ситуации следует учесть гидродинамические эффекты и неосесимметричный характер распределения нагрузки, прикладываемой к ЗС.

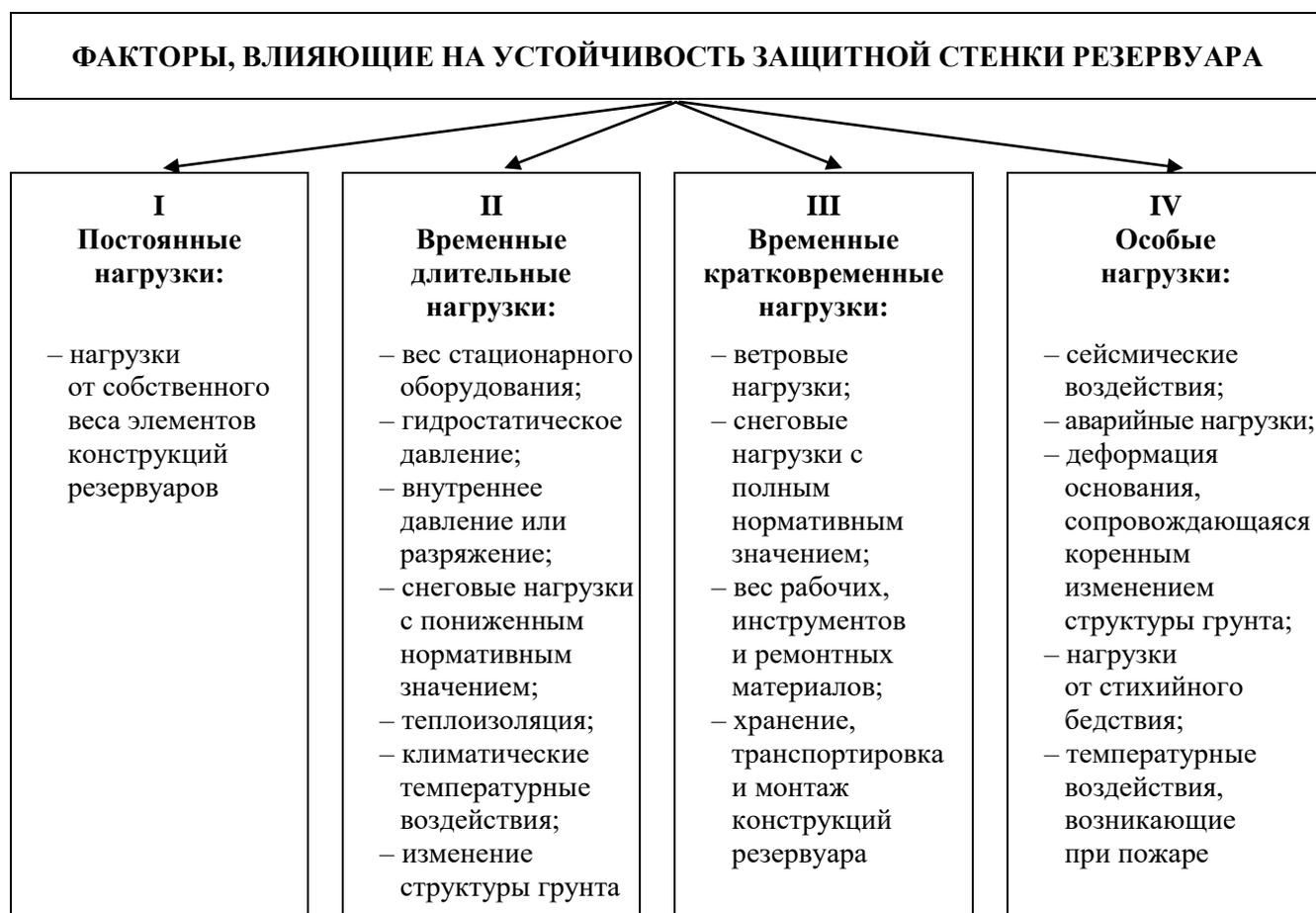


Рисунок 1.6 – Классификация факторов, влияющих на устойчивость защитной стенки

В данную структурно-логическую последовательность нами предложено добавить требование в блок номер IV к учёту температурных воздействий, возникающих при пожаре, для оценки устойчивости ЗС. Данная логика в целом описывает характер возникновения аварии как наиболее опасный случай при эксплуатации резервуара с защитной стенкой, однако, по нашему мнению, логика развития события несправедливо заканчивается только гидродинамической нагрузкой, получаемой ЗС от вытекающего из ОР нефтепродукта, ведь рассматриваемую аварийную ситуацию в целом можно характеризовать и как пожароопасную.

Предложение продолжить рассмотрение логики развития события связано с тем, что при разгерметизации образуется горючая среда в открытом пространстве и высока вероятность появления в ней источника зажигания в виде искровых разрядов, образующихся при перемещении стальных конструкций резервуара, вызванном аварией.

Данное положение подтверждает необходимость использования учёта тепловых нагрузок в оценке устойчивости ЗС резервуара, в качестве особого вида нагрузок.

В государственном стандарте Российской Федерации, который устанавливает общие требования пожарной безопасности к технологическим процессам различного назначения [60], впервые вводится термин огнестойкость технологического оборудования, который определяется как промежуток времени, в течение которого воздействие стандартного очага пожара не приводит к потере функциональных свойств оборудования. Однако действующая редакция указанного стандарта ГОСТ Р 12.3.047-2012 [61] не предусматривает и не содержит понятия огнестойкости либо устойчивости технологического оборудования.

Вместе с этим Федеральный закон Российской Федерации № 123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [20] вводит термин устойчивость объекта защиты при пожаре, под которым понимается свойство объекта защиты сохранять конструктивную целостность и (или)

функциональное назначение при воздействии опасных факторов пожара и вторичных проявлений опасных факторов пожара.

Приведённая терминология в целом показывает, что вводимые в научно-технический лексикон такие термины как живучесть и огнестойкость технологического оборудования в целом позволили сформулировать универсальный термин – устойчивость объекта защиты, определение которого вошло в ст. 2 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [20]. На основе этого термина представляется возможным сформулировать определение устойчивости ЗС к пламени пожара.

Устойчивость защитной стенки к пламени пожара – возможность сохранять конструктивную целостность для ограничения площади разлива ГЖ при воздействии повышенной температуры окружающей среды и теплового потока.

В таком случае параметры, характеризующие устойчивость ЗС, можно описать следующим образом. Устойчивое состояние ЗС резервуара обеспечивается при выполнении следующего условия – рабочие напряжения σ_p , возникающие в элементах ЗС резервуара при воздействии на неё температурных напряжений, создаваемых пламенем пожара, не достигают предела прочности $\sigma_{пч}$.

Если рабочие напряжения σ_p , возникающие в элементах оболочки защитной стенки резервуара при воздействии на неё температурных напряжений, создаваемых пламенем пожара, превышают предел прочности $\sigma_{пч}$, то возникает опасность деформационного разрушения защитной стенки резервуара вследствие потери прочности, что проиллюстрировано на рисунке 1.7.

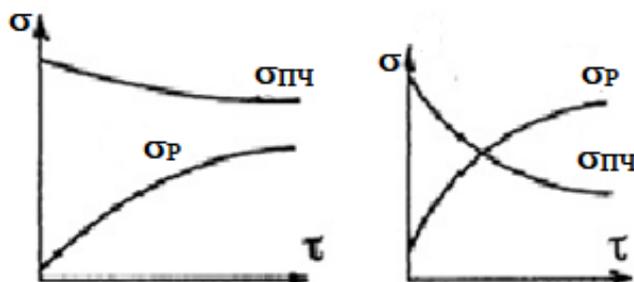


Рисунок 1.7 – Параметры, характеризующие устойчивость защитной стенки:
 σ_p – рабочее напряжение; $\sigma_{пч}$ – предел прочности [52]

Резервуары с защитной стенкой – достаточно новое явление для российской нормативной базы, и нет нормативного документа, в котором отражены вопросы устойчивости ЗС. Требования для резервуаров с защитной стенкой устанавливаются рядом нормативно-правовых документов [1, 2, 21, 22, 48, 50, 61, 62], и содержат лишь конструктивные требования к ОР и к ЗС.

Вопрос устойчивости ЗС оставлен в стороне. Это объясняется тем, что в настоящее время нет четкого представления о поведении резервуара с защитной стенкой в условиях пожара [45]. Эксперименты не проводились, а пожары в таких резервуарах не такое частое событие, чтобы можно было систематизировать закономерности и вывести обоснованные требования к устойчивости ЗС.

В доказательство вышесказанного приводится анализ нормативной базы для определения требований к устойчивости ЗС резервуаров с нефтью и нефтепродуктами, проведенный в рамках исследования (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Требования к устойчивости защитной стенки резервуаров с нефтью и нефтепродуктами

№ п/п	Нормативный документ	Требования к устойчивости	Требования к огнестойкости
1	Федеральный закон от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [20]	Не установлены	Не установлены
2	СП 155.13130.2014. «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности» [21]	Не установлены	Не установлены
3	«Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов», 2013 [22]	Не установлены	Не установлены
4	ГОСТ Р 53324-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности [50]	Не установлены	Не установлены
5	ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [61]	Не установлены	Не установлены
6	ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия [1]	Не установлены	Не установлены

Продолжение таблицы 1.2.

7	СП 4.13130.2013. Свод правил. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям [48]	Не установлены	Не установлены
8	Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [62]	Не установлены	Не установлены
9	Стандарт организации СТО-СА-03-002-2009. «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов» [2]	Не установлены	Не установлены

Рассмотрим требования к резервуарам с защитной стенкой, содержащиеся в нормативной базе [1, 2, 46]:

- ОР выполняется со стационарной крышей или с плавающей крышей;
- высота ЗС рекомендуется не менее 80 % от высоты стенки ОР;
- диаметр ЗС рекомендуется выбирать таким образом, чтобы в случае повреждения ОР и перетекания части продукта в межстенное пространство уровень продукта был на 1 м ниже верха ЗС. При этом ширина межстенного пространства выбирается не менее 1,8 м [1, 2, 13];
- днище ОР опирается непосредственно на днище ЗС или на разделяющие днища решетки, арматурные сетки или иные прокладки (для лучшего контроля возможных протечек нефти и нефтепродукта);
- уклон днищ резервуаров с защитной стенкой выполняется наружу (от центра к периферии);
- межстенное пространство перекрывается погодозащитным козырьком, предотвращающим падение снега с крыши ОР в межстенное пространство;
- на ОР рекомендуется устанавливать стальные аварийные канаты для предотвращения удара о ЗС резервуара в случае возникновения аварийной ситуации. Сечение и места их расположения определяются специальным расчетом. Канаты рекомендуется устанавливать без предварительного натяжения и без провисания между узлами их крепления к стенке [1]. Вместо стальных канатов

применяются синтетические монтажные полотенца, равнопрочные стальным канатам;

- на ЗС устанавливаются кольца жесткости, рассчитанные на гидродинамический удар продукта при аварии ОР;

- для удаления атмосферных осадков в межстенном пространстве рекомендуется устанавливать лотковые или круглые зумпфы зачистки;

- при размещении резервуаров с защитной стенкой в составе резервуарных парков складов нефти и нефтепродуктов рекомендуется за диаметр резервуара с защитной стенкой принимать диаметр ОР.

Испытания резервуаров с защитной стенкой рекомендуется выполнять в два этапа:

- первый этап – испытание ОР;

- второй этап – испытание ЗР [2, 22].

Требования к системам безопасности резервуаров с защитной стенкой устанавливаются [2]. В данном нормативном документе содержатся требования к проектированию СПЗ такого типа резервуаров.

СПЗ проектируются, основываясь на том, что в результате аварии произойдет разрушение ОР и весь продукт попадет в пространство, ограниченное ЗС. Под этим подразумевается наличие в проекте резервуара детальных расчетов ЗС резервуара на гидродинамическое воздействие и полное удержание волны жидкости, образующейся при разрушении основного резервуара [2]. Также этим нормативным документом предусматривается установка пеногенераторов и пенокамер как на ОР, так и на ЗС.

Результатом вышеизложенных рассуждений и анализа нормативной базы является вывод о том, что с точки зрения защиты от попадания топлива, хранящегося в ОР, в окружающую среду вследствие разгерметизации резервуары с защитной стенкой имеют преимущества по сравнению с резервуарами без защитной стенки. Вместе с тем вопрос об устойчивости ЗС при воздействии на неё

тепловых нагрузок от пожара на настоящий момент открыт, что, в очередной раз подчеркивает актуальность выбранной темы.

1.4 Анализ научно-исследовательских работ, посвященных изучению поведения резервуаров с защитной стенкой в условиях пожара

Изучению закономерностей развития пожара в РВС и его поведения в условиях пожара посвящены работы многих российских и зарубежных исследователей [23–45, 54, 56, 58].

Благодаря усилиям этих исследователей в настоящий момент картина теплообменных процессов, протекающих в условиях пожара в резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов различных конструкций, достаточно четкая и понятная. Результаты трудов, посвященных изучению этого вопроса, подтверждаются экспериментами и сопоставляются с описанием реальных пожаров на объектах хранения нефти и нефтепродуктов.

При воздействии мощного теплового потока на корпус вертикального стального резервуара сухая часть его стенки достаточно быстро теряет несущие способности при отсутствии необходимого охлаждения водой. Нижняя часть резервуара, заполненная нефтью или нефтепродуктом, обладает достаточно большим пределом огнестойкости, как любая водонаполненная конструкция. На этих особенностях поведения вертикальных стальных резервуаров в условиях пожара строится тактика их тушения [24]. Вместе с тем анализ статистических данных показывает, что пожары резервуаров средних и больших объёмов с нефтепродуктами практически не тушатся существующими автоматическими системами в связи с утратой работоспособности системы вследствие взрыва паровоздушной смеси [43].

Однако наличие ЗС может значительно изменить процесс теплообмена и распределение температурных полей, что однозначно необходимо учитывать при тушении таких резервуаров [42]. На настоящий момент возможно лишь

выдвижение гипотез, не имеющих под собой серьезных оснований. Поскольку такие резервуары до сих пор не получили ещё широкого распространения, знания об их поведении в условиях пожара незначительны, а пожары на них редкость и описания их скудны, тем не менее мы не можем исключать вероятности их возникновения.

В резервуарах с защитной стенкой в случае аварийного разрушения ОР, ЗР препятствует растеканию нефти или нефтепродукта за пределы резервуара, что позволяет уменьшить площадь пожара. Также ЗС играет роль экрана при пожаре соседнего резервуара либо при пожаре в обваловании, защищая нижнюю и среднюю часть основного резервуара от мощного теплового потока [15].

Развитие пожара как в границах резервуаров с защитной стенкой, так и за пределами этих границ зависит от огнестойкости защитной стенки и мощности очага пожара [15].

Для резервуаров с защитной стенкой возможны четыре основных варианта пожара, при которых горение не распространяется за границы защитной стенки резервуара:

- 1) пожар в основном резервуаре;
- 2) пожар в межстенном пространстве при локальной разгерметизации корпуса основного резервуара;
- 3) пожар в основном резервуаре и в межстенном пространстве при выбросе или вскипании нефти или некоторых нефтепродуктов;
- 4) пожар в объеме защитного резервуара при разливе продукта в случае полного разрушения основного корпуса резервуара.

На рисунке 1.8 приводится схематическое изображение указанных вариантов развития пожаров.

Первый вариант пожара в резервуаре с защитной стенкой предполагает развитие его только в ОР. В этом случае тепловой поток будет действовать на стенку ОР и частично на ЗС.

По опыту тушения пожаров в РВС, стенку ОР необходимо будет защищать от воздействия высокой температуры для обеспечения ее устойчивости. Насколько

сильное тепловое воздействие будет оказываться на ЗС от пожара в ОР, в настоящий момент не установлено.

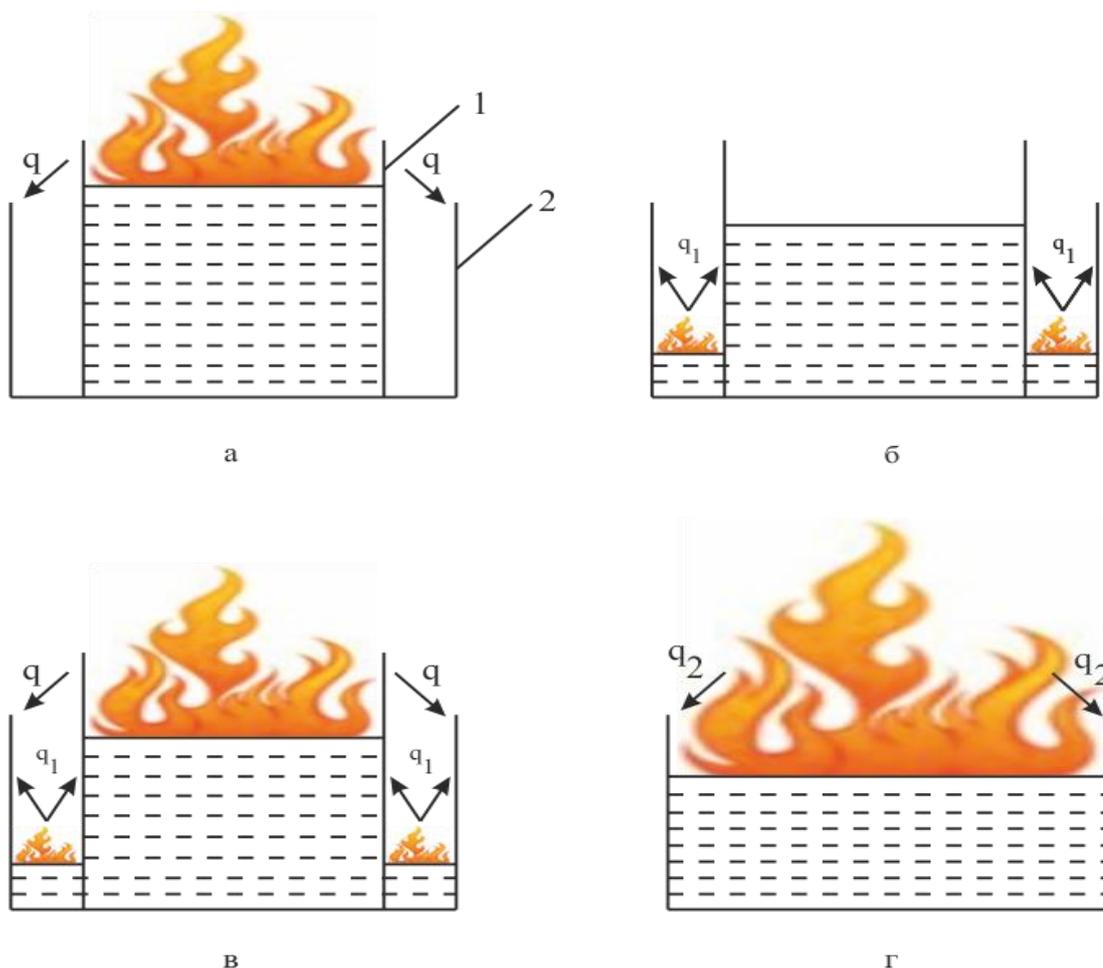


Рисунок 1.8 – Варианты развития пожара в резервуаре с защитной стенкой:

а – пожар в основном резервуаре; б – пожар в межстенном пространстве; в – пожар в основном резервуаре и в межстенном пространстве; г – пожар в объеме защитного резервуара, при разрушении основного резервуара; 1 – стенка основного резервуара, 2 – защитная стенка; q – тепловой поток, действующий на защитную стенку при пожаре в основном резервуаре; q_1 – тепловой поток, действующий на защитную и основную стенки при пожаре в межстенном пространстве; q_2 – тепловой поток, действующий на стенку основного резервуара при пожаре в межстенном пространстве [15]

Во втором и в третьем вариантах пожара мощному тепловому воздействию будут подвержены как ОР, так и ЗС, при этом уровень жидкости в межстенном пространстве внесет свои коррективы на теплообменные процессы [15].

Меры по защите ОР от воздействия пламени пожара в межстенном пространстве необходимо принимать с учетом того, что орошающая его вода

проникнет в межстенное пространство, что через определенный промежуток времени может привести к попаданию горючего в обвалование. Кроме того, неизвестно, какое влияние окажет пожар в межстенном пространстве на развитие пожара в ОР, насколько могут измениться скорость прогрева слоя хранящейся жидкости и интенсивность испарения горючего. Не изучен и сам процесс горения в межстенном пространстве [15].

Ширина межстенного пространства резервуара с защитной стенкой сравнительно небольшая. Данный геометрический показатель может вносить значительный вклад в процесс развития пожара на резервуарах с защитной стенкой за счёт влияния на критическую глубину горения [15].

Экспериментально доказано, что горение в резервуарах с малым диаметром возможно до определенной глубины, затем происходит самозатухание. Для резервуаров с большим диаметром эта глубина больше высоты стенки резервуара, поэтому они могут выгорать полностью. В резервуарах с небольшими диаметрами горение прекращается, а значение критической глубины зависит от типа горючего и непосредственно диаметра резервуара. В случае подтверждения вероятности самозатухания в межстенном пространстве и определения критической глубины появится возможность разработки дополнительных и действенных мер пожарной безопасности для резервуаров с защитной стенкой.

Четвертый вариант пожара наиболее сложный с точки зрения тушения. При полном разрушении ОР может произойти разрушение уторного шва с дальнейшим смещением корпуса ОР. При этом максимальное давление образуется у основания резервуара, что приведёт к смещению нижнего пояса стенки дальше верхнего. В результате этого образуются так называемые «карманы», которые ограничат попадание огнетушащих веществ для тушения пожара.

Для объективного изучения развития пожара и способов его тушения необходимо знать геометрические параметры ЗС резервуара [15].

Как было отмечено выше, диаметр ЗР рекомендуется выбирать таким образом, чтобы в случае повреждения ОР и перетекания части продукта в

межстенное пространство уровень хранящейся жидкости оказался на 1 м ниже верхнего края стенки ЗР. При этом ширина межстенного пространства выбирается не менее 1,8 м, а высота ЗС – не менее 80 % высоты стенки ОР [1, 2, 46, 52]. Руководствуясь указанными требованиями, проведены расчеты параметров резервуаров с защитной стенкой, результаты которых представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Геометрические параметры резервуаров с защитной стенкой [15]

Объем РВС, м ³	Диаметр РВС, м	Высота основного корпуса, м	Высота защитной стенки, м	Разность высот между основной и защитной стенками Δh , м	Ширина межстенного пространства, м	
					Расчетная	Принимаемая
100	4,73	6	4,8	1,2	0,53	1,8
200	6,63	6	4,8	1,2	0,78	1,8
300	7,58	7,5	6	1,5	0,58	1,8
400	8,53	7,5	6	1,5	0,78	1,8
700	10,43	9	7,2	1,8	0,78	1,8
1000	10,43	12	9,6	2,4	0,87	1,8
2000	15,18	12	9,6	2,4	1,1	1,8
3000	18,98	12	9,6	2,4	1,1	1,8
5000	22,8	12	9,6	2,4	2,2	2,2
	20,92	15	12	3	1,6	1,8
10000	28,5	18	14,4	3,6	1,2	1,8
	34,2	12	9,6	2,4	2,2	2,2
20000	39,9	18	14,4	3,6	1,86	1,86
	47,4	12	9,6	2,4	3,6	3,6
30000	45,6	18	14,4	3,6	3,9	3,9
40000	56,9	18	14,4	3,6	2,4	2,4
50000	60,7	18	14,4	3,6	4,2	4,2
100000	95,4	18	14,4	3,6	1,1	1,8

Из таблицы 1.3 видно, что минимальная разность высот между ОР и ЗС составляет 1,2 м, а максимальная – 3,6 м, причем в большинстве случаев ширина межстенного пространства остается в пределах 1,8–2 м.

Разница между минимальной и максимальной разностью высот составляет 2,4 м. Учитывая неизменность ширины межстенного пространства можно предположить, что при пожаре в ОР плотность теплового потока, падающего на ЗС, для резервуаров большого диаметра будет значительно меньшей, чем для резервуаров небольшого диаметра.

Указанная гипотеза основывается на том, что в соответствии с [23] теплопередача от факела пламени горящего резервуара с нефтью и нефтепродуктами осуществляется за счет теплового излучения. Доля конвекции в данном случае составляет примерно 1 %.

Например, при первом варианте пожара на резервуаре вместимостью 20000 м³ из-за перепада высот между ОР и ЗС возможно появление зоны, в которую тепловой поток не попадет. В результате нагрев ЗС будет минимален. Диаметр ОР составляет 39,9 м, высота – 18 м. В этом случае разность высот между ОР и ЗС составит 3,6 м, а ширина межстенного пространства – 1,86 м.

Получается, что угол наклона между верхними гранями ОР и ЗС составит около 30°. На рисунке 1.9 представлена схема для определения угла наклона от пламени пожара к верхнему краю ЗС при разнице высот корпуса ОР и его ЗС.

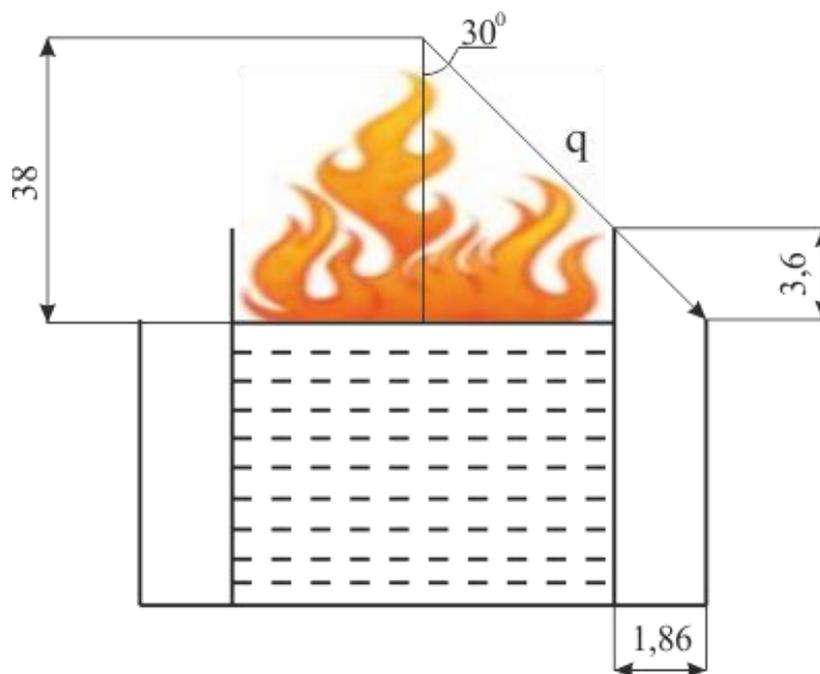


Рисунок 1.9 – Схема для определения угла наклона от пламени пожара к верхней зоне защитной стенки [15]

На основании вышеизложенного получаем, что для попадания теплового потока на верхний пояс ЗС при указанных геометрических условиях высота факела пламени должна составлять более 38 м [15].

Высота факела пламени определяется в соответствии с [24] по следующей формуле:

$$H_f = 42 \cdot d_r \cdot \left(\frac{m}{\rho_0 \cdot \sqrt{g \cdot d_r}} \right)^{0,61}, \quad (1.1)$$

где m – удельная массовая скорость выгорания топлива кг/(м²·с);

d_r – диаметр горящего резервуара, м;

ρ_0 – плотность окружающего воздуха, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Результаты расчётов высоты факела пламени пожара в ОР резервуара с защитной стенкой вместимостью 20000 м³ для светлых и темных нефтепродуктов представлены в таблице 1.4 в зависимости от вида горючей нагрузки [15].

Таблица 1.4 – Высота факела пламени пожара резервуара с защитной стенкой вместимостью 20000 м³ [15]

Тип горючего	Нефть	Бензин	Дизельное топливо	Мазут
Высота факела пламени пожара, м	34	43	34	31

Из полученных результатов следует, что только в случае горения бензина высота факела пламени пожара будет достаточной для облучения ЗС резервуара. Дальнейший анализ показал, что для резервуара с защитной стенкой вместимостью 20000 м³ высота факела пламени будет превышать 38 м только для горючих и легковоспламеняющихся жидкостей с удельной массовой скоростью выгорания более 0,048 кг/(м² с) [15]. Важным показателем воздействия пожара в ОР на ЗС является плотность теплового потока, излучаемого факелом пламени пожара.

Количественная характеристика теплового потока зависит от геометрических параметров формы пламени. Поэтому для моделирования пожаров нефтепродуктов в резервуарах форма факела пламени идеализируется. Она представляется в виде конуса или цилиндра с основанием, равным площади поверхности зеркала горящего нефтепродукта в резервуаре, а форма излучающей поверхности принимается в виде треугольника или прямоугольника соответственно [25].

Проведенный анализ фотоснимков горящих резервуаров показал, что нельзя выделить одну или другую форму пламени как наиболее часто встречающуюся.

Кроме того, расчётная плотность падающего теплового потока зависит от коэффициента облученности φ_n . Коэффициент облученности для элементарной площадки резервуара, расположенного рядом с горящим резервуаром, определяется по следующей формуле [26]:

$$\varphi_n = \frac{1}{\pi} \left(\frac{B_1}{\sqrt{1+B_1^2}} \arcsin \frac{C_1}{\sqrt{1+B_1^2+C_1^2}} + \frac{C_1}{\sqrt{1+C_1^2}} \arcsin \frac{B_1}{\sqrt{1+B_1^2+C_1^2}} \right), \quad (1.2)$$

где $B_1 = x_1/2y_1$;

$$C_1 = h_\phi/y_1.$$

Значения x_1 и y_1 определяют исходя из геометрических размеров рассматриваемых резервуаров по формулам (1.3), (1.4):

$$x_1 = \frac{2d_p \sqrt{l_p(l_p + d_p)}}{d_p + 2l_p}; \quad (1.3)$$

$$y_1 = \sqrt{l_p(l_p + d_p) - (0,5x_1)^2}. \quad (1.4)$$

где l_p – расстояние между резервуарами, м.

Вопрос о возможности применения указанных зависимостей для определения падающего теплового потока на ЗС при пожаре в ОР, с учётом угла наклона, является актуальным при изучении процессов развития пожара в резервуарах с защитной стенкой.

С целью оценки возможности применения расчётных методов определения нагрева верхнего пояса ЗС необходимо провести математическое моделирование указанного процесса. Для этого разработана конечно-элементная модель резервуара с защитной стенкой с идеализированной формой пламени в виде конуса в ОР.

Для проведения математического эксперимента необходимо установить ряд исходных данных, таких как плотность теплового потока, коэффициент

облученности, что в дальнейшем позволит осуществить огневой эксперимент на модели резервуара с защитной стенкой [15].

О возможности процесса самозатухания говорят результаты экспериментов, полученных в работе [17]. Так, в опыте с нижним взливом в РВСПК и при воздухообмене через вентиляционные отверстия стационарной крыши наблюдалось самозатухание через 23 минуты.

Проведение экспериментов с моделью резервуара с защитной стенкой обуславливается необходимостью доказать эмпирически и подтвердить или опровергнуть гипотезу о распределении минимумов и максимумов температур на ЗС. Результаты экспериментов позволят обосновать распределение тепловых потоков при построении математической модели и впоследствии создать модель резервуара с защитной стенкой.

Возможно, результатом изучения вышеизложенных вариантов теплообменных процессов, происходящих в таких резервуарах в условиях пожара, будут рекомендации, позволяющие максимально эффективно использовать ЗС для сдерживания горящего топлива в границах резервуара.

В рамках настоящей диссертационной работы был проведен обзор научных трудов, посвященных исследованию огнестойкости резервуаров с защитной стенкой, предназначенных для хранения нефти и нефтепродуктов. В результате было установлено, что исследования ограничиваются констатацией существования и применения резервуаров с защитной стенкой. Изучение огнестойкости таких резервуаров не проводилось.

В настоящее время общественность все большее внимание начинает уделять совершенствованию безопасности резервуарных парков с целью уменьшения масштабов аварий и повышения экологической безопасности. В качестве одного из рассматриваемых решений является применение резервуаров с защитной стенкой.

В 2000 году проведены эксперименты по определению температурного режима крыши и понтона из алюминия при горении модели РВСП-1000. Целью опытов было определение температурного режима в надпонтонном пространстве резервуара, огнестойкости понтона и крыши из алюминиевых сплавов при пожаре

в кольцевом зазоре резервуара. Установлено, что максимальная температура понтона вблизи корпуса модели резервуара составила 500–550 °С [42, 43]. Такая температура наблюдалась при отсутствии стационарной крыши, что условно можно рассмотреть, как горение в ОР резервуара с защитной стенкой.

Исследования условий выкипания и выброса нефти во время пожаров резервуаров и хранилищ разной ёмкости проводятся в главной школе пожарной службы г. Варшава. Есть экспериментальные данные по прогреву горизонтальной крыши резервуара, ограничивающей сверху обогреваемое пожаром замкнутое газовое пространство. Оказалось, что расчетные и экспериментальные данные не совпадают. В экспериментах крыша модели резервуара прогревалась значительно выше расчетной температуры.

Плавающая крыша модели изготовлена ступенчатой, с воспроизведением барьера удержания гасительной пены и опорных стоек. Зазор между кромкой плавающей крыши и стенкой модели резервуара уплотнялся затвором из поролона с тем, чтобы исключить возможность перетекания воздушного потока из области над крышей под нее и обратно. В ходе выполнения экспериментов меняли положение крыши относительно резервуара.

В качестве положительного способа увеличения огнестойкости стенок корпуса ОР предлагается применение гелеобразующих систем. В отличие от жидкостных средств пожаротушения, гелеобразующая система практически на 100 % остаётся на защищаемой поверхности [43].

Проведенный анализ вариантов развития пожара в резервуаре с защитной стенкой позволяет говорить об актуальности исследования и его практической значимости. Анализ научно-исследовательских работ позволяет сделать выводы об актуальности применения резервуаров с защитной стенкой, необходимости исследования их поведения в условиях пожара и разработке требований пожарной безопасности к таким резервуарам, в частности, к их устойчивости при пожаре.

Выводы по первой главе

В результате проведенного анализа научной литературы и нормативных требований сделаны следующие выводы:

1. В действующих нормативных правовых документах в области обеспечения пожарной безопасности отсутствуют требования к устойчивости защитной стенки при экстремальных тепловых воздействиях пожара. Также определена необходимость учёта в общей классификации требований к устойчивости ЗС тепловых нагрузок пожара, как особого вида нагрузок, влияющего на устойчивость защитной стенки.

2. Отсутствует глубокий анализ различных вариантов развития пожара в резервуарах с защитной стенкой и их поведения в условиях пожара, что препятствует предложению проектных решений по обеспечению пожарной безопасности и выбору тактики пожаротушения резервуаров такого типа.

3. Эффективность применения ЗС при пожаре в ОР должна быть определена на основе экспериментально-теоретического исследования.

4. Для формулирования требований к размещению систем пожарной автоматики на ЗС резервуара с защитной стенкой необходимо обладать математическим аппаратом, позволяющим численно описать и смоделировать воздействие пламени пожара на ЗС.

ГЛАВА 2 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ МОДЕЛИ РЕЗЕРВУАРА ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ» В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

2.1 Постановка задачи численного моделирования

Для определения устойчивости ЗС резервуара с защитной стенкой необходимо выявить распределение на ней тепловых полей при воздействии пламени пожара в случае горения в ОР.

Распределение тепловых полей на ЗС резервуара можно установить при проведении физического эксперимента. Однако его проведение на натурном объекте сопряжено с высокими экономическими затратами. Альтернативой в решении данного вопроса является математическое моделирование, что подтверждается верификацией ранее выполненных экспериментальных исследований. Под математическим моделированием понимается моделирование поведения объекта, процесса, явления путем получения численного решения уравнений, описывающих математическую модель [63]. В связи с этим численные расчёты могут заменить физические эксперименты, связанные с прототипированием.

Постановка задачи для математического эксперимента, связанного с определением устойчивости ЗС резервуара, заключается в решении дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности, относящихся к процессу нестационарного теплообмена, происходящего в горящем резервуаре. Результатом математического моделирования будет являться распределение температурных полей в зависимости от времени нагрева ЗС, что позволит определить время достижения критической температуры стальных конструкций резервуара в целом и непосредственно ЗС резервуара.

2.2 Обзор и выбор метода проведения математического моделирования

Математическое моделирование в рамках настоящей диссертационной работы представляет собой моделирование физического процесса [63] поведения корпусов резервуара с защитной стенкой при воздействии на них пламени пожара, происходящего в ОР, с целью получения изоповерхностей тепловых полей, возникающих в процессе нестационарного нагрева путем получения численного решения уравнений математической модели.

Для постановки задачи и проведения математического моделирования необходимо проанализировать программные комплексы, с помощью которых возможно численное моделирование физических процессов. К таким комплексам относятся:

– ANSYS/Multiphysics – это мощный, многоцелевой продукт компании, представляет собой программное средство анализа для широкого круга инженерных дисциплин, которое позволяет проводить расчетные исследования не только в таких отдельных областях знания, как прочность, распространение тепла, механика жидкостей и газов или электромагнетизм, но и решать связанные задачи. Эта программа обеспечивает оптимизацию проектных разработок на уровне, позволяющем моделировать инженерные проблемы в наиболее полной постановке [64];

– программный конечно-элементный комплекс ABAQUS – это универсальная система общего назначения, предназначенная как для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного анализа, так и для научно-исследовательских и учебных целей в самых разных сферах деятельности [65];

– программный комплекс FlowVision предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики. Моделируемые течения включают в себя стационарные и нестационарные, сжимаемые, слабосжимаемые и несжимаемые потоки жидкости и газа. Использование различных моделей турбулентности и адаптивной расчетной сетки позволяет моделировать сложные движения жидкости, включая течения с сильной закруткой,

горением, течения со свободной поверхностью. FlowVision основан на конечно-объемном методе решения уравнений гидродинамики и использует прямоугольную адаптивную сетку с локальным измельчением [66];

– COMSOL Multiphysics – это мощный инструмент, позволяющий проводить комплекс численных экспериментов с параметрическими моделями. С его помощью возможно проводить моделирование физических процессов во всех областях инженерных, производственных и научных исследований [67].

Определить температурные поля ЗС резервуара возможно при решении системы уравнений, описывающих нестационарный процесс теплообмена с помощью метода конечных элементов (МКЭ). МКЭ является численным методом, основанным на замене объекта совокупностью подобластей (конечных элементов), для каждой из которых отыскивается приближенное решение различных задач, в том числе и задачи теплообмена [63]. Совокупность конечных элементов образует вычислительную сетку в виде треугольных и четырехугольных элементов для двумерных моделей, и тетраэдрические и гексаэдрические для трехмерных моделей. Чем меньше размеры конечных элементов, тем точнее будет решение, которое будет выражаться для поставленной нами задачи в виде визуализации распределения температурных полей на защитной стенке резервуара [67].

Проведенный анализ программных комплексов по математическому моделированию физических процессов позволил определить наиболее подходящие для решения поставленной нами задачи: ANSYS и COMSOL Multiphysics [68]. Они имеют основную общую черту – в их основе лежит МКЭ. Однако они имеют ряд особенностей и моделирование в каждом из них производится по своему определенному сценарию.

Данные комплексы позволяют проводить расчеты МКЭ многих процессов и явлений, а пользовательские модули и функции существенно расширяют их возможности. В настоящее время оба пакета позволяют решать широкий спектр задач, в них заложены модули для решения различных связанных проблем, например, электрогидродинамика, термомеханика и т.п. В каждом из пакетов реализована возможность решения связанных упруго-гидродинамических краевых

задач, вычислительная сетка может быть подвижной. Для моделирования подвижной сетки используется ALE-формулировка [68].

Каждый из пакетов в базе имеет достаточно мощные CAD-редакторы, однако в некоторых смыслах они не являются полноценными. Оба пакета работают с геометрическими объектами как с множествами. Редакторы вычислительных сеток в обеих программах позволяют создавать треугольные и четырехугольные (в трехмерном случае тетраэдрические и гексаэдрические) сетки.

Основное отличие ANSYS и COMSOL Multiphysics заключается в их концепции. В COMSOL Multiphysics всегда при использовании любого модуля ясно видна постановка задачи, то есть доступны и уравнения, описывающие процесс, и краевые условия в явном виде [68]. В ANSYS, напротив, математическая постановка скрыта от пользователя за выбором элемента. В ANSYS выбор элемента означает выбор уравнений, описывающих процесс. В COMSOL Multiphysics выбор элемента ни к чему не обязывает, уравнения задаются отдельно при выборе модуля или заданием их коэффициентов и констант. В целом, оба пакета являются мощными комплексами для выполнения расчетов МКЭ. Каждый из них имеет свои недостатки и преимущества [68].

Перед математическим моделированием необходимо также провести анализ и выбрать метод для проведения математического эксперимента. К таким методам численного моделирования относятся [63]:

– бессеточные методы численного моделирования: численные методы, которые не требуют сетки точек, соединенных между собой для аппроксимации уравнений. В бессеточных методах функции и их производные, входящие в исходные уравнения краевой задачи, вычисляются на основе представления в виде рядов периодических или быстро убывающих базисных функций. Преимущества бессеточных методов проявляются в задачах с заранее неизвестной или сложно меняющейся границей расчетной области;

– вариационные методы: метод решения математических задач путем минимизации функционала. Вариационный метод заключается в том, чтобы

использовать для поиска решения какую-то пробную функцию переменных системы, вид которой зависит от нескольких параметров;

– конечный элемент: элемент, имеющий конечные размеры и не являющийся бесконечно малым в смысле дифференциального исчисления. При использовании МКЭ или метода контрольного объема – малые элементы, на которые разбивается область, в которой ищется численное решение поставленной задачи математического моделирования;

– метод граничных элементов: модификация МКЭ для аппроксимации искомых функций, но не в области решения задачи, а на ее границе;

– метод дискретных элементов: семейство численных методов, предназначенных для расчета движения большого числа частиц, без учёта их деформации и возможного разрушения;

– метод конечных разностей: метод решения системы уравнений в частных производных путем ее аппроксимации на расчетной сетке;

– МКЭ: сеточный метод численного решения задач математической физики, в котором дискретизация исходных краевых задач производится на основе вариационных или проекционных методов при использовании специальных конечномерных подпространств функций, определяемых выбранной сеткой;

– метод контрольного объема: метод конечных объемов (устаревшее – метод контрольного объема) – частный случай метода конечных разностей. Аппроксимацию в методе конечного объема получают из дивергентного вида уравнения в частных производных для реализации консервативности уравнений, описывающих законы сохранения;

– метод Монте-Карло: общее название группы численных методов, основанных на получении большого числа реализаций стохастического (случайного) процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи;

– многомасштабное моделирование: реализация математической модели, являющейся иерархией различных математических моделей, описывающих процессы разного пространственного и временного масштаба;

– обратные задачи математического моделирования: получение параметров модели, которые определяют решение прямой задачи (т.е. собственно задачи математического моделирования) (граничные условия, начальные условия и т.д.) при наложении некоторых условий на решение (например, поиск экстремума нормы решения);

– область расчета: область, в которой определена аппроксимация уравнений математической модели;

– сетка конечных элементов: сплошное покрытие области расчета элементарными объемами, имеющими достаточно простую геометрическую форму (например, тетраэдры, гексаэдры и т.д.);

– статистическое моделирование: вид компьютерного моделирования, позволяющий получить статистические данные о процессах в моделируемой системе [63]. Статическое моделирование применяется в случае, если параметры, характеризующие систему, известны с определенной долей погрешности, а также для учета случайных воздействий на систему. Статистическое моделирование проводится с многократным применением детерминированных моделей, в которых определяющие параметры выбираются из некоторых диапазонов случайным образом, а также с добавлением членов, отвечающих за случайные воздействия. Результаты расчетов представляются в виде распределений вероятности характеристик системы [69, 70].

2.3 Математическое моделирование нагрева защитной стенки при пожаре в основном резервуаре типа «стакан в стакане»

Для достижения поставленной задачи разработана математическая модель, которая позволит с помощью МКЭ описать нестационарный процесс теплообмена при пожаре в корпусе ОР резервуара с защитной стенкой. Начальным этапом является моделирование несущей конструкции – стенки РВС номинальным

объемом 700 м^3 . Модель резервуара предполагается без наличия крыши и атмосферозащитного козырька. Также необходимо задать следующие параметры:

1. Размер модели в масштабе 1:7 составляет:

– внутренний диаметр основной стенки модели $d_{\text{ОСМ}} = 1,22 \text{ м}$;

– внутренний диаметр защитной стенки модели $d_{\text{ЗСМ}} = 1,62 \text{ м}$;

– высота основной стенки модели $h_{\text{ОСМ}} = 1,3 \text{ м}$;

– высота защитной стенки модели $h_{\text{ЗСМ}} = 1 \text{ м}$.

2. Вид нефтепродукта – бензин АИ-92.

3. Форма пламени. В математическом моделировании, согласно [15], принимаем идеализированную форму излучающей поверхности (пламени) в виде вертикального цилиндра с основанием, равным диаметру основного резервуара 1,22 м. Также в [15] приведены формулы для определения коэффициента облученности по сумме вертикальной и горизонтальной составляющих излучения на облучаемый элемент.

4. Высота пламени. Высоту пламени определяем по формуле Томаса, приведённой в [71], при условии штиля (скорость ветра равна $w_0 = 0$). Принимаем в расчёте высоту пламени, равную 4,6 м (над моделью резервуара).

5. Температуру пламени бензина принимаем $900 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. Плотность теплового потока – 50 кВт/м^2 [40].

7. Материал и толщина ОР и ЗС. Марка конструкционной стали 09Г2С, с толщиной листов стенки 12 мм – ОР; 4 мм – ЗС (конструктивный минимум) [1].

8. Начальная температура окружающего воздуха $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Так как модель резервуара с защитной стенкой имеет форму цилиндра, выбираем цилиндрическую систему координат – 2D Axisymmetric.

Принципиальная модель резервуара изображена на рисунке 2.1.

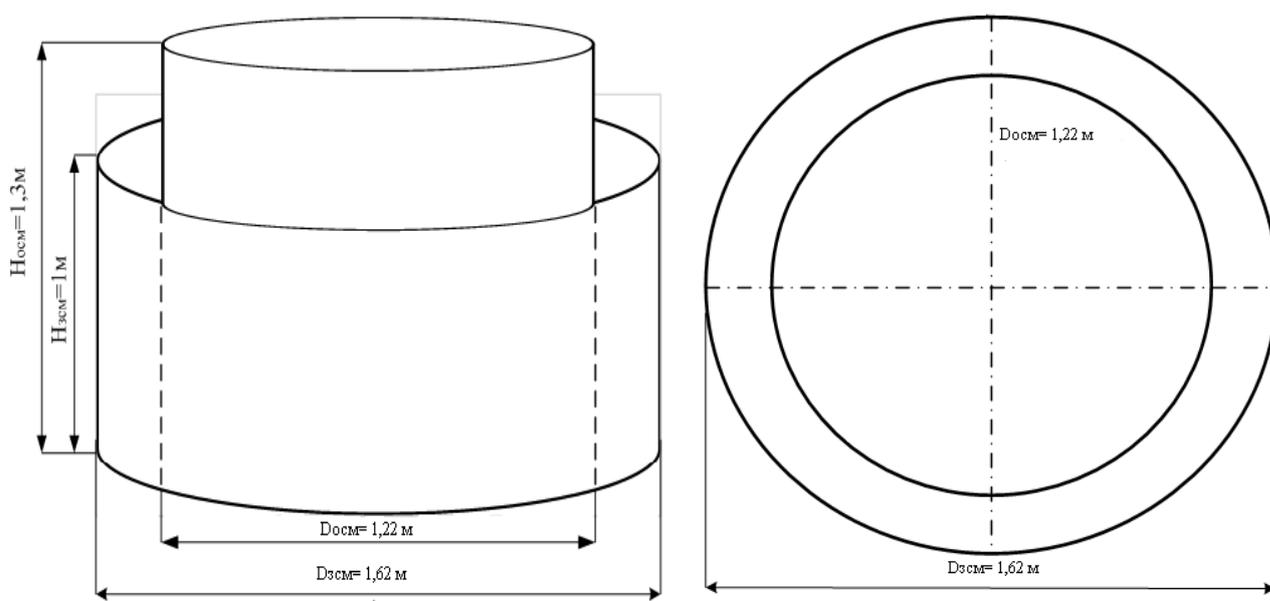


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема модели резервуара с защитной стенкой

Геометрия и границы модели в цилиндрической системе координат выполнены в программе COMSOL Multiphysics и изображены на рисунках 2.2–2.3.

Задачей является проведение математического эксперимента по определению температурных полей ЗС резервуара типа «стакан в стакане» при воздействии на неё тепловых потоков от пламени пожара в ОР в зависимости от времени. Пожар является источником излучения, которое распространяется во все стороны и греет защитную стенку вокруг резервуара.

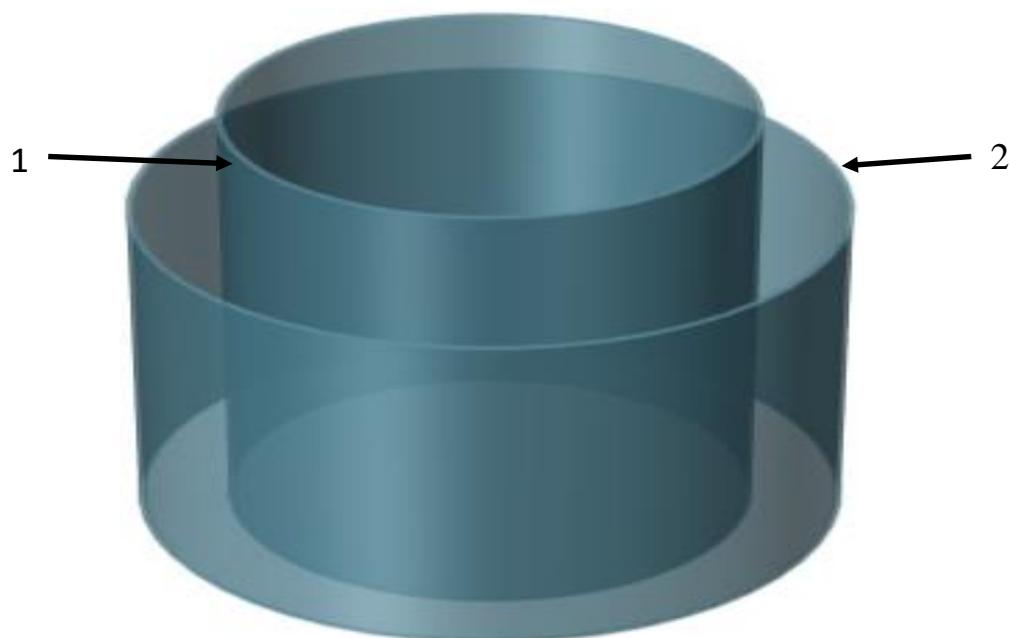


Рисунок 2.2 – Геометрия модели для проведения математического эксперимента в COMSOL Multiphysics: 1 – основной резервуар; 2 – защитная стенка

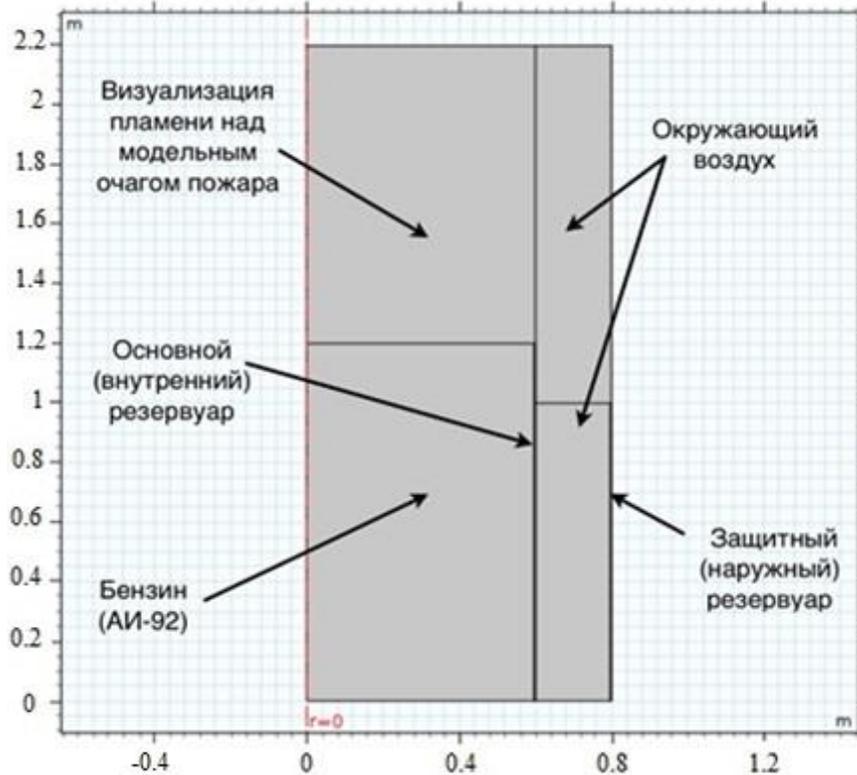


Рисунок 2.3 – Границы модели резервуара типа «стакан в стакане» в COMSOL Multiphysics

Так как задача комплексная и состоит из множества физических процессов, которые связаны между собой, воспользуемся несколькими дополнительными модулями, а именно:

– «Heat Transfer with Radiation in Participating Media» – для расчета температурных полей ЗС резервуара в зависимости от времени.

Уравнение теплового баланса с учётом того, что излучение от пламени пожара является основным источником нагрева корпусов резервуара и воздуха вокруг него будет следующим:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = Q_r + Q, \quad (2.1)$$

где ρ – плотность материала, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

T – температура, К; q – количество теплоты с поверхности, описываемое законом теплопроводности Фурье:

$$q = -\lambda \nabla T, \quad (2.2)$$

где λ – теплопроводность материала, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

Q_r – количество теплоты, получаемое от излучения, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$;

Q – количество теплоты, получаемое от иных источников нагрева, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

В модель добавляется расчётный узел «Radiation in Participating Media», учитывающий распространение излучения в среде воздуха. В этих узлах решается уравнение (2.3) и вычисляется значение Q_r , входящее в состав уравнения теплового баланса (2.1):

$$Q_r = \kappa(G - 4\pi I_b), \quad (2.3)$$

где κ – коэффициент абсорбции, м^{-1} ;

G – падающее излучение $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$;

I_b – интенсивность излучения черного тела, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}_p^{-1}$, выражаемое из уравнения (2.4):

$$I_b = \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi}, \quad (2.4)$$

где n – показатель преломления;

σ – постоянная Стефана – Больцмана, $5,64 \cdot 10^{-8}$, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$.

Количество теплоты, получаемое от излучения, Q_r аппроксимируется уравнением (2.5), решаемым в указанном расчётном узле:

$$\nabla(D_{p1} \nabla G) + \kappa(G - 4\pi I_b), \quad (2.5)$$

где D_{p1} – коэффициент диффузии, который находится из уравнения (2.6):

$$D_{p1} = \frac{1}{3(\kappa + \sigma_s)}, \quad (2.6)$$

где σ_s – коэффициент рассеяния, м^{-1} .

Значение интенсивности падающего теплового потока от излучения зависит от степени черноты воспринимающей поверхности, учитываемой в математической модели расчётным узлом «Opaque Surface»:

$$n(D_{p1} \nabla G) = -q_{r.net}, \quad (2.7)$$

где $q_{r.net}$ – чистый излучаемый тепловой поток, пересчитываемый в зависимости от степени черноты воспринимающей поверхности:

$$q_{r.net} = \frac{\varepsilon}{2(2 - \varepsilon)} (4\pi I_b - G), \quad (2.8)$$

где ε – коэффициент излучения.

Через внешнюю границу ОР и на внутреннюю границу ЗС излучение проходит частично, следовательно, коэффициент излучения на этих поверхностях задаем равным 0,4.

Через границу между бензином и пламенем излучение не передается, следовательно, на ней коэффициент излучения задаем равным 0.

От границ, которые непосредственно соприкасаются с воздухом, излучение не отражается, а проходит без потерь, следовательно, на этих границах задаем коэффициент излучения равным 1 (рисунок 2.4).

Для учета излучения между стенками резервуаров добавляем узел «Diffuse Surface», в котором учитывается составляющая радиационного источника тепла:

$$q = \varepsilon(G - e_b(T)), \quad (2.9)$$

где $e_b(T)$ – полная излучающая мощность черного тела.

На внешней границе ОР и внутренней границе ЗС добавляем вышеупомянутое условие нагрева излучением между поверхностями. Степень излучения поверхности задаем 0,4, как и в предыдущем пункте.

Так как внешняя граница ЗС окрашена, для нее добавляем отдельный узел «Diffuse Surface», в котором задаем коэффициент излучения равным 0,7, исходя из начальных данных.

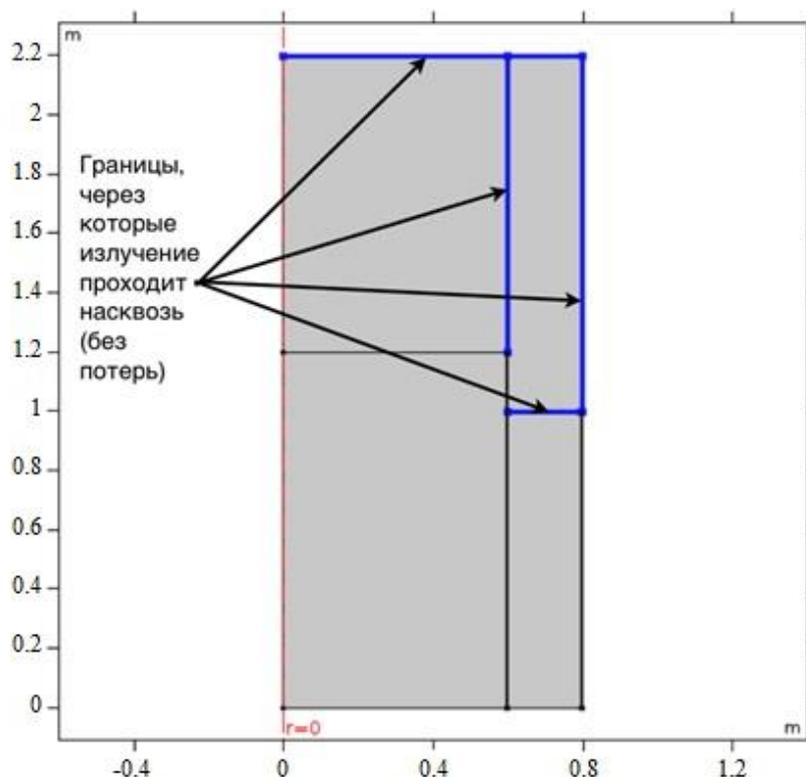


Рисунок 2.4 – Границы излучения

Для учета конвективного теплообмена между поверхностью внешней границы ЗС и окружающей средой добавляем узел «HeatFlux», который добавляет в общее уравнение теплового баланса (2.1) количественную составляющую теплоты, исходя из формулы Ньютона – Рихмана для конвективной теплоотдачи:

$$q = \alpha \cdot (T_{\text{ext}} - T), \quad (2.10)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности (принимается равным $15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, исходя из условий задачи); T_{ext} – внешняя температура, К.

На границе выхода воздуха и пламени в окружающую среду задаем граничное условие «Outflow», которое добавляет условие передачи тепла с преобладанием конвекции.

Для учета того, что на границе соприкосновения бензина и пламени передача тепла теплопроводностью крайне мала, а основным источником тепла является конвекция, добавляем узел «Thin Layer», в котором задаем относительно малую теплопроводность слоя $0,001 \text{ (Вт/м} \cdot \text{К)}$ и его толщину – 1 (мм). Данное граничное

условие решает систему уравнений (2.11)–(2.14) и добавляет ещё один источник теплоты в общее уравнение теплового баланса (2.1).

$$\rho_{si} c_{p,si} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla_t q_{si} = Q_{si}, \quad (2.11)$$

$$q_{si} = -k_{si}(\nabla_t T_s + \nabla_n T_s), \quad (2.12)$$

$$T_u = (T_s)_{L=0}, \quad (2.13)$$

$$T_d = (T_s)_{L=d_s}, \quad (2.14)$$

где ρ_{si} – плотность слоя, кг/м³;

$c_{p,si}$ – удельная теплоемкость слоя, Дж/кг·К;

k_{si} – теплопроводность слоя, Вт/м·К;

d_s – толщина слоя, м;

Q_{si} – количество теплоты, приложенное к слою, Вт/м³.

Так как программа COMSOL Multiphysics использует МКЭ, необходимо всю расчетную область модели разбить на элементарные фигуры, например, треугольники, в вершинах которых будут рассчитываться все необходимые нам параметры, и построить сетку. Для более точного расчета сетку нужно сделать как можно меньше, при этом не забывая об оптимизации, так как слишком маленькая сетка потребует несопоставимое с современными реалиями количество оперативной памяти [67, 69].

В областях модели, в которых надо знать точные значения наших параметров, то есть на стенках резервуара с защитной стенкой, мы уменьшаем сетку. Общий вид разбиения модели на конечные элементарные фигуры изображен на рисунке 2.5.

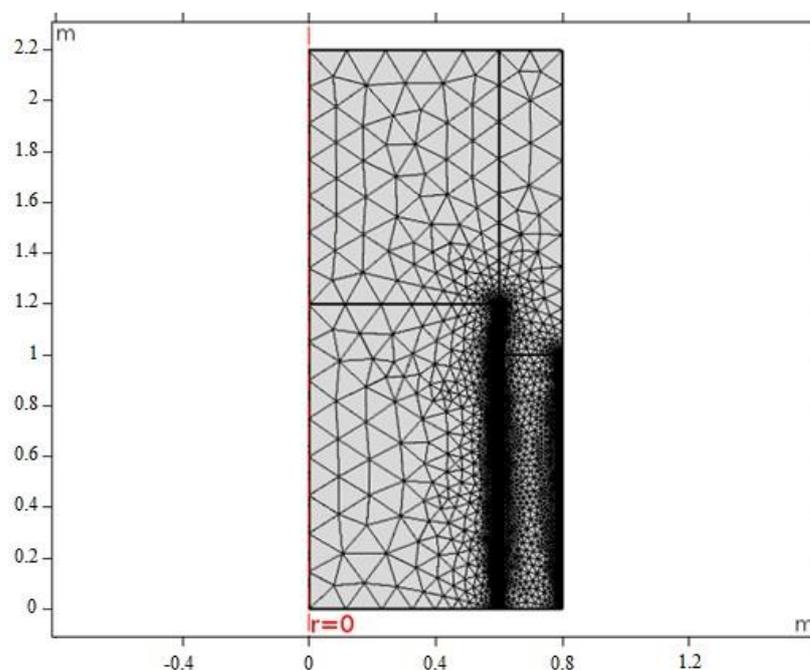


Рисунок 2.5 – Построение сетки по всей модели

Сформулированная математическая модель позволяет определять распределение температурных полей по корпусу основного резервуара и защитной стенке модели резервуара с защитной стенкой при пожаре в основном резервуаре [15].

2.4 Результаты математического моделирования

Численный расчет математической модели позволил нам получить результаты по распределению температурных полей на корпусах резервуара с защитной стенкой. Графическая интерпретация температурных полей модели резервуара при пожаре в ОР в условиях влияния различных скоростей ветра представлена на рисунках 2.6–2.8.

Численный расчёт показал, что корпус основного резервуара нагревается до 650 °С, а защитная стенка до 500 °С, что превышает критическую температуру нагрева для стали. В результате математического моделирования установлено, что сформулированная математическая модель позволяет определять распределение температурных полей по всей высоте корпуса защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре в основном резервуаре.

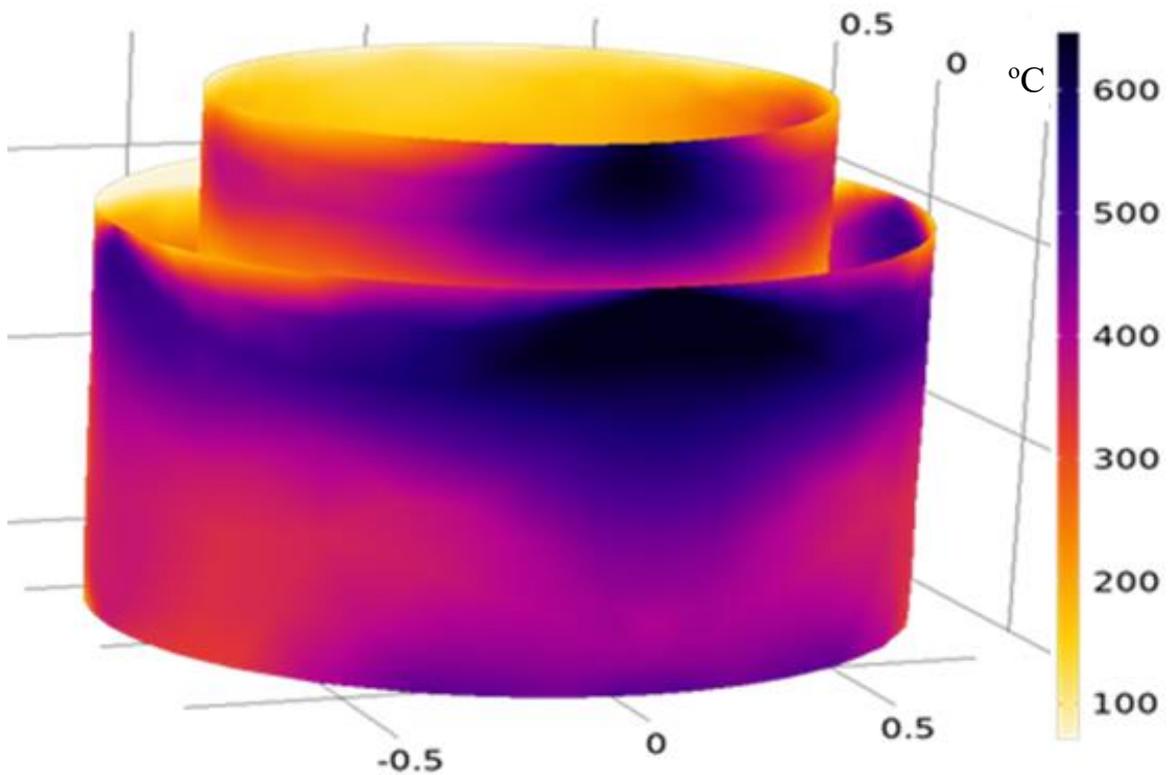


Рисунок 2.6 – Изоповерхности температуры ОР и ЗС модели резервуара с защитной стенкой при пожаре в основном резервуаре при скорости ветра 0 м/с

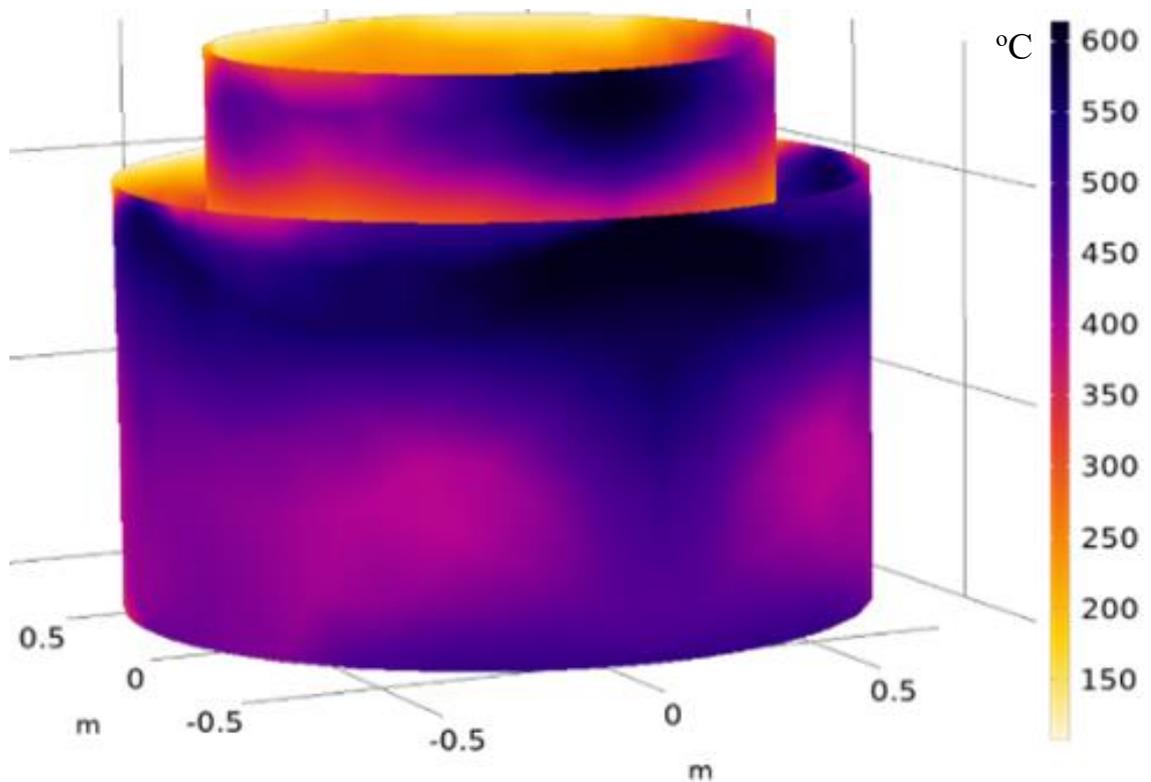


Рисунок 2.7 – Изоповерхности температуры ОР и ЗС модели резервуара с защитной стенкой при пожаре в основном резервуаре при скорости ветра 3 м/с

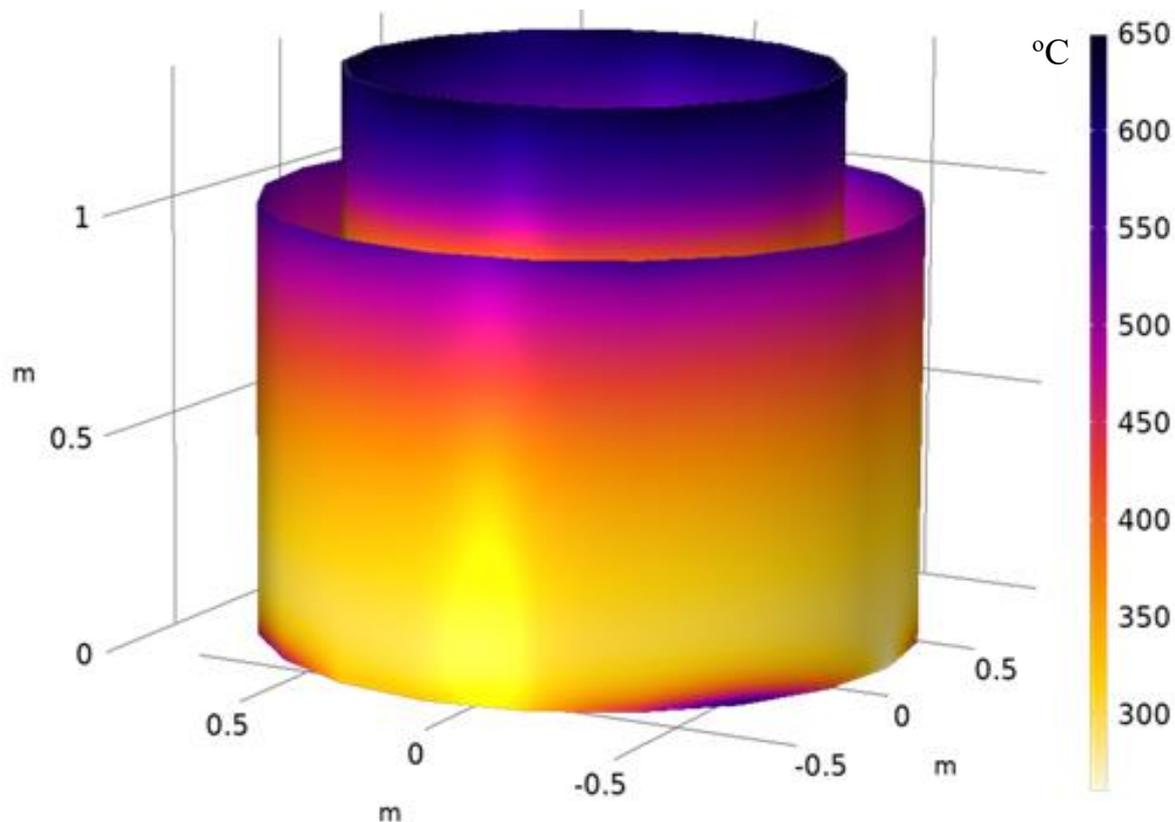


Рисунок 2.8 – Изоповерхности температуры ОР и ЗС модели резервуара с защитной стенкой при пожаре в основном резервуаре при скорости ветра 5 м/с

Проведенные численные расчёты подтверждают гипотетическое мнение о том, что при возрастании скорости ветровых потоков меняется динамика нагрева корпусов. Необходимо отметить, что тепловые нагрузки, получаемые защитной стенкой от воздействия теплового потока в условиях штиля, носят неравномерный, но ожидаемый характер. Степень воздействия тепловых потоков зависит от высоты защитной стенки и удалённости от объекта облучения.

В результате математического моделирования установлено, что сформулированная математическая модель позволяет определять распределение температурных полей по корпусу ОР и ЗС при пожаре в основном резервуаре.

Вместе с этим для подтверждения адекватности математической модели и результатов математического моделирования необходимо провести её верификацию. Для чего необходимо реализовать натурный эксперимент с физической моделью резервуара с защитной стенкой, аналогичной по геометрическим и физическим параметрам математической модели. При подтверждении удовлетворительной сходимости результатов математического

моделирования и физического эксперимента появится возможность использования численных расчётов по предлагаемой математической модели для оценки теплового состояния защитной стенки при пожаре в основном резервуаре для проектируемых резервуаров типа «стакан в стакане» натуральных размеров.

Выводы по второй главе

1. Проведен обзор современных программных продуктов, позволяющих проводить численное моделирование физических процессов. В результате обзора выбран и использован в работе программный продукт COMSOL Multiphysics, позволяющий решать поставленную теоретическую задачу численным методом.

2. Построена математическая модель резервуара типа «стакан в стакане» с геометрическими и теплофизическими параметрами, подобными натурному резервуару номинальным объемом 700 м^3 . В качестве численного метода решения дифференциальных уравнений с частными производными использован метод конечных элементов.

3. В результате математического моделирования установлено, что сформулированная математическая модель позволяет определять распределение температурных полей по всей высоте корпуса защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре в основном резервуаре.

4. Результатом численного расчёта является визуализация получаемых изоповерхностей, демонстрирующая распределение нестационарных температурных полей на корпусах резервуара. Расчётом установлено, что корпус основного резервуара нагревается до 650 °C , а защитная стенка до 500 °C , что превышает критическую температуру нагрева для стали.

5. Проведенные численные расчёты подтверждают гипотетическое мнение о том, что при возрастании скорости ветровых потоков меняется динамика нагрева корпусов. В результате математического моделирования установлено, что

сформулированная математическая модель позволяет определять распределение температурных полей по корпусу ОР и ЗС при пожаре в основном резервуаре.

6. Для подтверждения адекватности разработанной математической модели необходимо осуществить процедуру верификации, что позволит проводить численные расчёты для крупногабаритных нефтяных резервуаров с ЗС, имеющих стандартизированные размеры.

ГЛАВА 3 ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО НАГРЕВУ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ МОДЕЛИ РЕЗЕРУАРА ТИПА «СТАКАН В СТАКАНЕ» В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

3.1 Обзор моделей нефтяных резервуаров, применяемых в научных исследованиях по пожарной безопасности

В данном разделе представлен анализ моделей нефтяных резервуаров, ранее использовавшихся для проведения экспериментальных исследований по изучению особенностей их пожарной опасности и способов противопожарной защиты. Модель – это форма отображения определённого фрагмента действительности (предмета, явления, процесса, ситуации) – оригинала модели, которая содержит существенные свойства моделируемого объекта и может быть представлена в абстрактной или материальной форме [72]. По способу отображения действительности различают три основных вида моделей – эвристические, натурные (физические) и математические.

Наиболее значимым научным трудом, признанным во всём мире по указанной тематике, считается цикл работ [23, 31–33, 45], выполненных российскими учёными В.И. Блиновым и Г.Н. Худяковым в 50–60-х годах прошлого века. Их труд опубликован под названием «Диффузионное горение жидкостей» [23]. Большинство данных получено в результате совместной работы сотрудников лаборатории интенсификации топочных процессов Энергетического института академии наук СССР и теплофизической лаборатории ЦНИИПО НКВД СССР.

В работе В.И. Блинова [23] экспериментально изучалась скорость выгорания нефтепродуктов в резервуарах. Для проведения экспериментов применялись сосуды различных диаметров, это и горелки диаметром до 2 см и модели резервуаров диаметром от 1 до 23 м. В результате экспериментов установлено, что в резервуарах, имеющих диаметры более 1 м, явно наблюдаются беспорядочные турбулентные движения пламени и изменение скорости выгорания жидкости

незначительно. Установлено, что при горении жидкостей в резервуарах диаметром более 0,8 м критерий подобия, называемый числом Рейнольдса, превышает свою критическую величину. Указанный критерий определяет переходный режим от ламинарного горения жидкостей к их турбулентному горению.

В целом сделан важный вывод о том, что режим горения в таких резервуарах является турбулентным, теплопередача от пламени к жидкости происходит, в основном, излучением, а скорость выгорания становится постоянной, при этом пламя характеризуется как оптически тонкое. Также установлено, что исследование процесса горения нефтепродуктов в резервуарах значительных размеров можно проводить на резервуарах с диаметрами от 1 до 2 м, которые будут являться моделями резервуаров больших диаметров.

Результаты, полученные в работе [40], говорят о том, что при скорости ветра $v_B = 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ для резервуара с диаметром 21 м плотность теплового потока, равная $20\text{--}50 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$, характерна почти для всего зеркала горючего, а для резервуара диаметром 40 м плотность теплового потока $50\text{--}100 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ равна практически для всего зеркала горючего.

В экспериментальной работе, выполненной И.И. Петровым и В.А. Герасимовым, изучался вопрос влияния охлаждения стенок резервуара водой на скорость прогревания бензина. При проведении огневых испытаний использованы два одинаковых резервуара с диаметрами 1,3 м. На одном из них было дополнительно установлено оросительное кольцо в верхнем поясе. Оросительное кольцо было необходимо для моделирования расхода воды при охлаждении корпуса резервуара [31].

Работа, выполненная специалистами В.П. Лосевым и М.Б. Казаковым, была посвящена получению данных, связанных с механизмом тушения нефтепродуктов пеной. При проведении полигонных исследований авторы работы использовали резервуар с размерами: диаметр 1,3 м, высота 1,5 м. Внутри модельного резервуара располагался ряд термопар для измерения температуры по высоте слоя горящих жидкостей, таких как дизельное топливо, керосин, бензин [32].

Специалистами В.А. Герасимовым, И.И. Петровым, В.Ч. Реуттом проводилась работа по изучению влияния распылённой воды на тушение пламени бензинов. Для проведения огневых экспериментов использовался модельный ряд резервуаров с диаметрами: 1,3 (высота примерно 1 м); 2,6; 5,3; 8,6 м и 22,5 м. Время свободного горения составляло 30–60 с. Отдельно проведены эксперименты по изучению тушения распылённой водой бензина, имеющего прогретый слой определённой толщины. В этих испытаниях применялся резервуар диаметром 1,3 м. В нём находилась горючая жидкость с высотой разлива около 1 м [33].

В работе [29] описаны огневые испытания, проводимые для исследования изменения основных геометрических параметров пламени, а также закономерностей распределения падающих тепловых потоков вокруг горячей емкости с нефтепродуктом. Для проведения экспериментов использовались два типа емкостей. Первая ёмкость выполнялась в виде стального прямоугольника площадью 16 м^2 с высотой 1 м, в качестве второй ёмкости использовалась модель резервуара вместимостью 3000 м^3 . Модель выполнялась в натуральную величину с верхним поясом высотой 1,2 м, установленным на опору-этажерку на высоте 12 м от уровня земли. Диаметр резервуара составлял порядка 19 м.

При проведении экспериментальных исследований, связанных с моделированием теплового воздействия очага пожара на оболочку горизонтального резервуара, применялся модельный очаг пожара [30]. Он выполнялся в виде нескольких отдельных металлических противней, наполненных горючей жидкостью с общей площадью $13,5 \text{ м}^2$. Ширина одного отдельно взятого противня составила 1,5 м, превышение 1 м обосновывается созданием условий для диффузионного горения паров ГЖ при полностью развитой турбулентности [30, 73].

Значительный вклад в моделирование нефтяных резервуаров внес Дмитриев Н.Н. [74]. Им рассмотрен вопрос о выборе модели резервуара в зависимости от существующих методов моделирования при проведении исследований на прочность конструкции, и подтвержден главный постулат проектирования и изготовления моделей РВС: это точность изготовления деталей модели и самой модели в целом.

В указанной работе определено, что геометрические параметры моделей РВС зависят от габаритных размеров натуральных РВС, которые определяются из решения критериальных уравнений. В результате их решения получены численные значения параметров модели РВСПК вместимостью 50000 м³. Полученные параметры модели составили следующие значения: высота корпуса – 0,76 м, диаметр – 1,45 м. Толщина стенки нижнего пояса 0,19 см.

На кафедре ПБТП Академии ГПС МЧС России проведен цикл работ, связанных с изучением параметров защитных преград, ограничивающих разлив жидкости при квазимгновенном разрушении резервуара. В ходе научно-исследовательской работы доктором наук С.А. Швырковым была разработана модель нефтяного резервуара РВС-2000 м³. При её создании обеспечено геометрическое подобие модели и натуре резервуара с соблюдением постоянного отношения между линейными размерами всех величин. Масштаб моделирования принят равным 1:30. Параметры модельного резервуара составили: $d_p = 0,5$ м, высота $h_p = 0,4$ м, объем $V_p = 0,079$ м³ [75].

В работе [76] обосновывается модель нефтяного резервуара РВС-1000 м³. Масштаб моделирования был принят равным 1:50. При этом параметры модельного резервуара составили: $d_p = 0,21$ м, высота $h_p = 0,26$ м, объем $V_p = 0,009$ м³.

В работе [77] моделируется процесс удержания волны прорыва ЗС, установленной на различных расстояниях от ОР. Прототипом модели является резервуар с защитной стенкой вместимостью 700 м³. С учетом соблюдения критериев подобия и условий моделирования гидравлических явлений параметры модели составили: диаметр и высота ОР – 0,35 м и 0,3 м соответственно, и диаметр и высота ЗС от 0,45 до 0,55 м. В качестве ЗС используются стальные цилиндрические обечайки разного диаметра, что позволяет устанавливать их на разном расстоянии от ОР [77].

Автором работы [78] проверка адекватности разработанной математической модели была проведена с помощью лабораторных экспериментов, для которых создан лабораторный стенд с моделью резервуара РВС-700 м³. Масштаб

моделирования составил 1:21 с соблюдением геометрического подобия. Параметры модельного резервуара составили: $d_p = 0,5$ м, высота $h_p = 0,43$ м, объем $V_p = 0,084$ м³.

Профессором кафедры ПБТП Сучковым Виктором Петровичем проведена работа [25] в области изучения теплового и концентрационного режимов в резервуаре при воздействии на него падающего излучения. В рамках работы выполнено моделирование теплового воздействия на корпус резервуара от факела горящего нефтепродукта в соседнем резервуаре. Для решения задачи им разработан лабораторный стенд. Он состоял из двух резервуаров, геометрически подобных РВС-5000 м³ (в масштабе 1:35). Габаритные размеры резервуаров: диаметр резервуара 0,65 м, высота 0,36 м [25].

Для подтверждения результатов исследования, полученных при проведении экспериментов на лабораторных установках, были осуществлены крупномасштабные полигонные испытания в Тюменской области. Экспериментальная база состояла из двух полигонных РВС со следующими параметрами: диаметр – 3,15 м, высота стенки – 1,25 м.

В работе [79] изучалось распределение концентраций паров ЛВЖ в паровоздушном пространстве резервуара, а также ряд схожих научных задач. Для этого были изготовлены четыре экспериментальные модели резервуара РВС-5000 м³. Всем моделям присвоен классификатор от ЭР-1 до ЭР-4. Их геометрические параметры представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Геометрические параметры экспериментальных резервуаров

Параметр	ЭР-1	ЭР-2	ЭР-3	ЭР-4
Диаметр, м	0,228	0,360	0,650	2,28
Площадь испарения, м ²	–	–	–	4,07
Высота, м	0,119	0,198	0,360	1,19
Площадь днища, м ²	$4,07 \cdot 10^{-2}$	0,102	0,332	–
Объем, м ³	$5 \cdot 10^{-3}$	$22,4 \cdot 10^{-3}$	$125 \cdot 10^{-3}$	5
Площадь приточного отверстия, м ²	$2,82 \cdot 10^{-5}$	$7,85 \cdot 10^{-5}$	$28,9 \cdot 10^{-5}$	–
Масштаб экспериментального резервуара	1:100	1:60	1:35	1:10

В работе [43] описаны проведенные огневые эксперименты на модели РВСП-1000 м³ с масштабом 1:5. Геометрические параметры модели при таком масштабе составили для внутреннего диаметра порядка 2,1 м, а высоты – 2,4 м. Эксперимент позволил наблюдать поведение понтона и стационарной крыши из алюминия при различных вариантах пожара.

При изучении вопроса подачи пены под слой ГЖ во время пожара также применяются модели нефтяных резервуаров. В Японии проведены эксперименты на моделях резервуаров диаметрами: 1,5; 1,75; 4,8 м. Там же приведены результаты экспериментов по тушению сырой нефти и бензина в модельном резервуаре диаметром 2,7 м [80].

В книге [81] приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований по работе резервуаров и газгольдеров в различных условиях эксплуатации, на основе которых предложены методика расчета их несущих элементов на прочность и устойчивость, а также нормы допускаемых отклонений от проектной формы. Экспериментальные исследования выполнены на крупных моделях резервуаров с диаметрами 3, 6 и 9 м и высотой 2–2,5 м. Толщина металлических листов моделей резервуаров составляла 1,2 мм в верхней части и 2,5 мм в нижней части.

Значительный интерес представляют работы, проведенные за рубежом, опыт которых необходимо использовать при проектировании экспериментальной модели резервуара в рамках изучаемого вопроса.

Наиболее ранняя работа [82], в которой использовалась модель резервуара, была выполнена учеными из США. В ней впервые применялась модель нефтяного резервуара с диаметром 6 м и высотой 7,2 м. С помощью этих исследований были сформулированы требования к СПЗ нефтяных резервуаров различной вместимости, включая противопожарные разрывы в резервуарных парках.

В исследованиях, проведенных в США в 2008 г. [83], изучалась возможность применения расширяющейся пены на сжиженном природном газе (СПГ), предназначенной для снижения взрывоопасной концентрации паров и интенсивности теплового излучения при пожаре его пролива. Для проведения

огневых испытаний и моделирования промышленных разливов СПГ использовались два заглубленных и забетонированных подземных поддона. Большой поддон площадью 65 м^2 и высотой борта $1,2 \text{ м}$ и малый поддон площадью 45 м^2 и высотой борта $2,4 \text{ м}$.

В работе [84] описаны эксперименты, связанные с горением бензина и дизельного топлива на слое воды, для детального определения геометрических и термических характеристик пламени, а также распределения энергии излучения, её среднего значения и общего излучения пламени. В качестве моделей резервуаров использованы цилиндрические железобетонные кольца диаметром $1,5, 3, 4, 5, 6 \text{ м}$.

В источнике [85] представлены результаты экспериментов, выполненных на резервуарах диаметром и высотой 1 м . В работе рассматривался вопрос возможности распространения пожара с резервуара на резервуар, заполненный бензином. Установлено, что температура жидкости в резервуаре имеет равномерное распределение по вертикали в центре и на расстоянии 1 см от обогреваемой стенки.

Модель резервуара использовалась в эксперименте по определению эффективности предотвращения образования взрывоопасных концентраций с помощью плавающих шаров, разработанных в Швейцарии. Они применяются для покрытия ГЖ в промышленных резервуарах с целью предупреждения и тушения пожаров в них. Эксперимент проведен в резервуаре диаметром $1,2 \text{ м}$ [86].

Для изучения влияния теплового потока на основную и защитную стенки и на соседние резервуары при горении бензина в основном резервуаре и при различных ветровых нагрузках в рамках исследований резервуара с защитной стенкой проводился эксперимент с использованием модели реального объекта – резервуара объемом 125 тыс. м^3 с геометрическими размерами: диаметр ОР – $1,41 \text{ м}$, высота – $0,4 \text{ м}$, диаметр ЗС – $1,51 \text{ м}$, высота – $0,33 \text{ м}$, толщина стенок $0,002 \text{ м}$ [14].

Проведённый анализ позволил классифицировать модели резервуаров на несколько самостоятельных блоков в зависимости от общего направления научно-исследовательских работ. Результаты классификации представлены на рисунке 3.1 в виде структурно-логической схемы [66].



Рисунок 3.1 – Классификация моделей резервуаров по блокам в зависимости от общего направления научно-исследовательских работ

Анализ также показал, что применение моделей нефтяных резервуаров при постановке экспериментальных исследований является общепризнанной и востребованной практикой, применяющейся в различных научных отраслях, в том числе и в области научных исследований по пожарной безопасности [87].

3.2 Разработка проекта стенда для проведения огневых испытаний

Для проведения физического моделирования создается экспериментальный стенд, основой которого является модель объекта исследования. В нашем случае моделью объекта исследования является резервуар с защитной стенкой. Модель объекта исследования должна являться физическим подобием оригинала. Определяющую роль при его моделировании будет играть диаметр, который наравне с высотой является основным геометрическим параметром, и должен быть подобен натурному объекту.

При создании проекта экспериментальной модели резервуара с защитной стенкой, необходимой для проведения огневых испытаний, позволяющих изучить влияние тепловых потоков, падающих на обогреваемую поверхность ЗС резервуара, достаточно использовать критерии, на основании которых обосновывается выбор модельного резервуара [88]. Это критерии геометрического подобия резервуара и зависящего от него подобия пламени.

Нами определен необходимый и достаточный диаметр основного модельного резервуара типа «стакан в стакане» для выполнения огневых испытаний – от 1 до 1,5 метров [88]. Объявленный размер будет считаться основополагающим, от которого, в соответствии с масштабом, проектируются и остальные параметры: высота ОР, диаметр и высота ЗС.

При проектировании модели резервуара с защитной стенкой в качестве натурального объекта целесообразней выбрать резервуар с номинальным объёмом 700 м³ и высотой 9 м, так как он схож геометрическими размерами с резервуаром, имеющим номинальный объём 1000 м³ и высоту 12 м. Однако при их одинаковых диаметрах (10,43 м) разность высот корпуса достигает 3 м [1].

При соблюдении геометрического подобия модели РВС-700 м³ уменьшается высота ее корпуса в сравнении с моделью РВС-1000 м³, однако соблюдается одинаковость диаметров, что значительно снижает затраты на приобретение металлолистов, которые необходимо использовать при создании модели. При этом результаты исследования возможно будет использовать в более широком номенклатурном ряду нефтяных резервуаров.

При проектировании натурального резервуара необходимо учитывать, что расстояние между ОР и ЗС не должно быть меньше 1,8 м, а высота защитного резервуара должна составлять не менее 80 % высоты основного резервуара. Данное положение обязательно для предотвращения переливов через ЗС нефтепродуктов в случае разгерметизации ОР. В случае попадания нефтепродуктов в межстенное пространство уровень налива жидкости не должен превышать 1 м до края ЗС [1, 2, 46, 52].

Способ изготовления резервуара с защитной стенкой выбирается исходя из объема резервуара: резервуары небольшой номинальной вместимости изготавливаются методом рулонирования, а большого объема – методом полистовой сборки. При этом применяют различные марки стали, а её толщина прямо пропорционально зависит от объема резервуара. Также при выборе толщины металла учитываются припуски на коррозию металла.

В экспериментальных исследованиях В.П. Сучкова [25], связанных с проверкой предложенной модели динамической устойчивости системы «резервуарный парк – нефтепродукт», использовались два полигонных РВС с толщиной стенки 3 мм.

При изучении распределения концентраций паров ГЖ в газовом пространстве резервуара [89] в рамках указанной работы был разработан полупромышленный резервуар РВС-5. Модель РВС-5 выполнена из стали.

В работе [74] моделировался нефтяной резервуар с плавающей крышей вместимостью 50000 м³. Модель резервуара выполнена из органического стекла марки ТОСП с толщиной стенки нижнего пояса 19 мм.

Результаты исследований [81] были получены при проведении экспериментов, выполненных на крупных моделях резервуаров с диаметрами 3, 6 и 9 м и высотой 2–2,5 м. Толщина металлических листов моделей резервуаров составляла 1,2 мм в верхней части и 2,5 мм в нижней части.

В течение последних десяти лет во многих странах Европы и США введены в действие новые редакции стандартов на сооружение вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов [88]. Можно отметить стандарт API Standard 650, Межгосударственный стандарт, стандарт Республики Беларусь, Украины [1, 90–92]. В новых стандартах существенно повышены требования к надежности стенки и днища резервуаров. В [1], [2], [93] указания по проектированию резервуаров с защитной стенкой приведены отдельным разделом. В большей степени новые требования касаются резервуаров I и II классов безопасности (вместимостью 20...120 тыс. м³), в которых для изготовления нижних поясов стенки и наружного контура днища применяется

листовая сталь повышенной прочности класса С390 и С440. Рассмотрим конкретный пример для резервуара с защитной стенкой $V = 50$ тыс. м³. Расчеты с учетом требований [1, 92], показали, что при применении качественных сталей класса прочности С390 толщина первого пояса рабочего резервуара составляет 26 мм. Принятая толщина должна обеспечить прочность и трещиностойкость стенки.

При проектировании резервуара с защитной стенкой предотвращение лавинообразного разрушения рабочего резервуара обеспечивается применением для расчетных поясов рабочей и защитной стенки листовой нормализованной стали класса прочности С355 и С390 [88]. Допускается применение других марок сталей с соответствующими механическими свойствами.

Толщина поясов резервуара составляет конструктивный минимум 4 мм. Материал и толщина резервуара и защитной стенки: марка конструкционной стали 09Г2С-12 с толщиной листов корпусов 12 мм – внутренний резервуар; 7 мм – внешний резервуар [1, 2, 46] и погодозащитный козырёк.

При наличии на защитном резервуаре атмосферного козырька, перекрывающего межстенное пространство между наружной и внутренней стенками, должна быть обеспечена вентиляция межстенного пространства путем установки вентиляционных патрубков, равномерно расположенных по периметру на расстоянии не более 10 м друг от друга [46].

Межстенное пространство между ОР и ЗС перекрывается погодозащитным козырьком, предотвращающим падение снега с крыши основного резервуара в межстенное пространство [22].

Погодозащитный козырек носит рекомендательный характер и может не входить в комплектацию резервуара с защитной стенкой.

Обзор моделей нефтяных резервуаров, применяемых в научных исследованиях по пожарной безопасности, позволил разработать проект модели резервуара с защитной стенкой, геометрические параметры которой аналогичны параметрам математической модели (см. рисунок 2.1). По этому проекту изготовлена модель для проведения огневых испытаний (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Модель резервуара типа «стакан в стакане»:
1 – основная стенка; 2 – межстенное пространство; 3 – защитная стенка

Модель обладает физическим подобием натурального объекта. Определяющую роль при его моделировании играл диаметр, который вместе с высотой является основным геометрическим параметром, подобным прототипу [87, 88, 93].

Модель резервуара с защитной стенкой состоит из двух металлических резервуаров, основного (внутреннего) и защитного (наружного). Основные размеры резервуаров [88]:

- диаметр основной стенки внутреннего резервуара модели $d_{\text{ОСМ}} = 1,22$ м;
- диаметр защитной стенки внешнего резервуара модели $d_{\text{ЗСМ}} = 1,62$ м;
- высота основной стенки внутреннего резервуара модели $h_{\text{ОСМ}} = 1,3$ м;
- высота защитной стенки внешнего резервуара модели $h_{\text{ЗСМ}} = 1$ м.

Основной резервуар (внутренний) имеет приварное стальное днище. Защитный резервуар (внешний) представляет собой стальное кольцо без днища. Марка конструкционной стали 09Г2С-1. Толщина защитной стенки 4 мм и основного резервуара – 12 мм [88, 93].

Обе стенки имеют по две приваренные ручки, которые позволяют с помощью крюков (лебёдок и т.д.) перемещать резервуары. Ручки расположены на половине

высоты стенок с внутренней стороны резервуаров. Внутри основного резервуара установлен поддон на штативе.

Поддон выполнен из стали, равной по толщине основному (внутреннему) резервуару. Диаметр поддона 1,2 м (практически равный диаметру основного резервуара), выполнен также с внутренними ручками. Высота поддона 25 см.

Для поддона изготовлен штатив в виде треноги высотой 70 см. Штатив выполнен из стальных труб или профиля с приваренными лапками (опорами) в нижней части (для обеспечения устойчивости поддона).

Модели нефтяных резервуаров нашли широкое применение при постановке экспериментов, где они выступают в роли объекта исследования. Эксперименты, проводимые с использованием моделей резервуаров, можно выделить в отдельные и самостоятельные научно-исследовательские направления, такие как: огневые испытания, гидродинамические эксперименты, изучение концентрационных режимов паровоздушной смеси, прочностных характеристик резервуаров, организации пожаротушения в резервуаре [87].

При создании проекта экспериментальной модели для проведения огневых испытаний защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» необходимо опираться на опыт применения моделей нефтяных резервуаров и использовать критерии, на основании которых обосновывается выбор модельного резервуара (геометрическое подобие и подобие пламени). При проведении огневых испытаний главным геометрическим показателем модели резервуара, в котором он должен быть подобен натурному объекту, является его диаметр [88, 93]. Для того, чтобы соблюдать указанные требования, достаточно:

– иметь диаметр модели резервуара d_m равным или более одного метра $d_m \geq 1$ м. В этом случае пламя считается полностью турбулентным;

– при диаметре модели резервуара $d_m \geq 1$ м будет преобладать лучистая компонента в процессе нагрева;

– при диаметре модели резервуара $d_m \geq 1$ м будет соблюдаться автомодельность выгорания углеводородных жидкостей.

В связи с этим можно заключить, что необходимым и достаточным диаметром основного модельного резервуара типа «стакан в стакане» для выполнения огневых испытаний будет считаться резервуар диаметром от 1 до 1,5 м. Необходимо отметить, что указанный диапазон типоразмера модели является преобладающим в рассмотренных исследованиях. Объявленный размер будет считаться основополагающим, от которого, в соответствии с масштабом, стоит проектировать и остальные параметры: высоту основного резервуара, диаметр и высоту защитной стенки [93].

3.3 Постановка задачи экспериментальных исследований

Проведенный анализ научных источников показал отсутствие данных о специальных экспериментальных исследованиях температурного поля вертикальных резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане» в условиях воздействия тепловых потоков пожара. Определяющую роль теплового воздействия очага пожара на резервуар в общем процессе тепло- и массообмена в исследуемой системе играет разработка методики для проведения экспериментов [94].

При разработке экспериментальной методики был использован накопленный опыт проведения огневых экспериментов в Академии ГПС МЧС России [24–36].

Экспериментальное исследование ставится для:

– оценки влияния тепловых нагрузок пожара, падающих на корпус ЗС при пожаре в основном резервуаре, за счёт установления распределения на ней температурных полей, что позволит изучить нестационарный процесс нагрева защитной стенки [42, 95, 96];

– внесения при необходимости корректировок в математическую модель [70], а также для проведения процедуры её верификации на адекватность исследуемого физического процесса, что позволит говорить о возможности её применения в любом диапазоне номенклатурного ряда резервуаров с защитной стенкой;

– получения данных, позволяющих сделать теплотехнический расчёт для обоснования интенсивности или удельной интенсивности подачи воды на охлаждение горящего резервуара и соседнего с горящим резервуара [1, 2]. Нормативные документы допускают принятие количественных значений интенсивности подачи воды на охлаждение по нормам проектирования резервуарных парков. Однако проведённый ранее анализ требований, изложенных в нормативных документах по пожарной безопасности, в части касающейся интенсивности охлаждения водой защитных стенок резервуаров, выявил их отсутствие.

Необходимо отметить, решение теплотехнической задачи позволяет определить время нагрева металла от начала действия пожара до достижения в расчётном сечении критической температуры, т.е. фактический предел огнестойкости конструкции [97], в том числе защитной стенки резервуара.

3.4 Измеряемые величины и средства измерения

При проведении огневых испытаний первостепенной задачей является получение сведений по распределению температуры на защитной стенке. Для её определения и измерения необходимо выбрать соответствующий измерительный прибор.

В настоящее время существует два основных способа измерения температуры – контактный и бесконтактный. Контактный способ основан на прямом контакте измерительного прибора с исследуемым объектом, в результате чего возникает состояние теплового баланса преобразователя и исследуемого объекта. Данный способ измерения температуры возможно осуществить с использованием различных термометров, термопар [98]. Для измерения температуры с использованием термопары её необходимо подключить к измерительному прибору, например, многоканальному измерительному прибору или мультиметру.

Наравне со многими достоинствами, у контактного способа измерения температуры имеются свои недостатки:

- температурное поле исследуемого объекта изменяется при вводе в него термодатчика;
- температура преобразователя отличается от фактической температуры объекта;
- верхний предел измерения температуры ограничен свойствами материалов, из которых изготовлены температурные датчики.

Наравне с контактным способом измерения температуры всё более широкое применение находит бесконтактный способ с использованием таких приборов, как пирометры и тепловизоры.

Бесконтактный способ основывается на восприятии тепловой энергии, которая выражается через лучеиспускание и воспринимается на разных расстояниях от исследуемого объекта. Средство измерения не приводится в прямой контакт с объектом измерения.

Согласно документу [99] пирометр измеряет температуру по тепловому электромагнитному излучению объекта в круговой зоне, ограниченной полем зрения прибора, и усредняет ее. Зона видимости пирометра зависит от расстояния до объекта и от оптического разрешения пирометра.

Их классифицируют как:

- оптические – определяют температуру нагретого тела визуально, без дополнительного оборудования;
- цветные или мультиспектральные – определяют температуру методом сравнения теплового излучения тела в различных спектрах;
- радиационные (инфракрасные) – используют считанный показатель мощности теплового излучения для определения температур.

Пирометры, выполняющие измерения в пределах широкой полосы спектральных излучений, называются пирометрами полного излучения. С использованием пирометров возможно измерить температуру в диапазоне от -50 до $+3000$ °С.

По температурному диапазону пирометры подразделяются на низко- и высокотемпературные. Низкотемпературные предназначены для измерения температур тел даже в области отрицательных значений. Высокотемпературные пирометры используются для оценки температуры сильно нагретых предметов.

В настоящее время большую популярность при проведении научно-исследовательских работ завоевал такой прибор бесконтактного способа измерения, как тепловизор. Основным его назначением является измерение и фиксирование значений температур на исследуемой поверхности. При проведении измерений значение температуры отображается на дисплее как тепловая картина исследуемой области, размер которой равен или больше размера элементарной ячейки поля зрения тепловизора, где разным температурам соответствуют разные цвета. Изучение тепловых изображений называется термографией, с помощью которой и получают изображения тепловых полей рассматриваемого объекта [100, 101].

Диапазон измеряемых температур тепловизорами составляет от -50 до $+3000$ °С. Отличие между тепловизорами заключается в решении ими определенного числа измерительных и диагностических задач, температурном диапазоне и чувствительности. При измерении тепловизором температурные показатели могут отличаться от действительных значений из-за ряда факторов, влияющих на результат измерений. Например, внешние факторы: солнечное излучение, ветер, осадки, тепловая инерция; и контролируемые факторы: фокусировка, коэффициент излучения, расстояние при проведении измерений от прибора до изучаемого объекта, пространственное разрешение.

Однако бесконтактные способы измерения температуры имеют ряд преимуществ перед контактными, а именно:

- высокое быстродействие – для измерения температуры быстропротекающих процессов;
- измерение температуры объекта без остановки технологического процесса;
- измерение на расстоянии опасных объектов, например, корпуса горящего резервуара;

- обнаружение перегрева исследуемого объекта;
- измерение температуры объектов, находящихся под напряжением;
- контроль значений измеряемой температуры непосредственно с прибора;
- создание отчетов о проведенных измерениях в виде термограмм [102].

Пирометры и тепловизоры имеют некоторые недостатки – зависимость полученных данных от расстояния до измеряемого объекта, от отражательных свойств измеряемой поверхности исследуемого объекта, от излучения прямо не попадающих в поле зрения пирометра областей измеряемого объекта.

Для измерения температурных полей на корпусах модели резервуара с защитной стенкой, а также температуры пламени использован модуль аналогового ввода MB 110-224.8A «ОВЕН», представленный на рисунке 3.3 [103].



Рисунок 3.3 – Модуль аналогового ввода «ОВЕН» для измерения температуры [103]

Предел основной приведённой погрешности при измерении составляет $\pm 0,5$ % от показания. Значение измеряемых температур находится в диапазоне от 0 до 2500 °С. Указанный прибор имеет восемь аналоговых каналов измерения, что позволило присвоить порядковые номера датчикам [103]. Для обеспечения пожарной безопасности при проведении огневых испытаний возникла

необходимость увеличения длины трассы проводов термоэлектрических преобразователей (ТП). Для этого применялись компенсационные термоэлектродные провода с соблюдением режима полярности их включения. Они позволили увеличить длину проводников термопары. Принцип работы следующий: сигнал с датчика, измеряющего физическое значение температуры, поступает в прибор в результате опроса датчиков прибора. В процессе обработки сигналов осуществляется их фильтрация от помех и проводится коррекция.

Для снятия температурных показателей применялись вольфрам-рениевые термопары с диапазоном измерения от 0 до 1800 °С, погрешность при измерении составляет $\pm 0,5$ % от показания [104, 105]. Термопары закреплялись на корпусах основного резервуара и защитной стенки методом зачеканивания с шагом по высоте 0,3 м. Для повышения надежности их крепления они были стянуты металлическими ободами, также для крепления применялся термоскотч. Сами термопары были защищены кварцевой соломкой, которая позволяет выдерживать экстремальный перепад температур до 1250 °С. Для уменьшения теплопотерь при проведении огневых испытаний на места крепления термопар наносился слой эпоксидной смолы, сами термопары изолировались асбестовой ниткой.

Измерение и регистрация лучистого теплового потока проводилась с помощью прибора ПТП-2001 (рисунок 3.4), который имеет диапазон измерений от 1 до 100 кВт/м², погрешность измерений $\pm 4,8$ % [106]. Регистрация сигнала, передаваемого от приемника теплового потока, осуществлялась с помощью цифрового мультиметра UT60A с погрешностью измерений $\pm 0,8$ %. Получающий сигнал от приёмника теплового потока мультиметр был подключен к персональному компьютеру. Мониторинг и запись данных осуществлялись в программном обеспечении UT60A Interface Program [106]. Сам приёмник теплового потока устанавливался у верхнего пояса защитной стенки модели резервуара на разных расстояниях от неё. Также замеры проведены у средней части корпуса защитной стенки на высоте 60 см и нижней части корпуса защитной стенки.

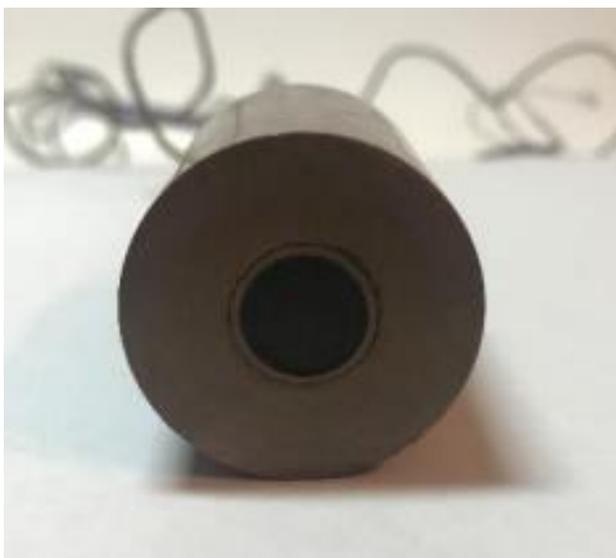


Рисунок 3.4 – Приемник теплового потока ПТП-2001

Необходимо отметить, что в целях предотвращения повреждения датчика приемника теплового потока открытым пламенем измерения проводились в условиях штиля.

Для искусственного создания воздушного потока использован осевой вентилятор с вращающимся статором YWF4E SC-630 и хонейкомбом (рисунок 3.5) в виде сотообразной решетки, предназначенной для выравнивания поля скоростей и турбулентности воздушного потока.

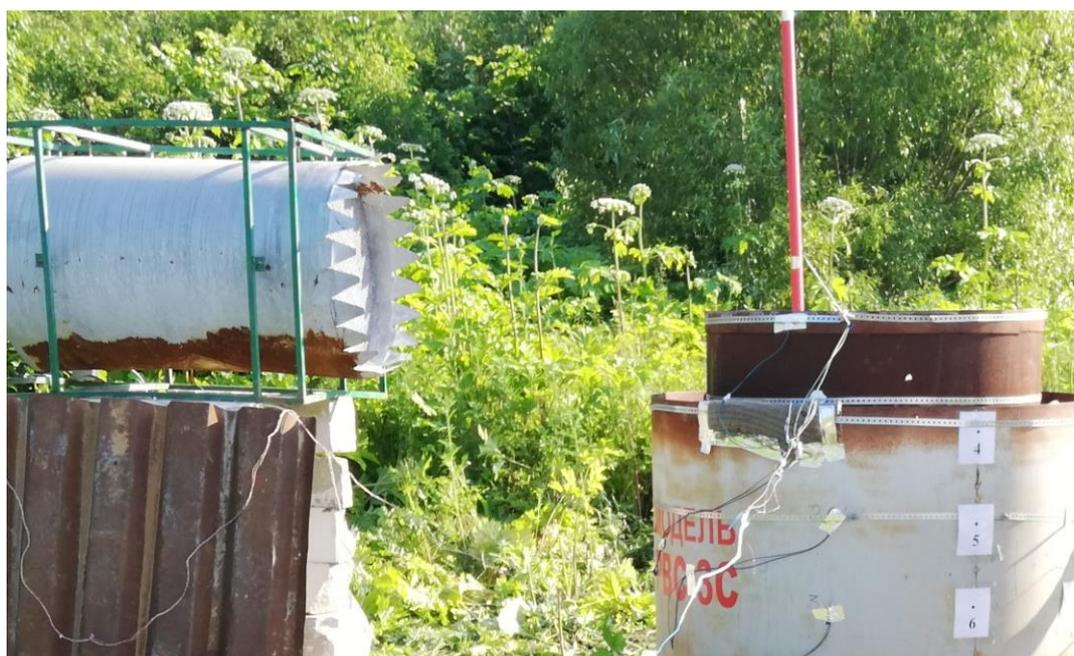


Рисунок 3.5 – Осевой вентилятор с вращающимся статором YWF4E SC-630

Измерение скорости искусственно создаваемых и естественных движений воздушных масс проводилось с помощью цифрового анемометра ТКА-ПКМ 50 (рисунок 3.6). Диапазон измерения скорости ветра составляет $0,1 \div 20$ м/с [107].



Рисунок 3.6 – Цифровой анемометр ТКА-ПКМ 50

Для измерения длины пламени применяли штатив с нанесённой измерительной шкалой. Максимальная высота штатива составляла 5 м.

При проведении огневых испытаний проводилось визуальное наблюдение и велась фото- и видеосъемка процесса. Время теплового воздействия фиксировалось секундомером и модулем аналогового ввода.

Результаты огневых испытаний фиксировались в экспериментальных протоколах, в которых также записывались начальные данные по стенду [96].

3.5 Методика проведения огневых испытаний

При разработке методики проведения огневых испытаний был использован ранее накопленный опыт в этой области исследований. Моделирование теплового воздействия очага пожара на защитную стенку модельного резервуара осуществлялось в полигонных условиях.

Методика проведения огневых испытаний включала определённый алгоритм действий, заключающихся в подготовке испытательного полигона, установке и

наладке экспериментального стенда с измерительной аппаратурой (рисунок 3.7), подготовке модельного очага пожара и его воспламенении, непосредственном измерении искомых величин, описанных выше, подготовке протоколов огневых испытаний. Испытания проводились при строгом соблюдении участниками проведения экспериментов техники безопасности [96].

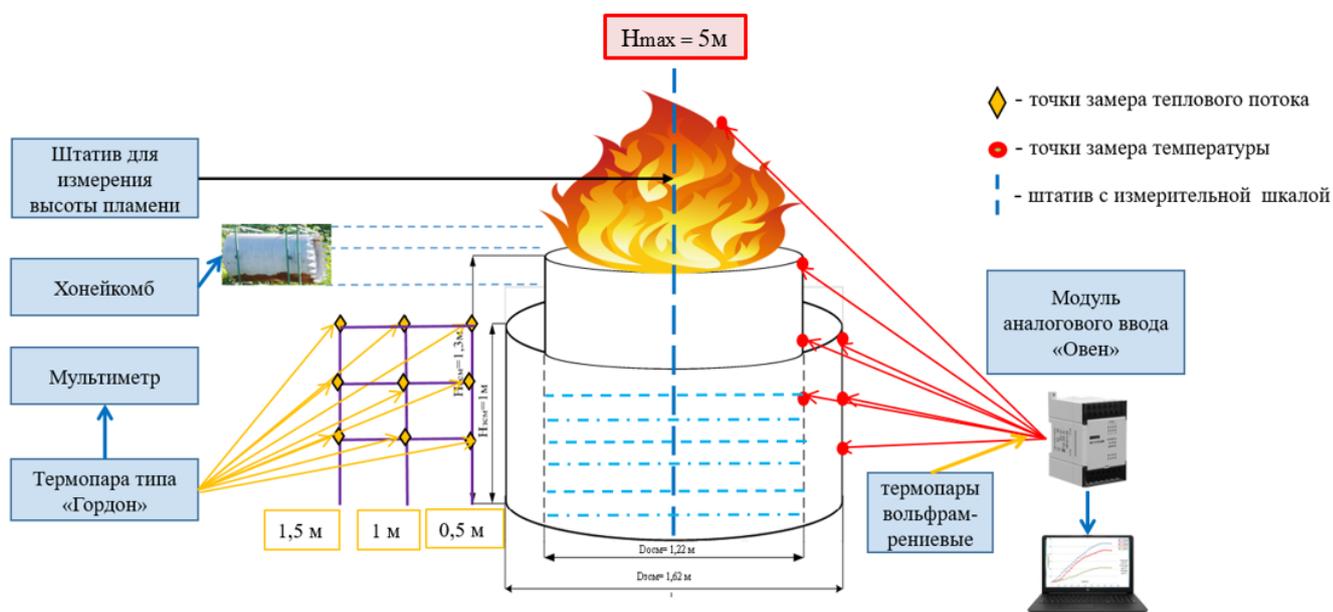


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема экспериментального стенда

Для получения турбулентного режима горения пламени нефтепродукта применялся модельный резервуар, характеристики которого подробно описаны в работе [88].

Для проведения огневых испытаний разработана частная методика исследования, согласно которой для выявления функциональной зависимости температуры нагрева защитной стенки от времени при пожаре в основном резервуаре необходимо определить общее количество опытов, которое будет считаться достаточным.

В связи с этим необходимо определиться со схемой проведения опыта, то есть учесть факторы, влияющие на нагрев защитной стенки резервуара, и получить искомую зависимость нагрева защитной стенки от этих факторов. В нашем эксперименте таких факторов со своими градациями два, это разные виды

углеводородных жидкостей (бензин АИ-92, дизельное топливо) и разные скорости ветра (0 м/с, 3 м/с, 5 м/с).

Общее число опытов в серии при их одинаковой повторяемости и учётом n градаций основных факторов определяется по формуле (3.1) [108]:

$$N_{\text{iоп}} = p_i \cdot k_i \cdot n_i \quad (3.1)$$

где $N_{\text{iоп}}$ – число серий;

p_i – повторность опытов;

k_i – число серий опытов, проводимых при изменении значений регистрируемых факторов;

n_i – число градаций.

Исследование нагрева защитной стенки пламенем пожара является однофакторным, поэтому число серий $N_i = 1$. Опыт предыдущих экспериментов, связанных с нагреванием корпусов резервуара пламенем пожара, позволяет ожидать получение линейной или логарифмической зависимости, т.е. зависимостей без явных перегибов и образования кривых линий. Для таких зависимостей достаточно проведения двух серий опытов, $k_i = 2$. Для достоверности результатов повторность каждого опыта должна составлять не менее трех раз. Таким образом, общее и достаточное количество опытов составляет $N_{\text{iоп}} = 3 \cdot 2 \cdot 2 = 12$ опытов.

При проведении огневых испытаний, интерес представлял поиск следующих величин: температуры корпуса ЗС модельного резервуара; времени теплового воздействия; скорости ветра; объема ГЖ, участвующей в эксперименте.

Данные, полученные в экспериментах, фиксировались в протоколах проведения огневых испытаний. В протоколах отражались дата и время проведения испытаний, метеорологические условия, скорость ветра (0 м/с, 3 м/с, 5 м/с), а также начальная температура ОР и ЗС; вид ГЖ (бензин АИ-92, дизельное топливо) и объём ГЖ; высота её уровня разлива; массовая скорость выгорания ГЖ; объём воды для создания водяной подушки.

Объем ГЖ определялся исходя из необходимой продолжительности горения, а водяная подушка обеспечивала постоянную скорость горения и снижала прогрев дна модельного резервуара.

Воздействию теплового излучения подвергался сам модельный резервуар и его ЗС. Время теплового воздействия в экспериментах составляло 900 с. Необходимо отметить, что в одном из экспериментов время нагрева составило 2700 с.

3.6 Обсуждение полученных результатов огневых испытаний

Проведено тринадцать испытаний, включая качественный эксперимент, служащий для отработки техники проведения эксперимента и наладки испытательной аппаратуры. На рисунках 3.8–3.10 представлены фотофрагменты проведения огневых испытаний при разных скоростях ветра.



Рисунок 3.8 – Огневые испытания при скорости ветра $u = 0$ м/с

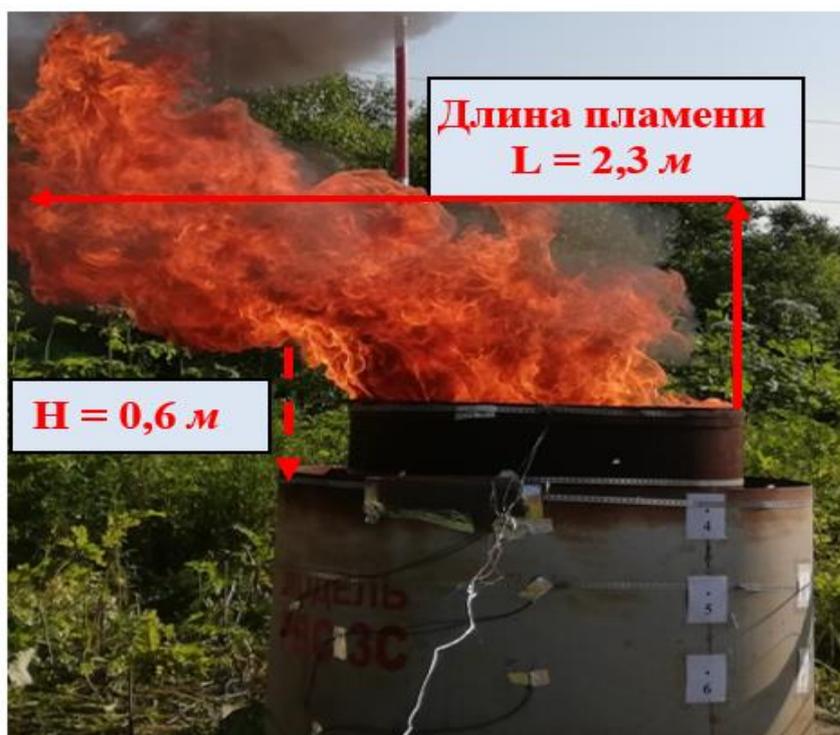


Рисунок 3.9 – Огневые испытания при скорости ветра $u = 3 \text{ м/с}$



Рисунок 3.10 – Огневые испытания при скорости ветра $u = 5 \text{ м/с}$

При проведении огневых испытаний образование сажевых частиц наблюдалось только у вершины пламени жидкости, участвующей в эксперименте,

или они вовсе не образовывались, следовательно, не могли влиять на снижение степени нагрева защитной стенки.

Для определения связи между данными, полученными в ходе проведения экспериментальных исследований, необходимо исследовать природу этой связи с целью проведения прогностических оценок. Если есть одна зависимая переменная, или отклик y , которая зависит от независимых переменных x_1, x_2, \dots, x_n , то связь между этими переменными характеризуется математической моделью, которая называется уравнением регрессии или регрессионной моделью. Эта модель должна аппроксимировать совокупность экспериментальных данных [109].

Данную процедуру выполнили с помощью статистической обработки данных, полученных при проведении экспериментальных исследований нагрева защитной стенки модельного резервуара. Сама статистическая обработка проведена наиболее распространённым видом регрессионного анализа, методом наименьших квадратов при использовании программного обеспечения Microsoft Office Excel [110].

На рисунках 3.11–3.16 представлено семейство кривых, описывающих динамику изменения теплового состояния системы «основной резервуар с нефтепродуктом – защитная стенка». В результате получены эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать количественное значение температур модели основного корпуса и защитной стенки в зависимости от времени её нагрева.

Эмпирические зависимости, представленные на графиках, имеют полиномиальный вид, что свидетельствует о неоднозначности процесса нагрева корпусов резервуаров, особенно при скоростях ветра, отличных от штиля. Измерения показали, что возможны как увеличенные темпы подъема значений температур, так и их снижение. Расхождение результатов физических экспериментов и численных расчетов находится в диапазоне от 14 до 17 % [94].

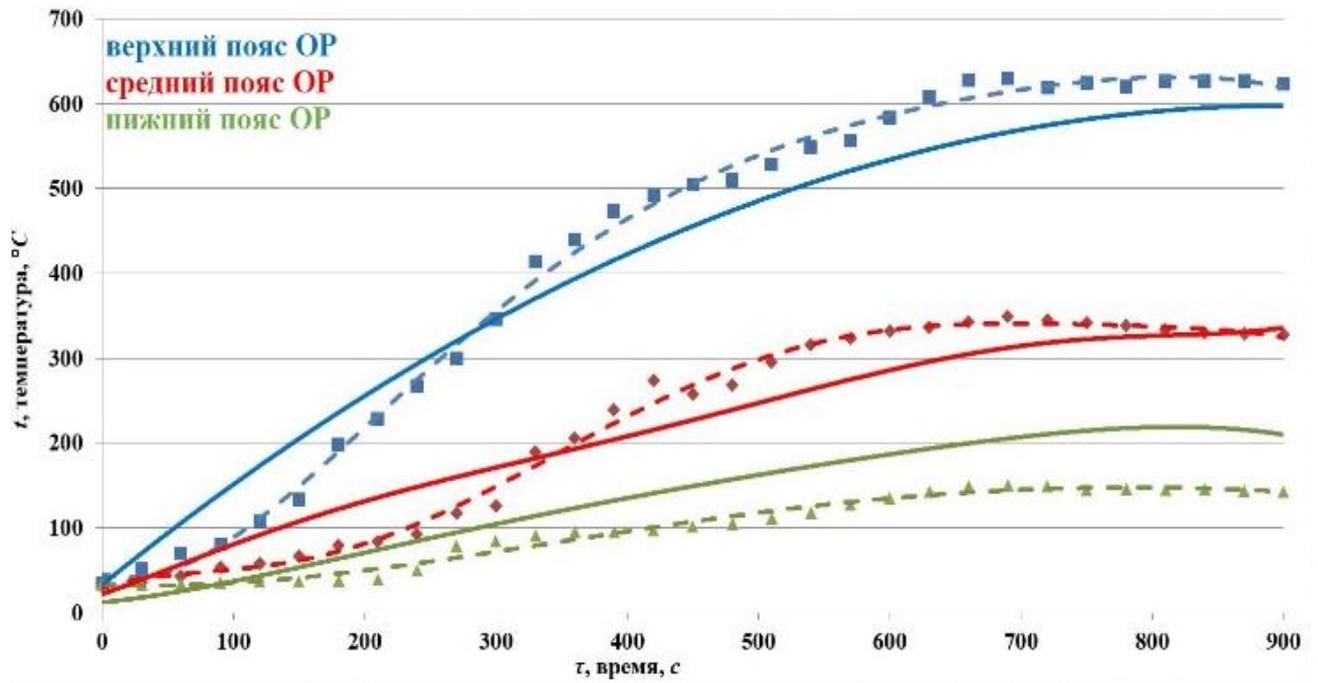


Рисунок 3.11 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры ОР на разных уровнях в зависимости от времени при $u = 0$ м/с:

— — — — — аппроксимация экспериментальных значений; ————— — расчетные значения

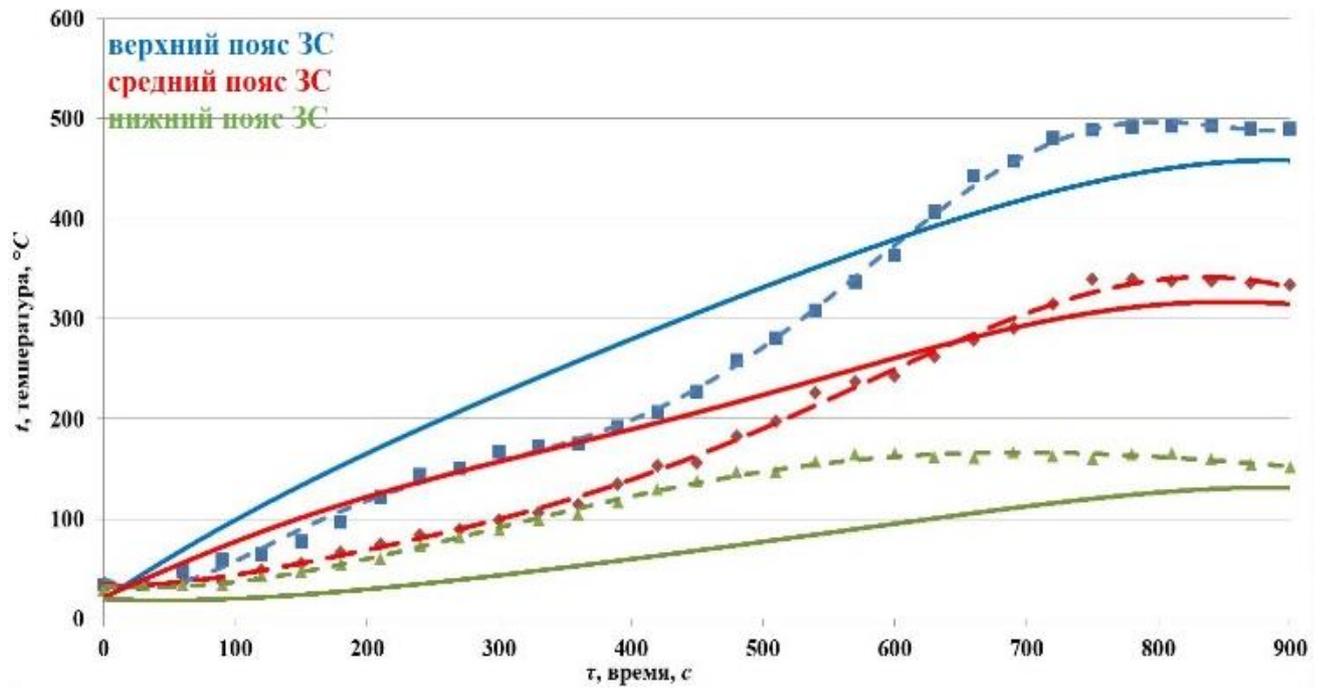


Рисунок 3.12 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры ЗС на разных уровнях в зависимости от времени при $u = 0$ м/с:

— — — — — аппроксимация экспериментальных значений; ————— — расчетные значения

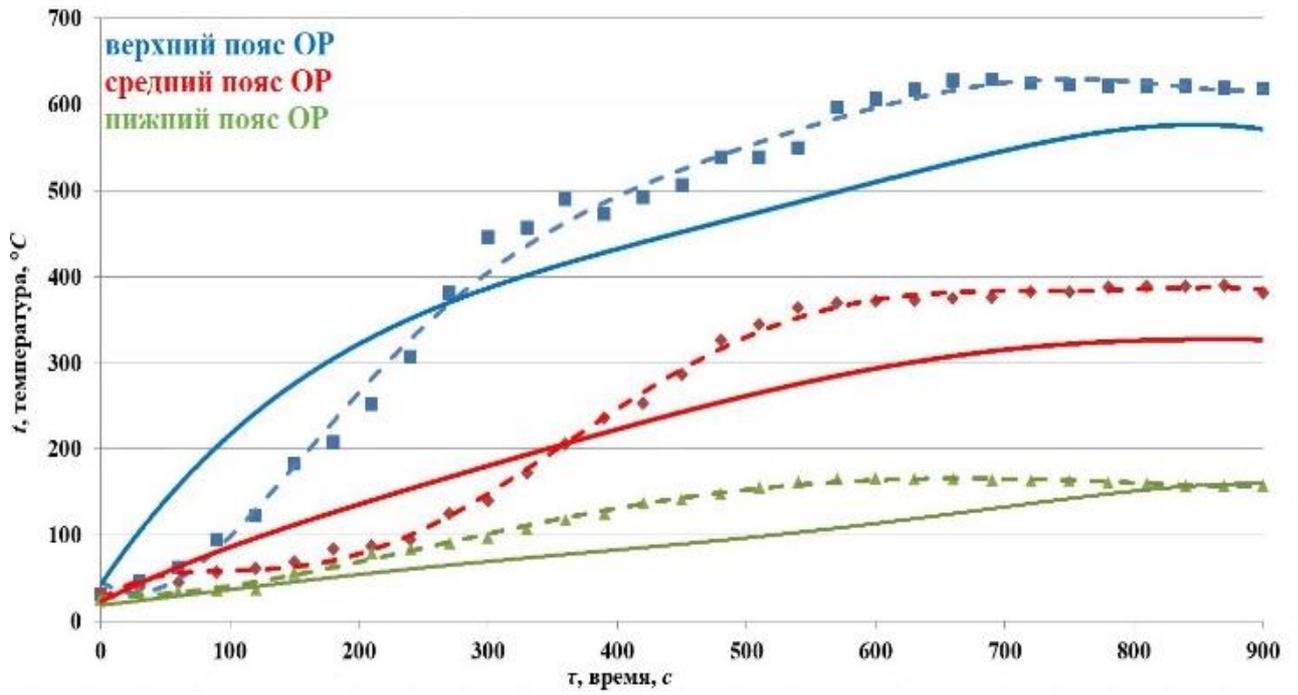


Рисунок 3.13 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры ОР на разных уровнях в зависимости от времени при $u = 3$ м/с:

— — — — — аппроксимация экспериментальных значений; ————— расчетные значения

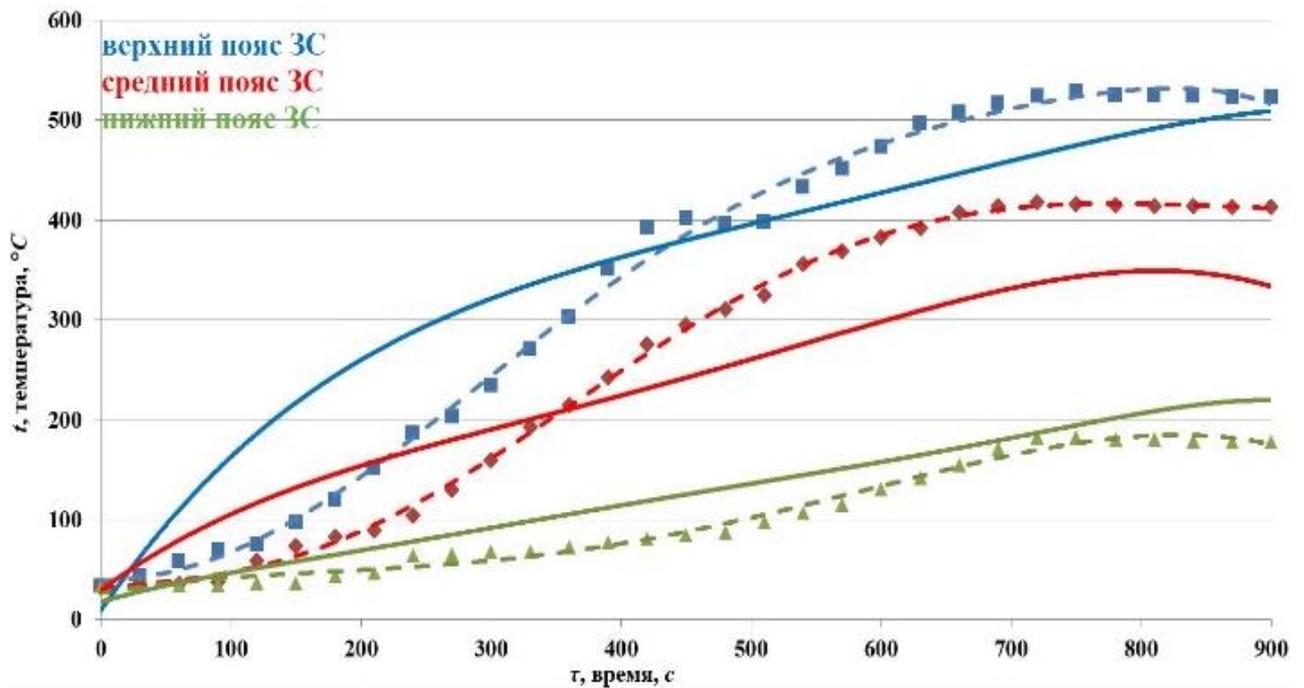


Рисунок 3.14 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры ЗС на разных уровнях в зависимости от времени при $u = 3$ м/с:

— — — — — аппроксимация экспериментальных значений; ————— расчетные значения

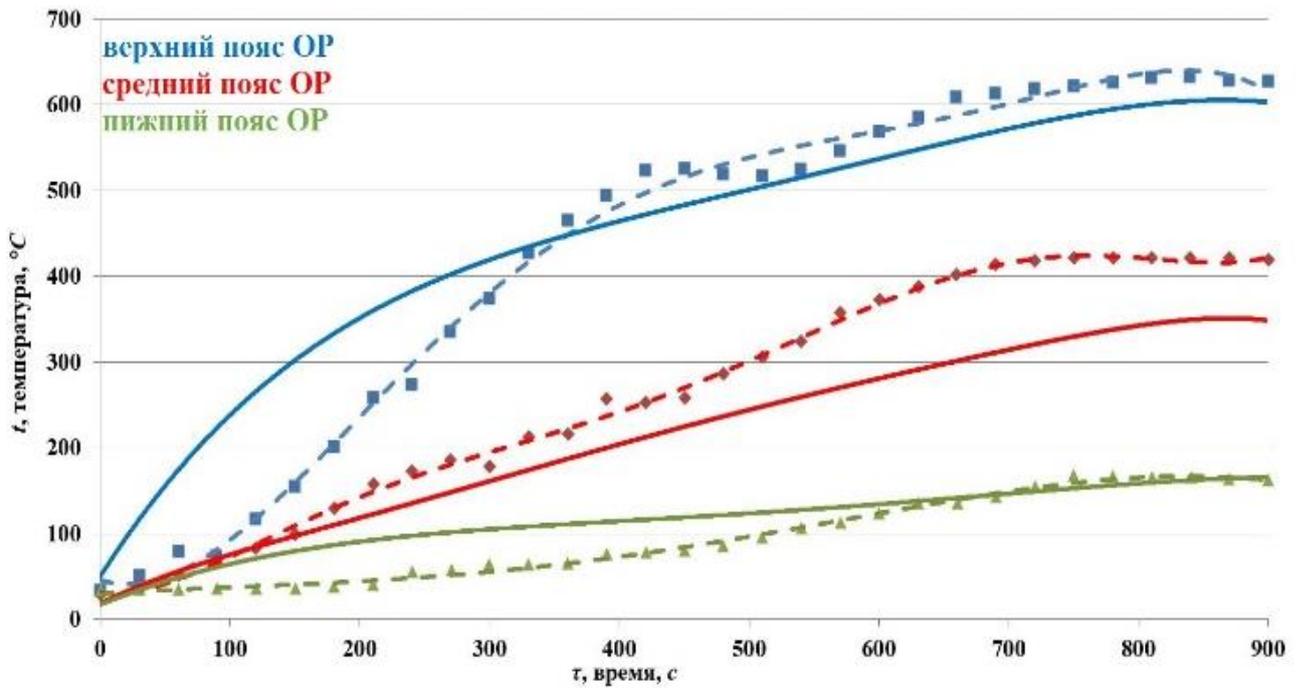


Рисунок 3.15 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры ОР на разных уровнях в зависимости от времени при $u = 5$ м/с:

— — — — — аппроксимация экспериментальных значений; ————— расчетные значения

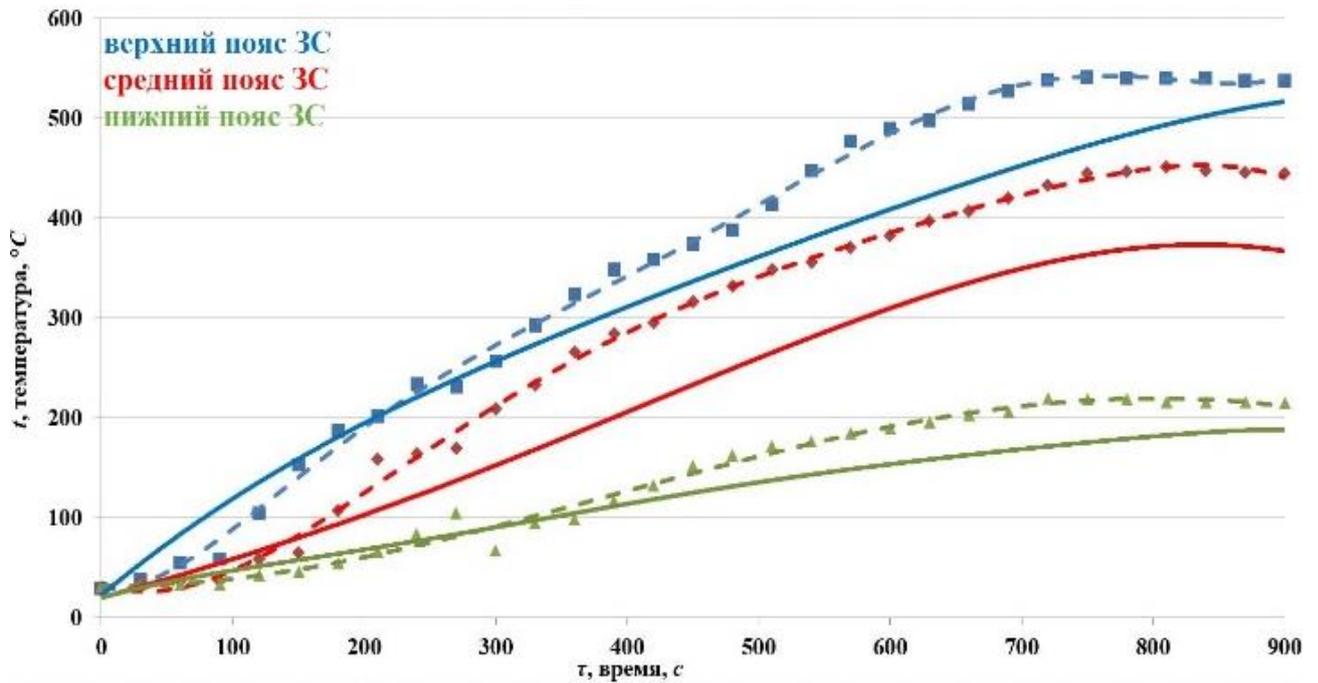


Рисунок 3.16 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры ЗС на разных уровнях в зависимости от времени при $u = 5$ м/с:

— — — — — аппроксимация экспериментальных значений; ————— расчетные значения

Среднее значение коэффициента детерминации или корреляции R^2 составляет порядка 0,98, что показывает тесную связь между полученными экспериментальными данными и обозначает, что параметры полученной модели на 98 % объясняют зависимость искомой функции – температуры нагрева защитной стенки от времени [82].

Во всех уравнениях регрессии связь между переменными высокая. С помощью полученных уравнений можно расчётным методом спрогнозировать температуру нагрева защитной стенки в зависимости от времени для рассмотренной модели резервуара.

Полученные эмпирические зависимости показывают динамику нагрева корпусов резервуара с защитной стенкой. Из них видно, что во всех трех экспериментах процесс нагрева выходит на стационарный режим на десятой минуте процесса горения. Временные значения наступления критической температуры, которую принято считать для сталей равной 500 °С, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. – Результаты оценки времени наступления критической температуры на корпусах модельного резервуара типа «стакан в стакане»

№ эксперимента	Вид топлива	Скорость ветра, м/с	Время наступления критической температуры, мин.	
			Основной резервуар	Защитная стенка
1	Бензин	0	7	11,5
2	Бензин	3	6	9,5
3	ДТ	5	5,5	5,5

Результаты измерений, представленные в таблице, свидетельствуют о том, что верхний пояс защитной стенки резервуара может испытывать критические для стали тепловые нагрузки. Однако в целом при проведении экспериментов они находились в указанной области температурных значений в отличие от верхнего пояса основного резервуара.

Установлено, что определённую роль может оказывать скорость ветра. При штиле разница временного диапазона наступления критической температуры составляет 4,5 мин, при скорости ветра 3 м/с скорость нагрева защитной стенки увеличилась и составила 3,5 мин. При проведении третьего эксперимента на этапе

преобладания максимального значения скорости ветра, равной 5 м/с, отмечено, что скорость нагрева корпуса основного резервуара и защитной стенки выравнивается и приобретает равномерный характер. Вместе с этим сам ветер при такой скорости способен отводить значительную часть тепла и снижать температуру защитной стенки при изменении вектора движения.

Также необходимо отметить, что даже в условиях максимальной экспериментальной скорости ветра, равной 5 м/с, образующиеся переливы пламени через борт основного резервуара не имели прямого контакта с верхним краем защитной стенки. То есть защитная стенка в условиях пожара основного резервуара как минимум при скорости ветра от 0–5 м/с не омывается пламенем пожара, происходящего в границах основного резервуара. Однако расстояние между открытым пламенем и защитной стенкой при скорости ветра 3 м/с составляло 60 см, а при скорости 5 м/с 30 см, что приводило к увеличению интенсивности теплового излучения за счёт снижения расстояния от пламени до облучаемого объекта [94].

Необходимо отметить, что темп нагрева защитной стенки по её высоте отличается от темпа нагрева корпуса основного резервуара. Данное обстоятельство позволили определить термопары, установленные в нижней части основного корпуса и защитной стенки. Нагрев нижней части этих конструктивных элементов идёт следующим образом: в первые минуты рост температуры нижней части корпуса основного резервуара протекает с опережением темпа нагрева этой же части защитной стенки. Далее на 10 минуте нагрева их температурные значения выравниваются. При этом значение самой температуры составляло порядка 115 °С, что также зависело от скорости ветровых потоков. Далее наблюдается противоположный эффект, скорость нагрева приобретает другой характер. Темп нагрева основного резервуара замедляется, а темп нагрева защитной стенки происходит в опережающем режиме. Температурные показатели указанного участка начинают превышать такие же показатели нижнего пояса корпуса основного резервуара. В таблице 3.3 представлены длины пламени, полученные при проведении экспериментов.

Таблица 3.3 – Длина пламени горящего нефтепродукта над модельным резервуаром

Экспериментальные показатели	Средние значения длины факела пожара, полученные при проведении огневых испытаний для разных скоростей ветра		
	0	3	5
Скорость ветра u , м/с			
Длина факела пожара L , м,	4,7	2,3	1,8

Проведенные эксперименты подтверждают мнение о том, что при возрастании скорости ветровых потоков происходит изменение угла наклона пламени и сокращается его длина. Объясняется этот процесс прибыванием с увеличенной скоростью кислорода воздуха в зону реакции горения, что приводит к интенсификации выгорания паров нефтепродукта на уменьшенном расстоянии от поверхности зеркала ГЖ.

Необходимо отметить, что тепловые нагрузки, получаемые защитной стенкой от воздействия теплового потока в условиях штиля, определённые в эксперименте, носят неравномерный, но ожидаемый характер. Степень воздействия тепловых потоков зависит от высоты защитной стенки и удалённости от объекта облучения. Результаты измерений представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Экспериментальные значения теплового потока

№ п/п	Удаленность от защитной стенки, м	Высота точки замера от уровня земли, м	Показатели теплового потока, кВт/м ²
1	0,5	1	37
2		0,7	12
3		0,4	3
4	1	1	9
5		0,7	4
6		0,4	1,8
7	1,5	1	5,7
8		0,7	1,5
9		0,4	0,9

Максимальное значение теплового излучения, равного 37 кВт/м², свидетельствует о том, что верхний борт ЗС испытывает значительные тепловые нагрузки, способные привести к её напряженно-деформированному состоянию.

В результате проведённой серии огневых экспериментов на спроектированной модели резервуара с защитной стенкой получены данные о её

тепловом состоянии при воздействии на неё экстремальных тепловых нагрузок в условиях углеводородного пожара [94].

Применённый в испытаниях контактный способ измерения температуры корпусов резервуара, который моделирует систему «основной резервуар с нефтепродуктом – защитная стенка», позволил получить эмпирические зависимости, позволяющие давать прогностическую оценку температурных показателей защитной стенки при её нагреве.

Полученный массив эмпирических данных позволяет дополнить математическую модель в целях реализации численного решения. Проведенные огневые испытания можно считать базовой основой для проведения процедуры верификации численного решения математической модели.

Полученные эмпирические данные подтверждают удовлетворительную сходимость с результатами численного моделирования, что подтверждает возможность использования численных расчётов по предлагаемой математической модели для оценки теплового состояния ЗС при пожаре в ОР для проектируемых резервуаров типа «стакан в стакане» натуральных размеров.

Проведенные испытания позволили установить, что верхний край защитной стенки испытывает тепловые нагрузки, приводящие к возникновению температурных значений, несколько превышающих величину в 500 °С, которую принято считать критической для стальных конструкций. Однако указанное значение температуры на защитной стенке возникает уже после того, как на верхнем поясе основного резервуара значение температуры стремится к стационарному режиму нагрева.

Необходимо отметить, что степень нагрева среднего пояса основного и защитного резервуара находились в целом в одном температурном диапазоне, однако больший темп скорости роста температуры был зафиксирован на корпусе основного резервуара.

Характерной особенностью нагрева обладают нижний пояс основного и защитного резервуаров. Она заключается в том, что динамика роста температуры

на указанных участках в целом одинакова, однако в диапазоне 8–10 минуты происходит изменение скорости нагрева именно защитной стенки в область увеличения значений температурных показателей. Это обстоятельство отражается на графиках зависимостей и объясняется тем, что нижняя часть основного резервуара заполнена жидкостью, которая отводит тепло от стенки корпуса основного резервуара, уменьшая скорость его нагрева и выступая в определённом смысле температурным компенсатором, позволяющим снизить время наступления изменения геометрии стального корпуса основного резервуара. В отличие от основного корпуса защитная стенка является сухой, что приводит к превалирующему темпу нагрева её нижней части над той же конструктивной областью основного резервуара.

Указанный факт дает основание говорить о необходимости применения стационарной установки автоматического орошения защитной стенки при пожаре в основном резервуаре.

Однако для предотвращения угрозы повреждения установок орошения и пожаротушения, монтируемых на защитной стенке, от опасных факторов пожара и возникающего напряженно-деформированного состояния (НДС), образующегося при пожаре в основном резервуаре, целесообразно предложить ряд мероприятий. Например, располагать их не на верхней части верхнего пояса ЗС, как это делается традиционно, а на верхней части среднего пояса, с подачей струй воды в верхнюю часть корпуса ЗС. Вместе с этим, оценку эффективности предлагаемого мероприятия необходимо провести в рамках самостоятельного научного исследования.

Выводы по третьей главе

1. Проведен анализ научных исследований, включавших эксперименты в области обеспечения пожарной безопасности с применением моделей нефтяных

резервуаров. На основании чисел подобия и примеров ранее использованных моделей резервуаров выбраны оптимальные размеры для реализации физической модели резервуара.

2. Впервые спроектирована и реализована модель нефтяного резервуара типа «стакан в стакане», прототипом которой является натурный резервуар номинальной вместимостью 700 м^3 в масштабе 1:7.

3. Впервые проведена серия огневых экспериментов на спроектированной модели резервуара с защитной стенкой. В результате экспериментов получены данные по распределению температуры на защитной стенке, которые позволили получить тепловые характеристики и описать тепловое состояние системы «основной резервуар – нефтепродукт – защитная стенка».

4. Статистическая обработка опытных данных позволила получить эмпирические зависимости для прогнозирования температуры нагрева защитной стенки аналитическим расчётом.

5. Эмпирические данные, полученные в экспериментах, позволили сравнить их с результатами математического моделирования и сделать вывод об адекватности разработанной математической модели.

ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Анализ требований пожарной безопасности к защитной стенке резервуара типа «стакан в стакане»

В настоящее время основными способами обеспечения пожарной безопасности нефтяных резервуаров являются, наряду с конструктивными требованиями, например, толщина металлического корпуса или теплоизоляция резервуара, применение систем пожарной автоматики, а именно автоматические установки пожаротушения (АУПТ) и автоматические системы орошения (АСО) резервуара [1, 2, 111]. Наиболее распространёнными видами АУПТ являются пенные, водяные, газовые и комбинированные, которые по способу тушения пожара относятся к установкам поверхностного, объемного и локального тушения пожара (для резервуаров вертикальных стальных с понтоном и с плавающей крышей), а также подслоного пожаротушения.

В свою очередь, к системам орошения относятся пожарные лафетные стволы и стационарные установки водяного орошения (охлаждения). Стационарные установки водяного охлаждения резервуаров состоят из верхнего горизонтального кольца орошения (перфорированного трубопровода или трубопровода с дренчерными оросителями), стояков, нижнего кольцевого трубопровода, соединённого с противопожарным водопроводом или с устройствами для подключения пожарных машин.

Следует отметить, что при проектировании автоматических систем противопожарной защиты для классических нефтяных резервуаров применялись ранее и используются по настоящее время регламентированные требования, изложенные в [1, 2, 20–22, 46, 61, 112, 113]. Однако при проектировании указанных систем для защитной стенки проектная организация может столкнуться с рядом трудностей, связанных с отсутствием требований по размещению пожарной

автоматики на защитной стенке резервуара типа «стакан в стакане». Наличие этих трудностей позволило выявить проведенный анализ нормативных документов в области пожарной безопасности, представленный ниже.

В ст. 100 [20] указаны требования к ограничению распространения пожара на производственном объекте. Статьей предусматриваются меры по предотвращению растекания жидкости в случае аварии на резервуарах, которые находятся на более высоких отметках по отношению к соседним зданиям и сооружениям, а также в случае ограничения площади, предназначенной для их размещения. Современным и перспективным конструктивным способом предотвращения разливов является применение резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане». Однако требования к размещению систем пожарной автоматики на защитной стенке данный закон не предусматривает.

В нормативном документе [112] приведены требования к размещению систем автоматического пожаротушения внутри зданий и сооружений. Данный документ не распространяется на технологические установки, расположенные вне зданий, но вместе с этим согласно таблице А.2 резервуары вместимостью 5000 м³ и более должны быть оборудованы АУПТ.

В нормативных документах указано, что для защиты резервуаров должны использоваться стационарные автоматические или передвижные установки пожаротушения и охлаждения, которые устанавливаются в верхнем поясе стенки резервуаров со стационарной крышей или на кронштейнах выше стенки для резервуаров с плавающей крышей [22, 46]. Вместе с этим, требования к размещению систем пожарной автоматики на резервуарах с защитной стенкой не указаны в данном документе. И что характерно, указанные документы на данный момент являются не действующими.

В документе [61] приведены общие требования к предотвращению увеличения масштаба пожара в резервуарах за счёт защиты от теплового излучения установками водяного орошения. Наземные резервуары с ЛВЖ и ГЖ объемом 5000 м³ и более должны быть оборудованы стационарными установками водяного орошения с возможностью подсоединения передвижной пожарной техники.

Требованиями к размещению систем пожарной автоматики на резервуарах с защитной стенкой указанный ГОСТ не располагает.

Согласно документу [113] резервуары с ЛВЖ и ГЖ объемом 5000 м³ и более, независимо от высоты стен резервуаров, должны иметь стационарные установки орошения водой. Данные требования не распространяются на проектирование систем пожарной автоматики на резервуарах с защитной стенкой.

В нормативном документе [21] указано, что для наземных резервуаров, используемых для хранения и переработки нефти и нефтепродуктов объемом 5000 м³ и более, следует предусматривать системы автоматического пожаротушения и системы орошения. Однако требования данного документа не распространяются на склады нефти и нефтепродуктов с применением резервуаров с защитной стенкой.

В отличие от [20–22, 46, 61, 112, 113], где приводятся опосредованные требования к необходимости применения резервуаров данного типа, в ГОСТе 31385–2016 [1] и Стандарте организации СТО-СА-03-002–2009 [2] приводятся требования к размещению систем пожарной автоматики на резервуарах с защитной стенкой. Требования, приведённые в указанных документах, основываются на реализации гипотетической пожароопасной аварийной ситуации, связанной с разрушением основного резервуара, в результате которой произойдёт выход нефтепродукта в межстенное пространство. При этом должен быть выполнен детальный расчёт защитной стенки резервуара на гидродинамическое воздействие и полное удержание волны жидкости, образующейся при разрушении основного резервуара [1, 2].

В целом, требования, касающиеся размещения пожарной автоматики на защитной стенке, сводятся к установке пеногенераторов и пенокамер в её верхнем поясе или выше него [1, 2]. В свою очередь, требования к размещению оборудования стационарных установок водяного охлаждения резервуаров аналогичны соответствующим требованиям для стационарных установок пенного пожаротушения [1, 2]. То есть возникает некая вариативность, позволяющая проектной организации сделать выбор по высоте расположения указанных систем автоматического пожаротушения и охлаждения.

Данный вывод подтверждается требованиями, указанными в ст. 6.5.9.4 [4] и ст. 12.3.2 [6], о том, что устройства тушения и охлаждения резервуаров следует выполнять в соответствии с нормами проектирования резервуарных парков на складах нефти и нефтепродуктов или на основе инженерного обоснования в зависимости, в том числе, от конструктивного вида резервуара.

Необходимо отметить, что ст. 6.5.9.5 [1] и ст. 12.3.3 [2] предусматривают размещение оборудования стационарных установок пенного пожаротушения на конструкциях резервуара с учётом:

- расчетного состояния и возможных перемещений (деформаций) стенки и крыши резервуара при пожаре или взрыве;
- возможных перемещений (деформаций) частей противопожарного оборудования (насадок, распылителей, оросителей);
- требований к расстояниям между сварными швами стенки и швами крепления постоянных конструктивных элементов, присоединяемых к стенке резервуара.

В свою очередь, интенсивность подачи воды на охлаждение горящего резервуара и соседнего с горящим резервуара должна быть обоснована теплотехническим расчетом или принята по нормам проектирования резервуарных парков [1, 2].

Важно отметить, что системы противопожарной защиты для резервуаров объёмом свыше 30 тыс. м³ могут применяться после разработки специальных технических условий (СТУ), отражающих специфику их противопожарной защиты [2], а также экспериментально-теоретического обоснования расположения систем АУПТ и АСО на защитной стенке резервуара типа «стакан в стакане» [2]. СТУ также разрабатываются в соответствии с п. 6.5.9.7 [1] для резервуаров класса КС-3а и резервуаров, в которых предполагается хранение нестабильного газового конденсата.

Анализ вышеизложенных нормативно-технических источников выявил, что на сегодняшний день лишь в двух нормативных документах изложены наиболее общие требования пожарной безопасности к размещению АУПТ и АСО на

защитной стенке резервуаров типа «стакан в стакане». При этом требования, изложенные в них, в целом дублируют друг друга [111].

В связи с этим проектированию АУПТ и АСО для резервуаров с защитной стенкой должна предшествовать разработка СТУ на проектирование указанных выше систем. Предлагаемые в СТУ мероприятия должны иметь научно-техническое обоснование, основанное на решении комплекса исследовательских задач, связанных с проведением экспериментально-теоретических исследований по определению теплового состояния корпуса защитной стенки резервуара, возникающего при таких тепловых значениях напряжённо-деформированного состояния корпуса резервуара, которые совместно будут влиять на расположение систем пожарной автоматики на защитной стенке резервуара.

4.2 Практическое применение численного метода расчёта для определения устойчивости защитной стенки при пожаре

Для прогнозирования устойчивого состояния ЗС при пожаре необходимо определить возникающие в ней температурные поля с соответствующим им напряжённо-деформированным состоянием, для чего в разработанной математической модели используем дополнительный модуль «Solid Mechanics», определяющий НДС корпусов резервуара при определённых температурных полях, и физический модуль «Thermal Expansion», учитывающий тепловое расширение материала корпусов. Для этого граничные условия в математической модели задаются как фиксированный у фундамента участок конструкции резервуара с защитной стенкой и остальной свободной от жесткого крепления части его корпусов [114].

В связи с этим в уравнение теплового баланса добавляется учёт количества теплоты от теплового расширения материала стенок при нагреве, Q_{ted} , Вт·м⁻³:

$$\rho c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = Q + Q_{ted}, \quad (4.1)$$

где ρ – плотность стали $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

c_p – удельная теплоемкость стали при постоянном давлении, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$;

T – температура, К;

t – время, с;

q – количество теплоты с поверхности, описываемое законом теплопроводности Фурье.

Уравнение, определяющее НДС на резервуар с защитной стенкой, представлено в следующем виде с учётом тензора напряжений Пиолы – Кирхгофа S , Па:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla S + F_v, \quad (4.2)$$

где u – вектор смещений, м;

F_v – объёмные силы, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-3}$;

S – тензор напряжений Пиолы – Кирхгофа, Па.

Результаты численного расчёта температурных полей и возникающего НДС в корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м^3 при пожаре в основном резервуаре, представлены на рисунках 4.1–4.6.

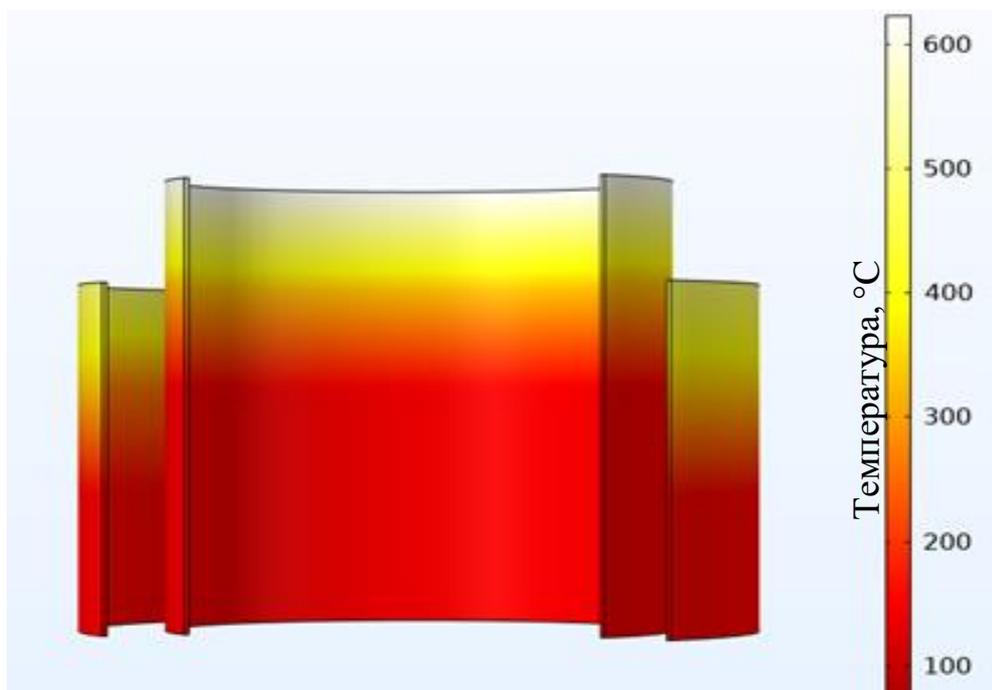


Рисунок 4.1 – Распределение температурных полей на корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м^3 при скорости ветра 0 м/с

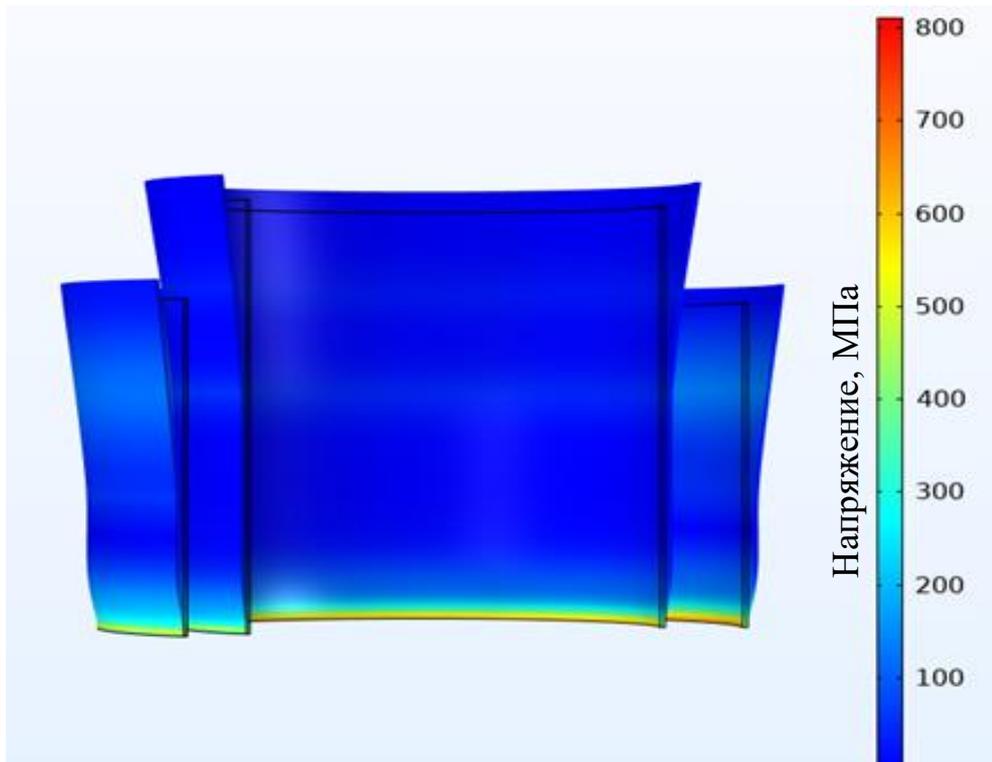


Рисунок 4.2 – Распределение НДС на корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м³ при скорости ветра 0 м/с

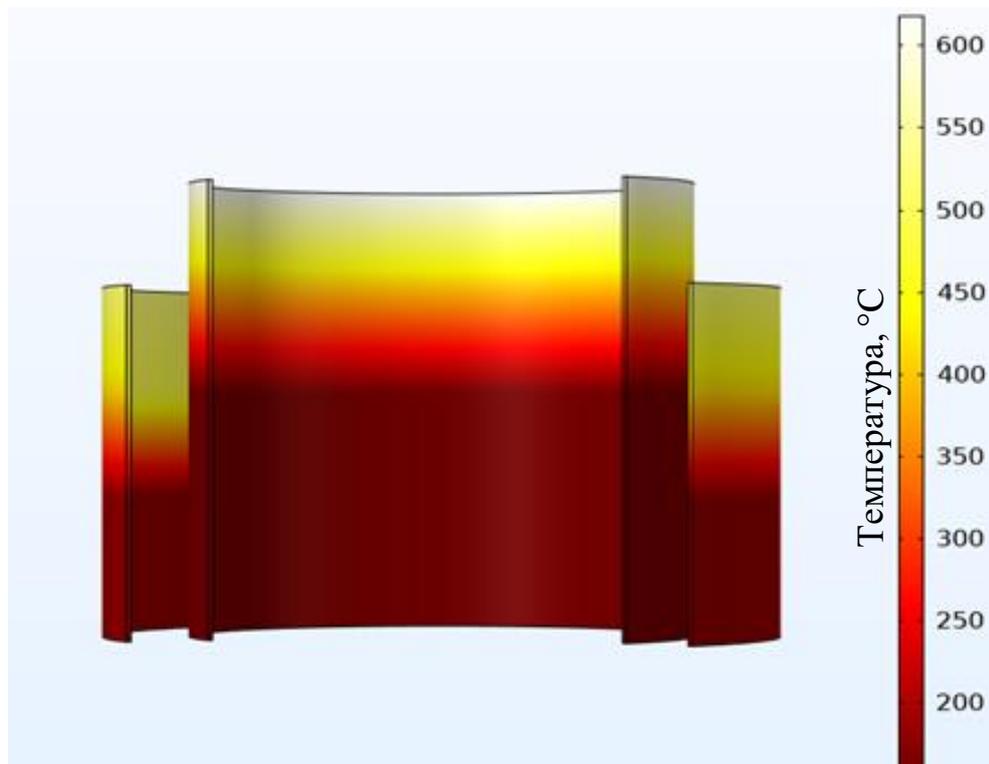


Рисунок 4.3 – Распределение температурных полей на корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м³ при скорости ветра 3 м/с

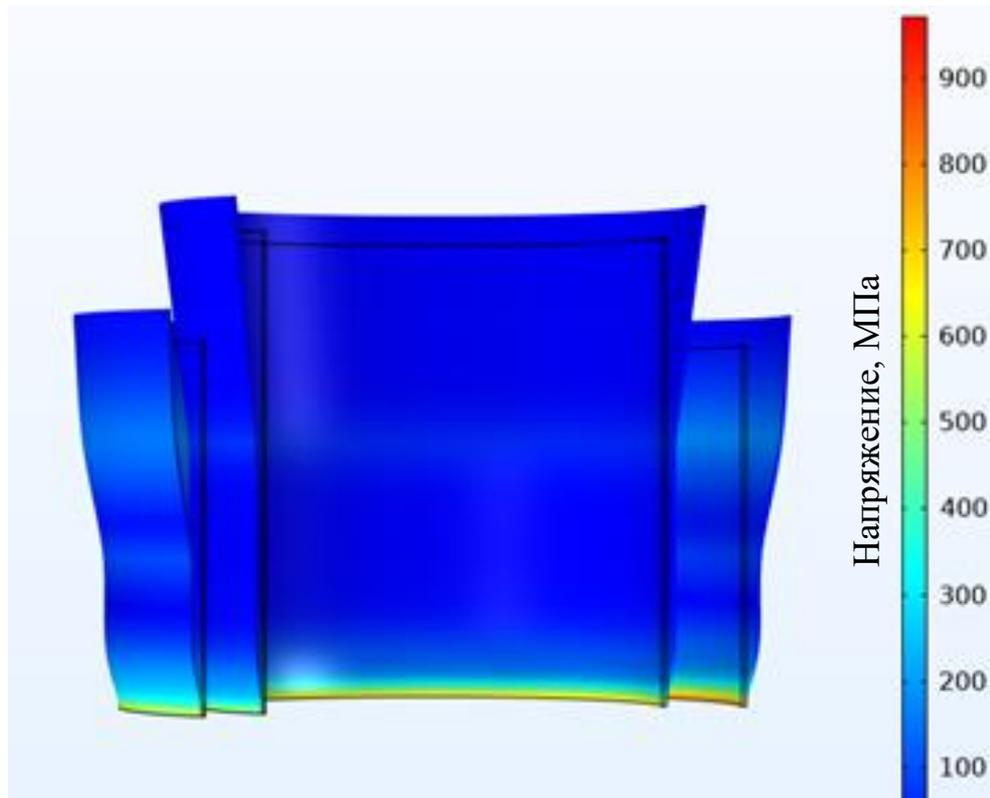


Рисунок 4.4 – Распределение НДС на корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м³ при скорости ветра 3 м/с

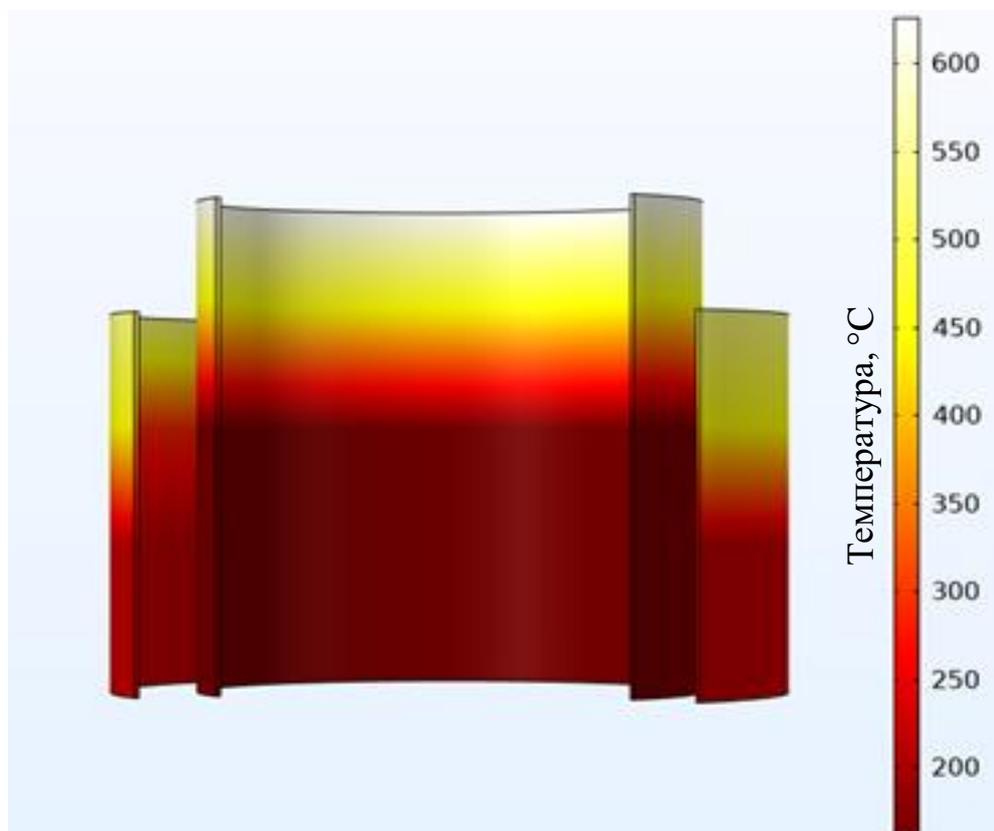


Рисунок 4.5 – Распределение температурных полей на корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м³ при скорости ветра 5 м/с

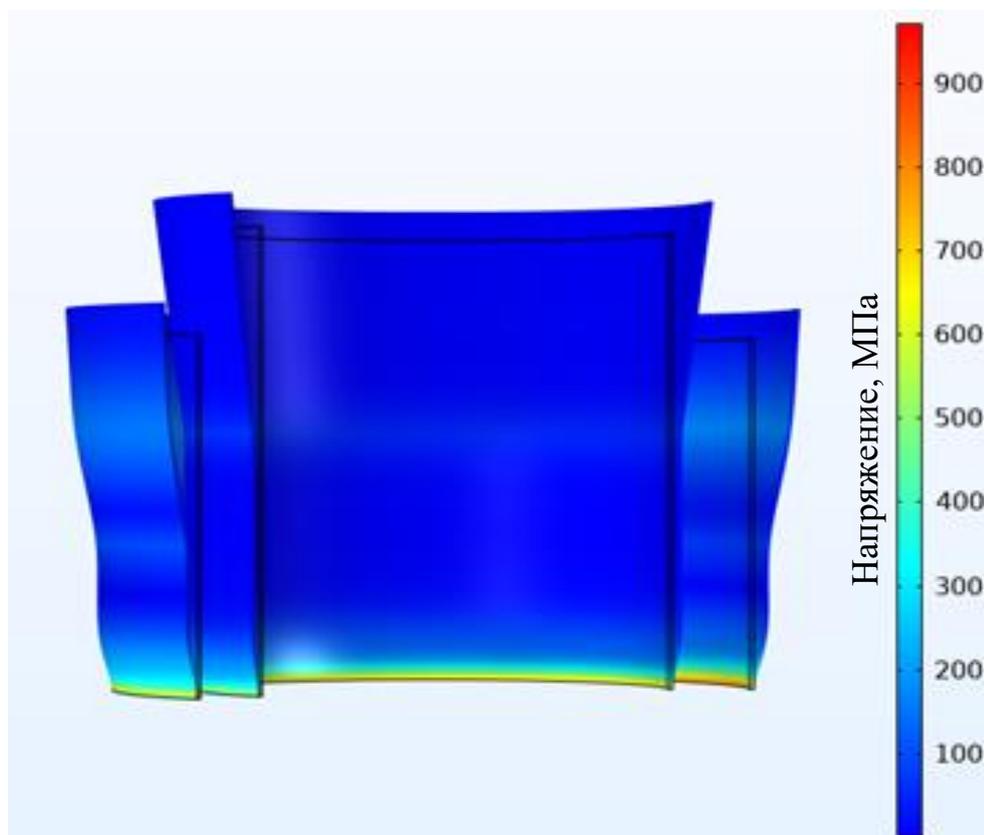


Рисунок 4.6 – Распределение НДС на корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м³ при скорости ветра 5 м/с

Результаты численного расчёта температурных полей и возникающего НДС в корпусах натурального резервуара с защитной стенкой при пожаре в основном резервуаре позволяют нам определить изменение НДС для различного номенклатурного ряда резервуаров типа «стакан в стакане» [114].

Объектом апробации является резервуар с наиболее распространённой в практике эксплуатации номинальной вместимостью 5000 м³ с соответствующими геометрическими параметрами: высота ОР – 12 м и ЗС – 9,6 м; диаметр ОР – 22,8 м и ЗС – 24,6 м; расстояние между корпусами – 1,8 м.

Материал корпусов основного резервуара и защитной стенки – сталь марки 09Г2С. Теплофизические характеристики стали: плотность $\rho = 7594$ кг/м³; удельная теплоемкость $c = 732$ Дж/кг·с; теплопроводность $\lambda = 27$ Вт/м·с; температуропроводность $a = 0,486 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Массовая скорость выгорания бензина представлена в таблице 4.1. Характеристики пламени: плотность теплового излучения бензина $q_{\text{ф}}$ составляет 70–80 кВт/м² [24, 40].

Таблица 4.1 – Массовая скорость выгорания веществ [61]

Топливо	Удельная массовая скорость выгорания, m , кг/(м ² ·с)
Бензин	0,06
Дизельное топливо	0,04

Необходимо отметить, что тепловой режим пожара определяется количеством тепловыделения, от которого зависит мощность излучения пламени, влияющая на устойчивость корпусов резервуара. При анализе работ, выполненных ранее другими исследователями, установлено, что горение в модельных резервуарах малых диаметров не может моделировать тепловой режим пожара, реализующийся на резервуарах натурального размера. В связи с этим в численном расчёте для указанного натурального резервуара использовано максимальное значение теплового потока, равное 80 кВт/м² [40], приведенное в экспериментальных работах других исследователей.

Время нагрева в численном эксперименте составляет 30 минут с учетом воздействия максимальной скорости ветра 5 м/с, использованной при проведении физического эксперимента. Расчётные показатели температур и напряжений оценивались для трех поясов моделируемого резервуара. Каждый пояс имеет следующий линейный размер с началом отсчёта от уровня основания резервуара с защитной стенкой: нижний пояс ОР (ОРНП) 0–4 м; средний пояс ОР (ОРСП) 4–8 м; верхний пояс ОР (ОРВП) 8–12 м; нижний пояс ЗС (ЗСНП) 0–3,2 м; средний пояс ЗС (ЗССП) 3,2–6,4; верхний пояс ЗС (ЗСВП) 6,4–9,6 м. Результаты численного расчёта температурных полей и НДС представлены на рисунках 4.7–4.8.

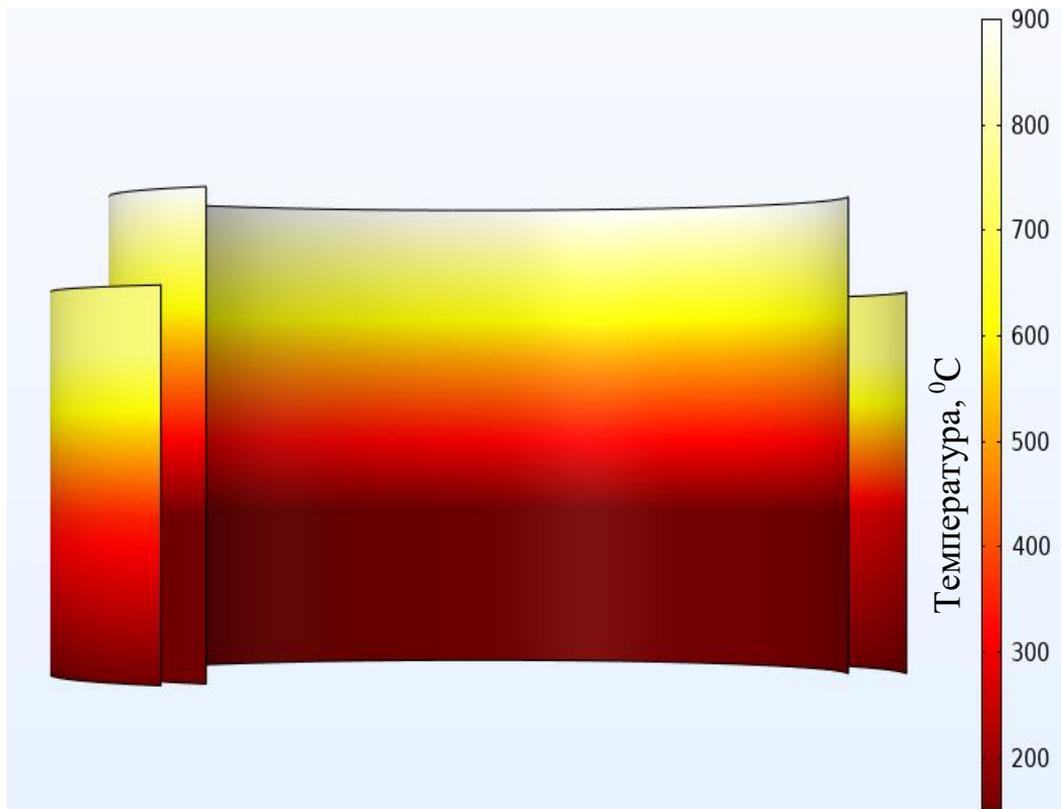


Рисунок 4.7 – Результаты визуализации температурных корпусов натурального резервуара с защитной стенкой при пожаре в основном резервуаре вместимостью 5000 м³

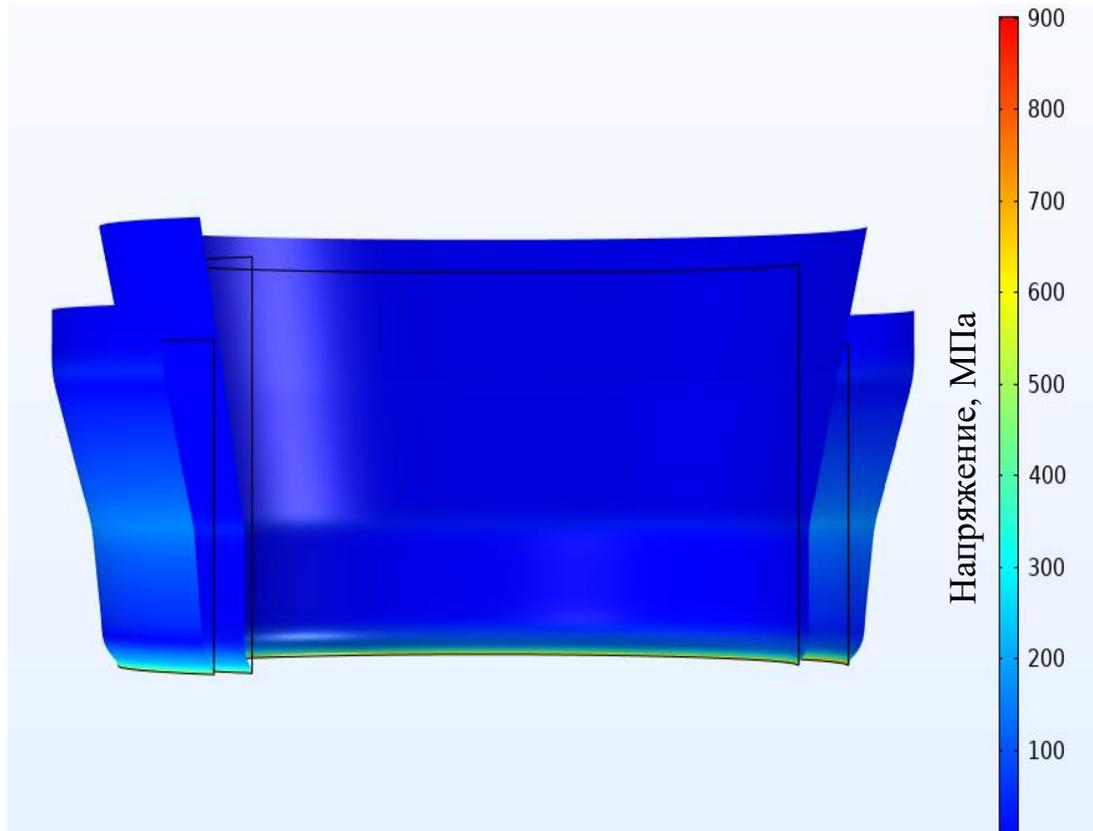


Рисунок 4.8 – Результаты визуализации деформации корпусов натурального резервуара с защитной стенкой при пожаре в основном резервуаре вместимостью 5000 м³

Из рисунка 4.7 видно, что средний и верхний пояса корпусов резервуара подвержены нагреву, превышающему критическое значение для стали. Рабочее напряжение в корпусах резервуара σ_p находится в диапазоне 50–150 МПа, что значительно превышает нормативное напряжение $\sigma_n = 53$ МПа (рисунок 4.8). Деформация и распределение напряжений корпусов резервуара от действия пожара показаны на рисунке 4.2 с увеличением в 20 раз. Показатели деформации при возникающем напряжении в верхних точках ОР и ЗС показали их возможное смещение в радиальном направлении для основного резервуара на 0,14 м и защитной стенки на 0,12 м, а также в вертикальном направлении для основного резервуара 0,06 м и защитной стенки 0,05 м при указанном напряжении.

Результаты численного расчёта для оценки прогноза устойчивости резервуара с защитной стенкой представлены на рисунках 4.9–4.10 в виде графиков зависимости температуры от времени с прогнозом наступления в корпусах резервуара критической температуры, характерной для стали и влияющей на возникновение НДС при пожаре [114].

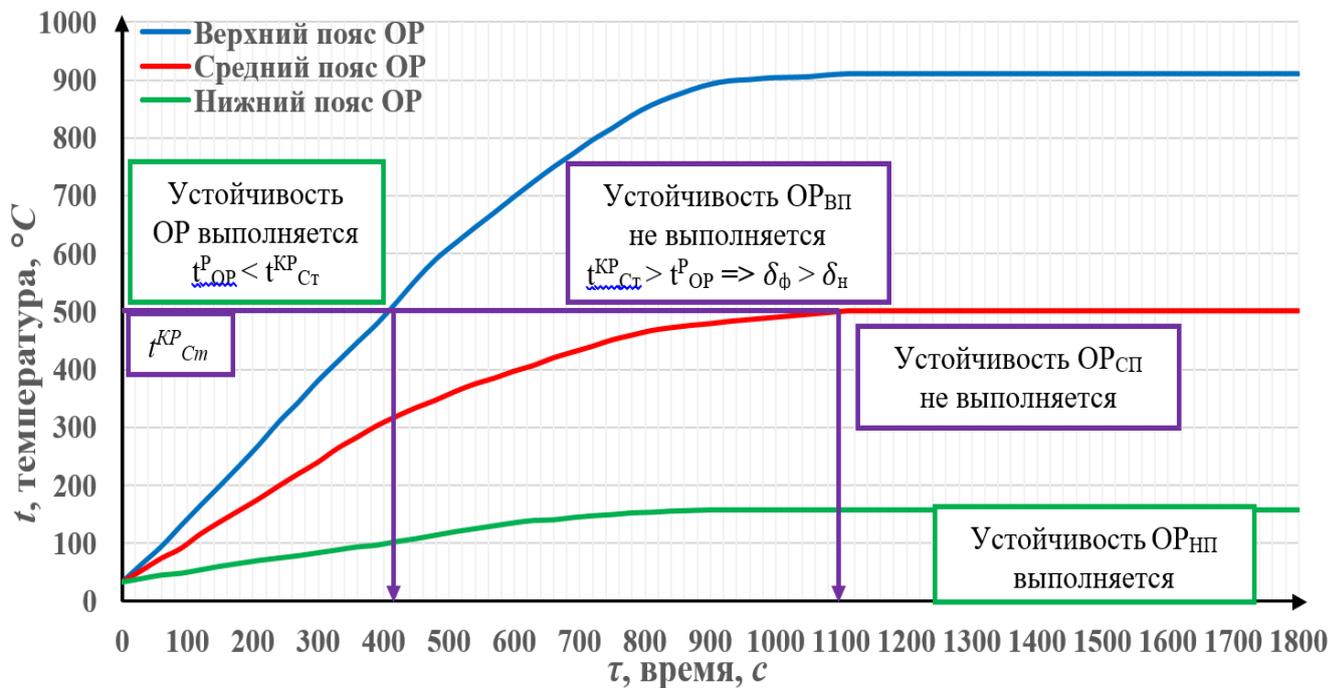


Рисунок 4.9 – График зависимости температуры от времени для основного корпуса резервуара, показывающий возможность наступления его устойчивости при пожаре

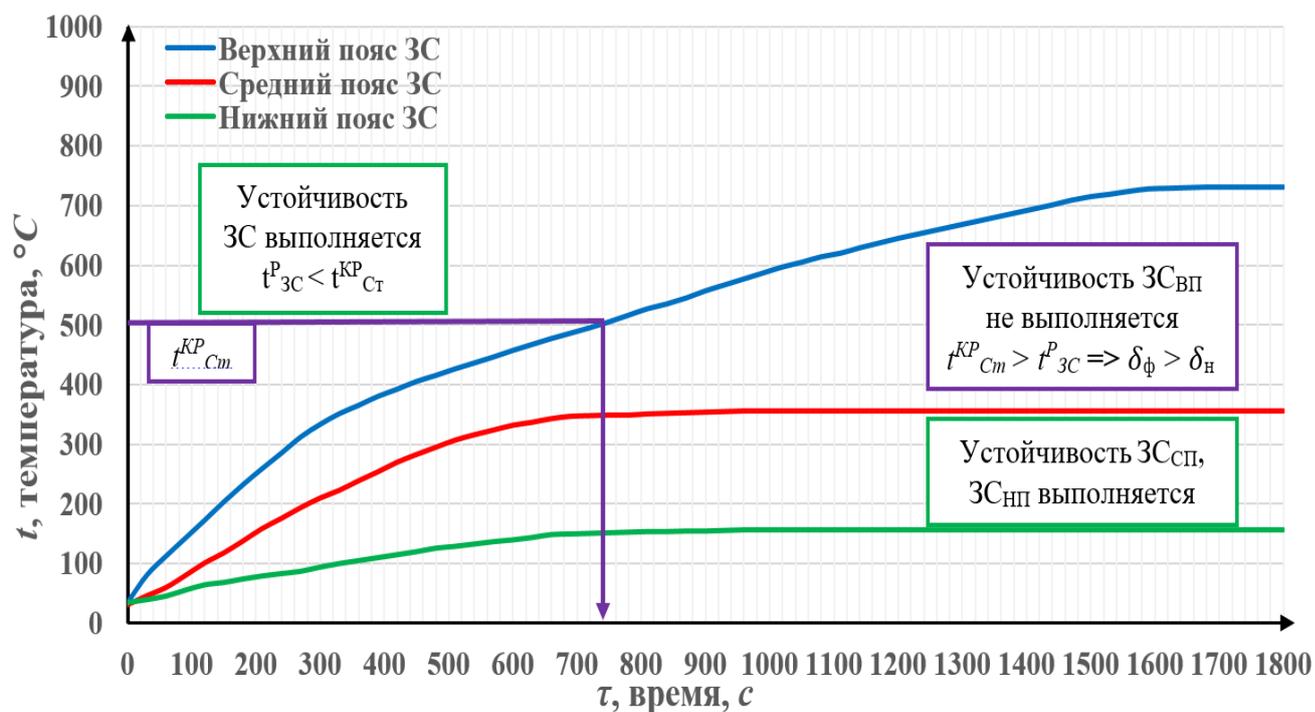


Рисунок 4.10 – График зависимости температуры от времени для защитной стенки резервуара, показывающий возможность наступления его устойчивости при пожаре

Результаты численных расчётов позволяют прогнозировать время достижения критической температуры, возникающей на корпусах резервуара, при которой возможно наступление НДС [приложение А]. Вместе с этим расчёт показывает, что значение температурных полей может значительно превышать критическую температуру нагрева корпуса стенки резервуара, что свидетельствует о необходимости использования стационарной установки водяного орошения, которая позволит сохранить устойчивость защитной стенки, в том числе, и до момента подачи воды на орошение защитной стенки резервуара от прибывших мобильных средств пожаротушения.

Выводы по четвертой главе

1. Проведённый анализ нормативно-технической литературы показал ограниченность документов, в которых указаны требования пожарной безопасности к размещению систем противопожарной защиты на защитной стенке

резервуаров типа «стакан в стакане». Определено, что мероприятия, указанные в документах, должны иметь научно-техническое обоснование, позволяющее решить теплотехническую задачу по определению оптимального расположения систем противопожарной защиты на защитной стенке резервуара.

2. Для прогнозирования устойчивого состояния защитной стенки при пожаре дополнительно к ранее составленной математической модели, представленной во второй главе, и позволяющей определять температурные поля, подобран и добавлен расчётный модуль для определения напряжённо-деформированного состояния защитной стенки, возникающего в ее корпусе в условиях углеводородного пожара.

3. Проведено комплексное численное решение на основе разработанной математической модели для резервуаров, имеющих натуральные размеры. Результаты расчёта визуализированы в виде изополей, позволяющих понять распределение температурных полей и полей возникающих напряжений, что позволяет моделировать устойчивость защитной стенки.

4. На основании полученных данных появилась возможность определять время достижения критической температуры, возникающей на корпусе защитной стенки резервуара, при которой происходит наступление предела текучести марки стали, из которой он изготовлен, что свидетельствует о потере устойчивости защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментально-теоретических исследований были получены следующие результаты и основные выводы:

1. Предложен термин устойчивости защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» и сформулировано его содержание. Рекомендовано добавить к существующим нормируемым факторам, влияющим на устойчивость защитной стенки резервуара, дополнительный фактор, относящийся к особым видам нагрузок – температурные воздействия, возникающие при пожаре, что позволит на стадии проектирования проводить оценку устойчивости защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре.

2. Разработана математическая модель взаимодействия пламени пожара с системой «основной резервуар – нефтепродукт – защитная стенка» в программном комплексе COMSOL Multiphysics, с геометрическими и теплофизическими параметрами, подобными натурному резервуару номинальным объемом 700 м³ в масштабе 1:7.

В результате математического моделирования получена возможность визуализаций получаемых изоповерхностей, показывающих распределение нестационарных температурных полей на защитной стенке и основном корпусе резервуара, в том числе с учётом влияния ветровых потоков. Расчётом установлена возможность превышения критической температуры нагрева защитной стенки, равной 500 °С, при пожаре в резервуаре.

3. Впервые разработан экспериментальный стенд модели резервуара типа «стакан в стакане» для проведения огневых испытаний. Разработана методика, на основании которой проведена серия натуральных огневых испытаний и получены новые эмпирические зависимости по распределению температуры по высоте защитной стенки и основного резервуара, позволяющие описать тепловое состояние системы «основной резервуар – нефтепродукт – защитная стенка».

4. Установлена зависимость влияния ветровых потоков на динамику нагрева защитной стенки резервуара. Время приобретения верхним поясом защитной

стенки критической температуры находится в диапазоне от 5,5 до 11,5 минут при скоростях ветра от 5 до 0 м/с соответственно.

5. Экспериментально определено максимальное значение теплового потока для использованной в огневых испытаниях физической модели резервуара с защитной стенкой, которое составило 37 кВт/м², что удовлетворительно согласуется с результатами измерений тепловых потоков при пожарах углеводородов, приведённых в исследованиях, выполненных другими авторами в указанной области. Это свидетельствует о том, что верхний пояс защитной стенки испытывает значительные тепловые нагрузки, способные привести к возникновению её напряженно-деформированного состояния, и доказывает необходимость её орошения при пожаре в резервуаре.

6. Проведена процедура верификации математической модели на адекватность исследуемого физического процесса. Подтверждена удовлетворительная сходимость результатов математического моделирования и физического эксперимента, среднее расхождение между ними составляет 17 %, что доказывает возможность использования численного расчёта по предлагаемой математической модели для оценки теплового состояния защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» натуральных размеров при пожаре.

7. Проведена апробация применения использованной математической модели, решение которой численным методом расчёта позволяет проводить прогностические оценки её устойчивости при пожаре и определять нестационарное температурное поле защитной стенки резервуара и возникающее в ней напряжённо-деформированное состояние для резервуара типа «стакан в стакане». В качестве тестируемого использован резервуар типа «стакан в стакане» номинальной вместимостью 5000 м³.

8. Результаты комплексного численного расчёта показали, что значение температуры корпуса стальной защитной стенки в её верхнем поясе может значительно превышать её критическую температуру нагрева и составлять порядка 720 °С, при которой возникает напряженно-деформированное состояние.

9. На основании результатов диссертационного исследования появилась возможность прогнозировать время наступления устойчивости защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» с учётом достижения ею критической температуры и доказана необходимость использования стационарной установки водяного орошения на корпусе защитной стенки, которая позволит повысить её устойчивость при пожаре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт (введ. в действ. Приказом Росстандарта от 31.08.2016 г. № 982-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 17.03.2021).
2. СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: стандарт организации Ассоциация «Ростехэкспертиза» (введен в действие решением НТС НО Ассоциация «Ростехэкспертиза» от 19.05.2009 г. протокол № 2) // Режим доступа: <http://rustank.ru/standard/> (дата обращения: 17.03.2021).
3. 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.
4. Иванцова, С.Г. Концепция анализа риска резервуарных конструкций [Текст] / С.Г. Иванцова, А.И. Рахманин, М.А. Тарасенко, П.Ф. Сильницкий // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2011. – № 3. – С. 31–35.
5. Ильин, Е.Г. Нагрузки и методы расчета стационарных крыш вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] / Е.Г. Ильин, С.Г. Иванцова, А.А. Катанов, А.Н. Задумин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 1 (17). – С. 36–42.
6. Ильин, Е.Г. Конструкции стационарных крыш вертикальных цилиндрических резервуаров, применяемые в России и за рубежом [Текст] / Е.Г. Ильин, А.А. Катанов, А.Н. Задумин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 3 (15). – С. 39–45.

7. Прохоров, А.Д. Повышение эффективности эксплуатации резервуаров для хранения бензинов [Текст] / А.Д. Прохоров, Б.Ф. Беляев, Л.В. Шофлер // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2006. – № 5. – С. 18–20.
8. Ханухов, Х.М. Промышленная безопасность крупнотоннажных резервуаров для хранения нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов [Текст] / Х.М. Ханухов // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2005. – № 3. – С. 23–25.
9. Белоев, М.Г. Международная конференция по резервуаростроению [Текст] / М.Г. Белоев, О.В. Дидковский, Э.Я. Еленицкий, И.С. Старчевой, Б.В. Поповский, Х.М. Ханухов, С.Г. Иванцова, А.А. Тарасенко // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 9. – С. 88–91.
10. Ханухов, Х.М. Техническое диагностирование и анализ безопасности эксплуатации резервуаров вертикальных стальных для нефти и нефтепродуктов [Текст] / Х.М. Ханухов, Р.А. Шайбаков, Н.Х. Абдрахманов, А.Г. Марков // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2013. – № 4. – С. 243–257.
11. Демехин, Ф.В. О проблеме тушения пожаров в резервуарах с кольцевой защитной стенкой [Текст] / Ф.В. Демехин, А.А. Таранцев, Д.И. Белов // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». – 2013. – № 2. – С. 68–75.
12. Демехин, Ф.В. Проблемы обеспечения пожарной безопасности резервуаров с защитной стенкой [Текст] / Ф.В. Демехин, А.А. Цой // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». – 2015. – № 1. – С. 34–40.
13. Швырков, А.С. Актуальные вопросы нормирования требований пожарной безопасности к защитной стенке нефтяных резервуаров типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / А.С. Швырков, С.А. Горячев, С.А. Швырков // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 3 (67). – С. 56–63. – Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29009814> (дата обращения: 05.05.2022).
14. Станкевич, Т.С. Оперативное прогнозирование теплового потока при пожаре в вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой с использованием

ANFIS [Текст] / Т.С. Станкевич, Д. Далнер, М. Трчка, А. Томитчек // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29. – № 5. – С. 13–39. – DOI:10.22227/PVB.2020.29.05.13-39.

15. 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). – С. 74–81. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29009817> (дата обращения: 05.05.2021).

16. Швырков, С.А. Лабораторное моделирование волны прорыва при разрушении резервуара типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / С.А. Швырков, С.А. Горячев, В.В. Воробьёв, А.С. Швырков // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 2(72). – С. 75–82. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29871124> (дата обращения: 05.05.2021).

17. 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.

18. Рубцов, Д.Н. Проблема огнестойкости защитной стенки резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / Д.Н. Рубцов, М.С. Шалымов // Системы безопасности – 2013: Материалы 22-й международной научно-технической конференции. М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. С. 157–158.

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

20. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ: (в ред. от 29 июля 2017 г.) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 05.05.2021).

21. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 26.12.2013 г. № 837) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М.,

2021. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 25.04.2021).

22. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: руководство (введ. в действ. Приказом Ростехнадзора от 26.12.2012 г. № 780) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 05.05.2022).

23. Блинов, В.И. Диффузионное горение жидкостей [Текст] / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков. – АН СССР, 1961. – 208 с.

24. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 398 с. + вкл.

25. Сучков, В.П. Научные стандартизации в области обеспечения пожарной безопасности технологий хранения нефтепродуктов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Сучков Виктор Петрович. – М.: МИПБ МВД РФ, 1997. – 467 с.

26. Молчанов, В.П. Закономерности тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах подслоным способом в условиях интенсивного движения жидкости [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Молчанов Виктор Павлович. – М.: МИПБ МВД РФ, 1996. – 143 с.

27. Измаилов, А.С. Противопожарные разрывы на складах легковоспламеняющихся и горючих жидкостей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1972. – 191 с.

28. Грушевский, Б.В. Исследование параметров, влияющих на величину противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями промышленных объектов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук – М.: ВИПТШ МВД СССР. – 1969. – 220 с.

29. Джумагалиев, Р.М. Закономерности распределения тепловых потоков при пожаре в резервуарном парке [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИПТШ МВД РФ, 1992. – 207 с.

30. Хабибулин, Р.Ш. Устойчивость наземных горизонтальных стальных резервуаров к воздействию тепловых потоков пожара разлива нефтепродуктов [Текст] / Р.Ш. Хабибулин, В.П. Сучков, С.А. Швырков // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 4. – С. 39–42.

31. Петров, И.И. Тушение пожаров нефтепродуктов в резервуарах распылённой водой [Текст] / И.И. Петров, В.А. Герасимов // Отчёт ЦНИПО. – Баку, 1957.

32. Лосев, В.П. О механизме тушащего действия пен при горении нефтепродуктов в резервуарах [Текст] / В.П. Лосев, М.В. Казаков // Информационный сборник ЦНИИПО. – М., 1958.

33. Герасимов, В.А. Тушение пламени нефтепродуктов распылённой водой [Текст] / В.А. Герасимов, И.И. Петров, В.Ч. Реутт // Новые способы и средства тушения пламени нефтепродуктов. – 1960. – С 84–98.

34. Шебеко, Ю.Н., Отечественный и зарубежный опыт применения водяного орошения для противопожарной защиты технологического оборудования и строительных конструкций [Текст] / Ю.Н. Шебеко, Д.М. Гордиенко, В.Л. Малкин, В.А. Колосов, В.В. Ильичев // Пожарная безопасность. – 2016. – № 2. – С. 128–137.

35. Шебеко, Ю.Н. Обеспечение пожарной безопасности резервуарного парка хранения нефтепродуктов, расположенного вблизи жилых и общественных зданий [Текст] / Ю.Н. Шебеко, И.А. Болодьян, Д.М. Гордиенко, Ю.И. Дешевых, А.Н. Гилетич, Д.С. Кириллов, В.П. Некрасов, А.А. Пономарев // Пожарная безопасность. – 2009. – № 2. – С. 33–41.

36. Решетар, Я. Исследование граничных условий для расчета огнестойкости строительных и технологических конструкций, омываемых пламенем при пожаре [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 220с.

37. Мордашов, С.В. Оценка огнестойкости стальных конструкций [Текст] / С.В. Мордашов, С.В. Пузач, В.Н. Ильин // Вестник Академии Государственной противопожарной службы. – 2006. – № 5. – С. 159-166.

38. Шебеко, Ю.Н. О возможности предотвращения взрыва резервуара с перегретой жидкостью в очаге пожара путем использования предохранительных устройств [Текст] / Ю.Н. Шебеко, А.П. Шевчук, И.М. Смолин // Химическая промышленность. – 1994. – № 12. – С. 837-848.

39. Шебеко, Ю.Н. Моделирование пожаров технологических объектов / В кн.: Моделирование пожаров и взрывов [Текст] / Ю.Н. Шебеко, А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – С. 198–219.

40. Копылов, Н.П. Моделирование тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах с применением водопенных огнетушащих веществ [Текст] / Н.П. Копылов, Д.В. Федоткин, А.В. Карпов, Е.Ю. Сушкина // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 8. – С. 14–22.

41. Савченко, А.В. Перспективы использования гелеобразующих систем для охлаждения резервуаров с нефтепродуктами от теплового воздействия пожара [Текст] / А.В. Савченко // Проблемы техносферной безопасности: Материалы 3-й международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 96–98.

42. Рубцов, Д.Н. Обзор научно-исследовательских работ в области изучения поведения технологических систем в экстремальных условиях углеводородного пожара [Текст] / Д.Н. Рубцов, В.В. Рубцов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 3. – С. 21–26.

43. Сулейманов, И.Р. Температурный режим крыши и понтона из алюминия при горении моделей РВСП-1000 [Текст] / И.Р. Сулейманов // Проблемы техносферной безопасности: Материалы 2-й международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 98–101.

44. Землянский, А.А. Организация активного управления эксплуатационной надежностью экологически опасных и ядерных объектов [Текст] / А.А. Землянский, К.А. Землянский, С.А. Дубнов // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2018. – Т. 18. – № 8. – С. 90–93.

45. Блинов, В.И. О механизме горения нефтепродуктов в резервуарах [Текст] / В.И. Блинов // Новые способы и средства тушения пламени нефтепродуктов. –1960. – С. 51–55.

46. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: отраслевые технические нормы (утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 09.06.2003 г. № 76) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 05.05.2022).

47. Петропавловская, И.А. В. Г. Шухов – выдающийся инженер и ученый: Труды Объединенной научной сессии Академии наук СССР, посвященной научному и инженерному творчеству почетного академика В. Г. Шухова [Текст] / И.А. Петропавловская – М.: Наука, 1984. – 96 с.

48. 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) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 05.05.2022).

49. Егоров, А.Н. Тенденции в применении резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане [Текст] / А.Н. Егоров // Проблемы техносферной безопасности: Материалы VI международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 43–47.

50. ГОСТ Р 53324-2009. Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: национальный стандарт (утв. и введ. в действие Приказом Ростехрегулирования от 18.02.2009 г. № 100-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 05.05.2022).

51. Цой, А.А. Особенности пожарной опасности резервуаров с защитной стенкой [Текст] / А.А. Цой // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2014. – № 1 (5). – С. 313–317.
52. Сучков, В.П. Методы оценки пожарной опасности технологических процессов [Текст]: практикум / В.П. Сучков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – 155 с.
53. Котляревский, В.А. Безопасность резервуаров и трубопроводов [Текст] / В.А. Котляревский, А.А. Шаталов, Х.М. Ханухов. – М.: Экономика и информатика, 2000. – 555 с.
54. Сучков, В.П. Пожары резервуаров с нефтью и нефтепродуктами. Тематический обзор [Текст] / В.П. Сучков, И.Ф. Безродный, А.В. Вязниковцев, А.Н. Гилетич, В.П. Молчанов, А.Н. Швырков. – М., 1992.
55. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: Статический сборник. Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2020. 80 с.: ил. 30.
56. Иванов, Е.И. Пожарная защита открытых технологических установок [Текст] / Е.И. Иванов. – М.: Химия, 1975.
57. Пояснительная записка по пожару, произошедшему 22.08.2009 г. в резервуарном парке Линейной производственно диспетчерской станции «Конда» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rudocs.exdat.com/docs/index-216953.html> (дата обращения: 14.06.2020 г.).
58. Пожар на ЛПДС «Конда» [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://wiki-fire.org/Крупные_пожары.22-08-2009-ХМАО-ЛПДС-КОНДА.ashx (дата обращения: 14.06.2018 г.).
59. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования [Электронный ресурс]: национальный стандарт (утв. и введ. в действ. Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 14.06.1991 № 875). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/9051953> (дата обращения: 01.04.2020).
60. ГОСТ Р 12.3.047-98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. Методы контроля [Электронный

ресурс]: национальный стандарт (прин. и введ. в действ. Постановлением Госстандарта России от 03.08.1998 № 304). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003311> (дата обращения: 01.04.2020).

61. 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 № 1971-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 05.11.2019).

62. О промышленной безопасности опасных производственных объектов [Электронный ресурс]: федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2020. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 01.02.2020).

63. ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения [Электронный ресурс]: национальный стандарт (утв. и введ. в действ. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24.10.2016 г. № 1496-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 05.05.2022).

64. ANSYS Multiphysics [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-multiphysics> (дата обращения: 14.06.2020 г.).

65. ABAQUS – многоцелевой конечно-элементный комплекс для инженерного анализа [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sapr.ru/article/6736> (дата обращения: 14.06.2020 г.).

66. Волков, А.В. Влияние поверхностных неоднородностей на теплообмен и трение в трубах теплообменников [Текст] / А.В. Волков, В.П. Мотулевич, С.А. Чернышев, С.А. Петриков // Энергоснабжение и водоподготовка. – 2008. – № 5(55). – С. 55-57.

67. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics> (дата обращения: 14.06.2020 г.).

68. ANSYS vs Comsol Multiphysics [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://dolivanov.ru/node/152> (дата обращения: 14.06.2020 г.).

69. Красников, Г.Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета COMSOL Multiphysics [Текст] / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. М., 2012. 184 с.

70. Рубцов, Д.Н. Математическое моделирование как метод изучения устойчивости защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» в условиях пожара [Текст] / Д.Н. Рубцов, А.Н. Егоров // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 389–392.

71. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902170886> (дата обращения: 01.04.2020).

72. Неуймин, Я.Г. Модели в науке и технике. История, теория, и практика [Текст] / Я.Г. Неуймин. – Л., 1984.

73. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. К.Г. Бомштейна; Под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова. – М., Стройиздат, 1990. – 424 с.

74. Дмитриев, Н.Н. Методика моделирования нефтяных вертикальных цилиндрических резервуаров для испытания их конструкций на прочность в условиях лаборатории [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.15 / Дмитриев Николай Николаевич. – М., 1985. – 276 с.

75. Швырков С. А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара: монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 289 с.

76. В.В. Воробьев Экспериментальные исследования дополнительных защитных преград для ограничения разлива нефтепродуктов при внезапных разрушениях резервуаров [Электронный ресурс] / В.В. Воробьев // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 2(18). – С. 1–9. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_14779174_48383157.pdf (дата обращения: 05.05.2021).

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

78. Швырков С. А. Исследование устойчивости противопожарных преград резервуарных парков к воздействию волны прорыва при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара. [Текст] / С.А. Швырков, С.В. Батманов, А.М. Крылов, В.В. Финогенова // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 4. – С. 42–45.

79. Назаров, В.П. Очистка резервуаров от остатков светлых нефтепродуктов перед проведением огневых ремонтных работ [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Назаров Владимир Петрович. – М., 1980. – 238 с.

80. Шароварников, А.Ф. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов [Текст] / А.Ф. Шароварников, В.П. Молчанов, С.С. Воевода, С.А. Шароварников. – М.: Калан, 2002. – 448 с.

81. Сафарян, М.К. Металлические резервуары и газгольдеры [Текст] / М.К. Сафарян. – М.: Недра, 1987. – 200 с.

82. *Bray, G.A. Fire protection of liquid petroleum gas storage tanks [Text] / G.A.Bray, // Institute of Gas Engineers Journal. – 1964. – No. 11. – Pp. 776–789.*

83. Suardin, J.A. *The application of expansion foam on liquefied natural gas (LNG) to suppress LNG vapor and LNG pool fire thermal radiation: Diss. Doctor of philosophy: major subject: Chemical Engineering / SuardinJaffeeArizon, 2008. – 149 p.* [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://core.ac.uk/download/pdf/147132498.pdf> (дата обращения: 14.06.2020 г.).

84. Munoz et al. (2007) Muñoz M., Planas E., Ferrero F., Casal J. *Predicting the emissive power of hydrocarbon pool fires.* – *J. Haz. Materials*, v. 144, iss. 3, pp. 725-729. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407001719?via%3Dihub> (дата обращения: 14.06.2020 г.)

85. Yumoto T. *Fire spread between two oil tanks [Text] / T. Yumoto // J. Fire and Flammability.* - 1977, 8, No. 4, pp. 494-505.

86. Грачев, Г.Г. Предупреждение и тушение пожаров в резервуарах: Обзорная информация [Текст] / Г.Г. Грачев, А.С. Катаева, Г.И. Матвеева. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1985. – 45 с.

87. Рубцов, Д.Н. Опыт применения моделей нефтяных резервуаров в экспериментальных исследованиях [Текст] / Д.Н. Рубцов, А.Н. Егоров // Проблемы техносферной безопасности: Материалы 7-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 66–70.

88. Рубцов, Д.Н. Модель резервуара типа «стакан в стакане» для выполнения огневых испытаний его защитной стенки [Текст] / Д.Н. Рубцов, А.Н. Егоров, В.В. Рубцов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 2. – С. 22–25. DOI:10.25257/FE.2018.2.22-25

89. Назаров, В.П. Пожаровзрывобезопасность предремонтной подготовки и проведение огневых работ на резервуарах [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Назаров Владимир Петрович. – М., 1995. – 444 с.

90. API 650 «*Welded Tanks for Oil Storage*» Сварные резервуары для хранения нефти. 13-е изд. – 2020. [Электронный ресурс] - Режим доступа:

https://sarrz.ru/proektirovschiku/spravochnaya_informatsiya__gost_snipyi_pb/api_650/
(дата обращения: 14.03.2021 г.).

91. ТКП 45–5.04–172–2010 (02250). Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. Правила проектирования и устройства. [Электронный ресурс]: технический кодекс установившейся практики Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://anticorr.by/wp-content/uploads/2017/08/TKP-45-5.04-172-2010-Stalnye-vertikalnye-tsilindricheskie-rezervuary-dlya-hraneniya-nefti-i-nefteproduktov.pdf> (дата обращения: 14.03.2021 г.).

92. ДСТУ Б В.2.6–183:2011. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия [Электронный ресурс]: государственный стандарт Украины. – Режим доступа: http://interiorfor.com/wp-content/uploads/2017/06/dstu_b_v.2.6-183-2011.pdf (дата обращения: 14.03.2021 г.).

93. Рубцов, Д.Н. Обоснование необходимого и достаточного диаметра модельного резервуара типа «стакан в стакане» для выполнения огневых испытаний защитной стенки [Текст] / Д.Н. Рубцов, А.Н. Егоров // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 8(212). – С. 41–47.

94. Рубцов, Д.Н. Огневые испытания защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» при воздействии на неё 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. 25–30. DOI: 10.25257/FE.2019.1.25-31.

95. Кошмаров, Ю.А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле [Текст] / Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. – М.: ВИПТШ МВД СССР. – 1987. – 443 с.

96. *Persson H., Lönnemark A.* Tank Fires: Review of fire incidents 1951–2003. SP Fire Technology, Brandforsk Project 513-021 SP Report 2004:14. SP Swedish National testing and Research Institute, Borås, 2004. 80 p.

97. Демехин, В.Н. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: учебник [Текст] / В.Н. Демехин [и др.]. – М.: Академия ГПС МЧС РФ, 2003. – 656 с.

98. Контактные методы измерения температуры [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studopedia.org/4-146294.html> (дата обращения: 11.02.2021 г.)

99. ГОСТ 28243-96. Пирометры. Общие технические требования [Электронный ресурс]: национальный стандарт (утв. Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 20.01.2003 г. № 18-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 05.02.2021).

100. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В.П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.

101. Егоров, А.Н. Термография в экспериментальных исследованиях нагрева защитной стенки модельного резервуара типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / А.Н. Егоров // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 2(84). – 54–62 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38471499> (дата обращения: 01.02.2020). DOI:10.25257/TTS.2019.2.84.54-62.

102. Неделько, А.Ю. Преимущества и недостатки бесконтактного измерения температуры [Текст] / А.Ю. Неделько // Фотоника. – 2013. – № 1. – С. 102–109.

103. Руководство по эксплуатации модуля аналогового ввода с универсальными входами MB110. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://docs.owen.ru/product/moduli_analogovogo_vvoda_s_universal_nimi_vhodami_s_interfejsom_rs_485/538/39485#topic-39485 (дата обращения: 09.03.2021).

104. ГОСТ Р 8.585-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. [Электронный ресурс]: национальный стандарт (утв. и введ. в действ. Постановлением Госстандарта России от 21.11.2001 г. № 474-ст) // СПС

КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 05.05.2022).

105. Фрактовникова, А.А. Опыт разработки и применения высокотемпературных термопар в ГНЦ РФ ФЭИ [Текст] / А.А. Фрактовникова, Б.В. Кебадзе, В.П. Корнилов // Температура-2004: Тезисы докладов 2-й Всероссийской конференции по проблемам термометрии. – Подольск: ФГУП НИИ НПО «Луч», 2004.

106. Gardon, R. *An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation* [Text] / R. Gardon // *Rev. Sci. Instrum. C: ISA* – 1953. – No. 24 – Pp. 366–370.

107. Прибор комбинированный «ТКА-ПКМ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.tkaspb.ru/wp-content/uploads/2021/06/manual_tka-pkm50_21-04.pdf (дата обращения: 11.02.2021 г.).

108. Волосухин, В.А. Планирование научного эксперимента [Текст]: Учебник / В.А. Волосухин, А.И. Тищенко. – 2-е изд. – М.: РИОР; ИНФА-М, 2014. – 176 с.

109. Сидняев, Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных [Текст]: учебное пособие для магистров / Н.И. Сидняев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2014. – 495 с.

110. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей [Текст]: учебник / Е.С. Вентцель. – 11-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2010. – 664 с.

111. Рубцов, Д.Н. Требования к размещению систем пожарной автоматики на защитной стенке резервуара типа «стакан в стакане» [Текст] / Д.Н. Рубцов, А.Н. Егоров, В.В. Рубцов, В.А. Худобин // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной юбилею Академии. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 217–221.

112. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила

проектирования [Электронный ресурс]: свод правил. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200071148> (дата обращения: 11.02.2021 г.).

113. ВУПП 88. Ведомственные указания по противопожарному проектированию предприятий, зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. [Электронный ресурс]: ведомственные указания по противопожарному проектированию. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294848/4294848607.htm> (дата обращения: 11.02.2021 г.).

114. Егоров, А.Н. Численное моделирование нагрева защитной стенки модели резервуара типа «стакан в стакане» в условиях пожара в основном резервуаре [Электронный ресурс] / Д.Н. Рубцов, А.Н. Фещенко, Р.А. Шатилов // Технологии техносферной безопасности. – 2024. – № 2(104). – С. 165–176. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68025676>. DOI: 10.25257/TTS.2024.2.104.165-176.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Акты внедрения результатов диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер
Володарского районного
нефтепродуктопроводного управления
АО «Транснефть-Верхняя Волга»

А.С. Касимов

« 16 » 09 2021 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационного исследования
Егорова Андрея Николаевича на тему: «Устойчивость защитной стенки
к воздействию пламени пожара в резервуаре типа «стакан в стакане»
в Володарском районном нефтепродуктопроводном управлении АО
«Транснефть – Верхняя Волга»

Комиссия в составе: заместителя главного инженера по безопасности труда и производственного контроля Володарского районного нефтепродуктопроводного управления Тихонова Я.Б., начальника отдела пожарной безопасности Володарского районного нефтепродуктопроводного управления Еремеева С.В., ведущего инженера службы промышленной безопасности и производственного контроля Володарского районного нефтепродуктопроводного управления Тарасова О.С. подтверждает, что результаты диссертационной работы Егорова А.Н. использовались при разработке концепции модернизации резервуарного парка линейной производственно-диспетчерской станции «Володарская», в случае его технического перевооружения и обоснования возможности использования в его составе резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане», а именно, для оценки теплового состояния защитной стенки в случае пожара светлых нефтепродуктов в основном резервуаре и использовании указанных сведений для планирования действий пожарных подразделений.

Комиссия:

Заместитель главного инженера
Володарского районного
нефтепродуктопроводного управления

Я.Б. Тихонов

Начальник отдела пожарной безопасности
Володарского районного
нефтепродуктопроводного управления

С.В. Еремеев

Ведущий инженер службы
промышленной безопасности и производственного контроля
Володарского районного
нефтепродуктопроводного управления

О.С. Тарасов

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
АО «Серпуховская нефтебаза»
Федоров Ю.Б.
 « 28 » 202 1 г.



А К Т

**внедрения результатов диссертационного исследования
 Егорова Андрея Николаевича на тему: «Устойчивость защитной стенки
 к воздействию пламени пожара в резервуаре типа «стакан в стакане»
 в АО «Серпуховская нефтебаза»**

Комиссия в составе: технического директора АО «Серпуховская нефтебаза» Лейтмана Г.В., начальника службы безопасности АО «Серпуховская нефтебаза» Вахрушева С.С., составила настоящий Акт о том, что результаты диссертационной работы Егорова А.Н. использовались при обосновании возможного размещения резервуаров с защитной стенкой типа «стакан в стакане» в рамках перспективного проекта, связанного с повышением категории вместимости склада хранения нефтепродуктов на АО «Серпуховская нефтебаза», а именно при расчетном моделировании теплового состояния защитной стенки в случае пожара в основном резервуаре типа «стакан в стакане» при подготовке комплекса мер по их противопожарной защите.

Комиссия:

Технический директор
 АО «Серпуховская нефтебаза»



Г.В. Лейтман

Начальник службы безопасности
 АО «Серпуховская нефтебаза»



С.С. Вахрушев