

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на кафедре пожарной безопасности технологических процессов (в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты)

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Рубцов Дмитрий Николаевич

Официальные оппоненты:

Хафизов Ильдар Фанилевич
доктор технических наук, профессор,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, кафедра
пожарной и промышленной
безопасности, профессор

Фомина Екатерина Евгеньевна
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина», кафедра
промышленной безопасности и
охраны окружающей среды, доцент

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский университет
ГПС МЧС России им. Героя
Российской Федерации генерала
армии Е.Н. Зиничева

Защита состоится «10» декабря 2024 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/8aa/8k71e9j6qp24zsfic0cnk6zziscm56p8/Диссертация%20Егорова%20А.Н..pdf>

Автореферат разослан «09» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Соковнин Артем Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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).

Вместе с этим, анализ литературных источников, 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 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 выявлено, что в основном они связаны с изучением проектирования и обеспечения безопасной эксплуатации резервуаров с защитной стенкой. Работы, 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 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «Анализ научных исследований и нормативных требований к устойчивости защитной стенки резервуаров типа «стакан в стакане» при пожаре» представлен обзор литературных источников, посвященных проблематике пожарной безопасности резервуара типа «стакан в стакане». В результате проведенного обзора выявлено отсутствие исследований поведения защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» при влиянии на неё тепловых нагрузок пожара.

Анализ нормативной литературы позволил классифицировать факторы, влияющие на устойчивость защитной стенки резервуара (рисунок 1). В настоящей работе предлагается расширить существующую классификацию факторов, относящихся к особым видам нагрузок и не учитываемых нормативными документами при проектировании, и добавить к разделу «Особые нагрузки» температурные воздействия, возникающие при пожаре.

На основе анализа терминологии, применяемой в научной и нормативно-

технической литературе, сформулирован термин, определяющий устойчивость защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» к пламени пожара – возможность сохранять конструктивную целостность для ограничения площади разлива ГЖ при воздействии на защитную стенку повышенной температуры и теплового потока пожара.

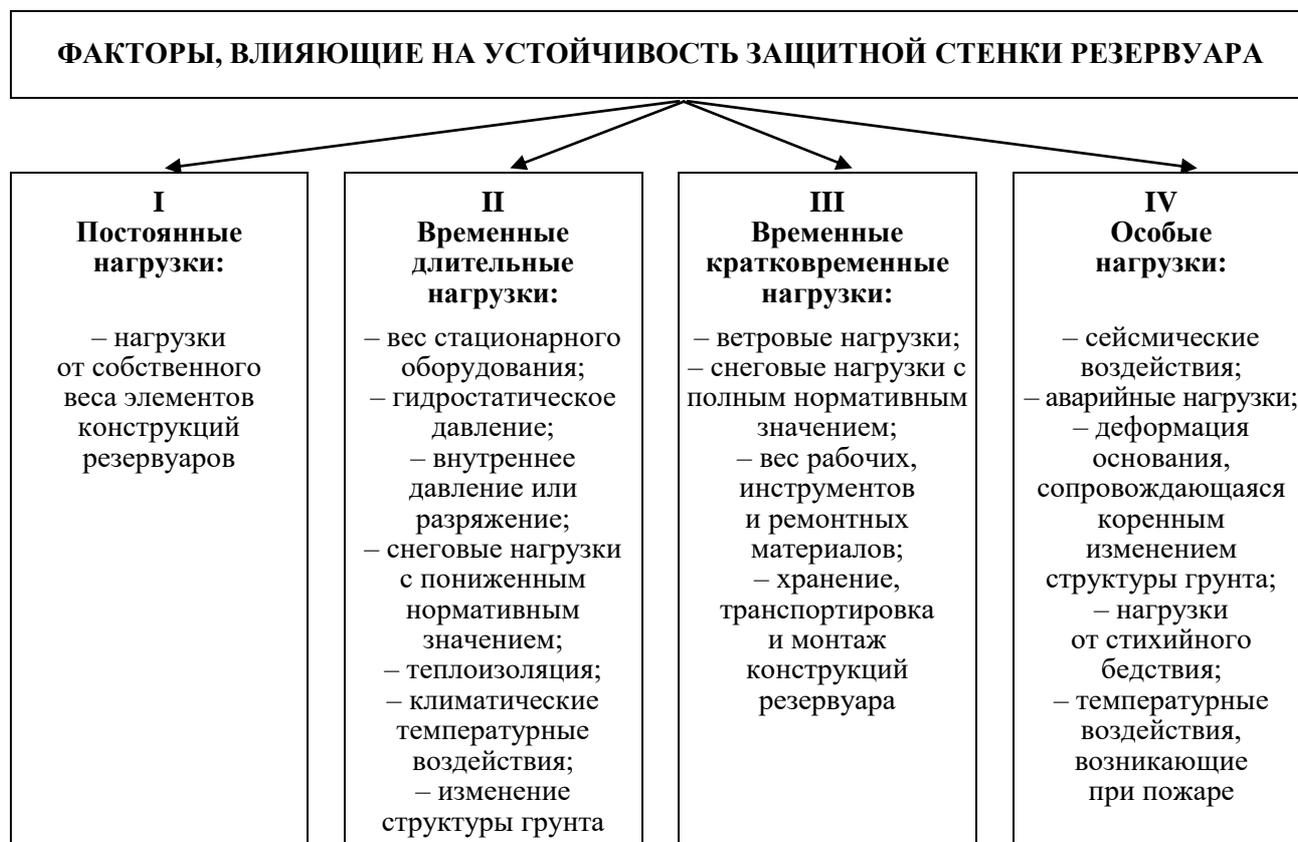


Рисунок 1 – Классификация факторов, влияющих на устойчивость защитной стенки

Устойчивость защитной стенки резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре будет обеспечена, если рабочее напряжение, возникающее на защитной стенке, при воздействии на неё температурных напряжений, создаваемых пламенем пожара, не достигнет предела прочности.

Анализ нормативных документов в области обеспечения пожарной и промышленной безопасности выявил наличие требований, предъявляемых к резервуарам с защитной стенкой, касающихся конструктивного исполнения ЗС и её СПЗ. Существующие требования подчеркивают необходимость изучения теплового состояния ЗС для формирования научного обоснования её устойчивости при пожаре.

Во второй главе «Численное моделирование нагрева защитной стенки модели резервуара типа «стакан в стакане» в условиях пожара» представлены результаты численного моделирования по определению нестационарных температурных полей, возникающих в корпусе математической модели резервуара с защитной стенкой в условиях пожара.

Проблема взаимодействия пламени пожара с поверхностью стальных оболочек корпусов резервуара сложна и многообразна. Математическая модель по определению температурных полей в корпусе ЗС заключается в решении дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности,

описывающих процесс теплообмена, происходящий в горящем резервуаре, с учётом изменения его теплофизических характеристик и состоит из комплекса физических процессов, связанных между собой.

Численное моделирование проведено на базе современной вычислительной платформы – COMSOL Multiphysics. Данное программное обеспечение позволяет удобно и точно моделировать сложные и комплексные физические процессы, в том числе взаимодействия пламени пожара нефтепродуктов с корпусом резервуара и его защитной стенкой.

В численном моделировании использован метод конечных элементов, для чего разработана конечно-элементная модель объекта исследования номинальным объемом 700 м³ в масштабе 1:7 для дальнейшей возможности создания физической модели экспериментального стенда резервуара типа «стакан в стакане» аналогичного масштаба с целью проведения процедуры верификации результатов численного моделирования.

Геометрия модели резервуара построена в цилиндрической осесимметричной системе координат в двухмерной постановке, с соответствующими геометрическими параметрами. Принципиальная модель резервуара изображена на рисунке 2 с расчётными областями.

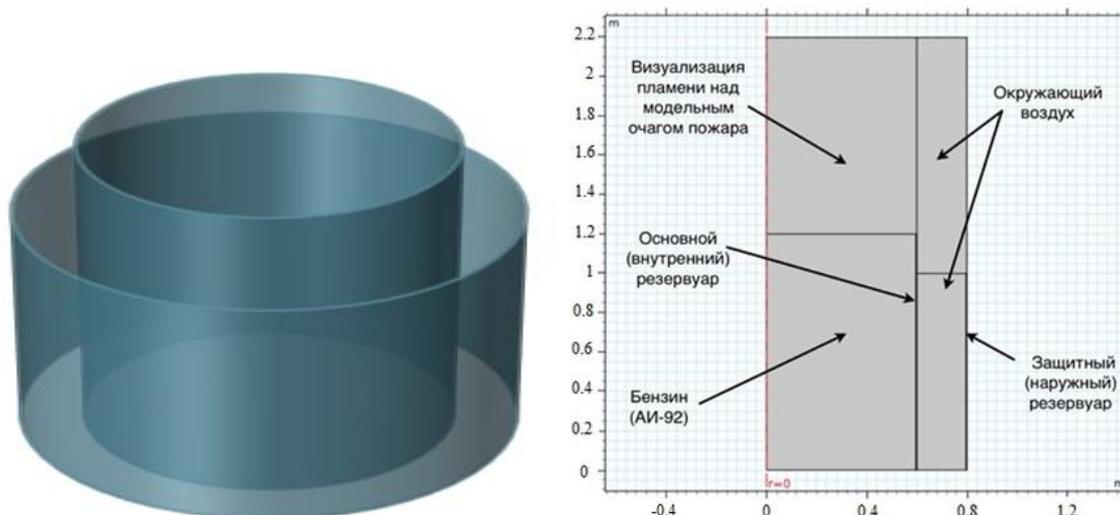


Рисунок 2 – Геометрия и границы модели резервуара типа «стакан в стакане» для проведения математического моделирования в COMSOL Multiphysics

Размер модели в указанном масштабе составляет: внутренний диаметр основной стенки модели $D_{ОСМ} = 1,22$ м с её высотой $H_{ОСМ} = 1,3$ м; внутренний диаметр защитной стенки модели $D_{ЗСМ} = 1,62$ м с её высотой $H_{ЗСМ} = 1$ м.

При математическом моделировании учитываются следующие допущения и теплообменные процессы: воздействие теплового потока от пламени к корпусу ОР и ЗС; теплопроводность стальных корпусов ОР и ЗС; теплообмен стенки ОР с находящимся в нём нефтепродуктом; теплообмен корпуса ОР и ЗС с окружающей средой; нижняя граница модели резервуара типа «стакан в стакане» термически изолирована, так как расположена на уровне земли, что учитывается расчётным узлом «Thermal Insulation».

При определении температуры и плотности теплового потока пламени нефтепродукта использованы богатый экспериментальный опыт других

исследователей, а также положения ряда нормативных документов по пожарной безопасности. Температура пламени составила – 900 °С, плотность теплового потока – 50 кВт/м².

Характеристика и теплофизические параметры материала модели резервуара типа «стакан в стакане»: марка конструкционной низколегированной стали 09Г2С; толщина корпуса ОР – 12 мм; толщина корпуса ЗС – 4 мм, что является допустимым конструктивным минимум в соответствии с требованиями нормативных документов; плотность $\rho = 7832 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; удельная теплоёмкость $C = 494 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$; теплопроводность $\lambda = 64 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$.

Для проведения математического моделирования составлена система дифференциальных уравнений, описывающих динамику температуры корпуса ОР и его ЗС с использованием физического модуля «Heat Transfer with Radiation in Participating Media».

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

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q_r + Q, \quad (1)$$

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

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

T – температура, К;

q – количество теплоты с поверхности, описываемое законом теплопроводности Фурье (2):

$$q = -\lambda \cdot \nabla T, \quad (2)$$

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

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 (3) и вычисляется значение Q_r , входящее в состав уравнения теплового баланса (1):

$$Q_r = \kappa(G - 4\pi I_b), \quad (3)$$

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

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

I_b – интенсивность излучения черного тела, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1}$; выражаемое из уравнения (4):

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

где n – показатель преломления;

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

Количество теплоты, получаемое от излучения Q_r , аппроксимируется уравнением (5), решаемым в указанном расчётном узле:

$$\nabla \cdot (D_{p1} \nabla G) + \kappa(G - 4\pi I_b), \quad (5)$$

где D_{p1} – коэффициент диффузии, который находится из уравнения (6):

$$D_{p1} = \frac{1}{3 \cdot (\kappa + \sigma_s)}, \quad (6)$$

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» в формуле (7):

$$n \cdot (D_{p1} \nabla G) = -q_{r.net}, \quad (7)$$

где $q_{r.net}$ – чистый излучаемый тепловой поток, пересчитываемый в зависимости от степени черноты воспринимающей поверхности по формуле (8):

$$q_{r.net} = \frac{\varepsilon}{2(2-\varepsilon)} (4\pi I_b - G), \quad (8)$$

где ε – коэффициент излучения.

Для учета излучения между основным корпусом резервуара и защитной стенкой добавлен расчётный узел «Diffuse Surface», учитывающий излучающую составляющую стальной оболочки резервуара с помощью уравнения (9):

$$q = \varepsilon(G - e_b(T)), \quad (9)$$

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

Так как предполагается, что внешняя граница корпусов резервуара окрашена, то для них добавлен отдельный расчётный узел «Diffuse Surface», в котором задаётся коэффициент излучения равный 0,7.

Для учета конвективного теплообмена между поверхностью внешней границы защитного резервуара и окружающей средой добавлен расчётный узел «Heat Flux», который добавляет в общее уравнение теплового баланса (1) количественную составляющую теплоты, исходя из формулы Ньютона – Рихмана для конвективной теплоотдачи (10):

$$q = \alpha \cdot (T_{ext} - T), \quad (10)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, принят на основе ранее выполненных в Академии ГПС МЧС России экспериментальных исследований и составляет $15 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{К}^{-1}$; T_{ext} – внешняя температура (К).

На границе выхода воздуха и пламени в окружающую среду задается граничное условие «Outflow», которое добавляет условие передачи (оттока) тепла, в качестве конвективной составляющей, в окружающее пространство.

Математическая модель учитывает, что на границе слоя нефтепродукта и пламени пожара передача тепла теплопроводностью крайне мала, а основным источником тепла является конвекция, в связи с этим добавлен расчётный узел «Thin Layer», где задана относительно малая теплопроводность слоя. Данное граничное условие решает систему уравнений (11)–(14) и добавляет ещё один источник теплоты в общее уравнение теплового баланса (1).

$$\rho_{si} C_{p,si} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla_t \cdot q_{si} = Q_{si} \quad (11)$$

$$q_{si} = -\lambda_{si}(\nabla_t T_s + \nabla_n T_s) \quad (12)$$

$$T_u = (T_s)_{L=0} \quad (13)$$

$$T_d = (T_s)_{L=d_s} \quad (14)$$

где ρ_{si} – плотность слоя, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

$C_{p,si}$ – удельная теплоемкость слоя, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$;

λ_{si} – теплопроводность слоя, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$;

d_s – толщина слоя, м;

q_{si} – количество теплоты, воспринимаемое слоем, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}$. При начальных условиях того, что начальная температура слоя нефтепродукта T_s принята равной температуре окружающего воздуха T_u и температура слоя нефтепродукта T_s равномерно распределена по высоте слоя T_d .

Для численного расчёта нестационарного теплового поля построена конечно-элементная модель резервуара типа «стакан в стакане». Результаты численного расчета математической модели представлены в виде графической интерпретации температурных полей модели резервуара при пожаре в ОР в условиях влияния различных скоростей ветра (рисунок 3).

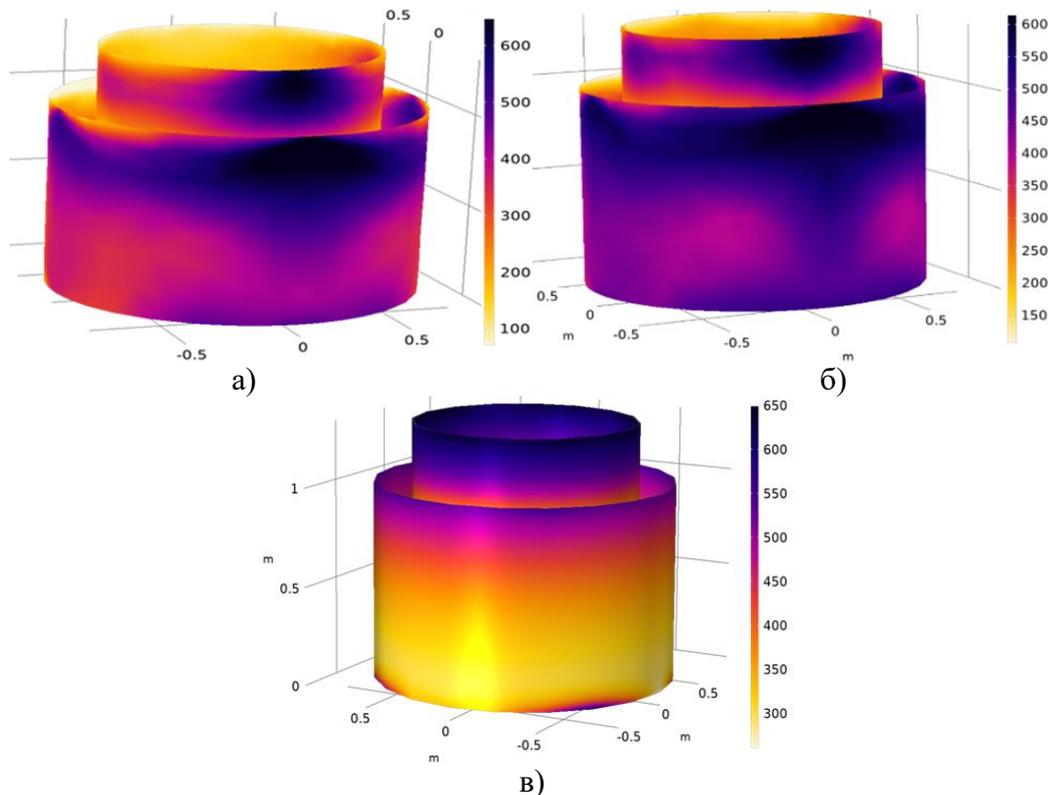


Рисунок 3 – Изоповерхности температуры ОР и ЗС модели резервуара с защитной стенкой при пожаре в основном резервуаре при скоростях ветра: а) 0 м/с; б) 3 м/с; в) 5 м/с

В результате численного моделирования установлено, что сформулированная математическая модель позволяет определять распределение температурных полей по корпусу ОР и ЗС модели резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре в основном резервуаре. Из полученных результатов математического моделирования видно, что резервуар с защитной стенкой ведет себя как единая термодинамическая система, но при его нагреве присутствуют перетоки тепла, чем объясняется неравномерность нагрева. Вместе с этим для подтверждения адекватности математической модели и результатов

математического моделирования необходимо провести её верификацию. Для этого необходимо реализовать натурный эксперимент с физической моделью резервуара типа «стакан в стакане», аналогичной по геометрическим и физическим параметрам математической модели.

В третьей главе «Физический эксперимент по нагреву защитной стенки модели резервуара типа «стакан в стакане» в условиях пожара» описан разработанный экспериментальный стенд, методика проведения огневых испытаний и представлено обсуждение их результатов.

Для проведения физического эксперимента спроектирован и реализован экспериментальный стенд, основой которого является физическая модель резервуара типа «стакан в стакане» номинальным объемом 700 м^3 , выполненная в масштабе 1:7. Указанная модель состоит из двух стальных резервуаров, основного (внутреннего) и защитного (наружного). Диаметр внутреннего резервуара $D_{\text{ОРМ}} = 1,22 \text{ м}$ с её высотой $H_{\text{ОРМ}} = 1,3 \text{ м}$, диаметр ЗС $D_{\text{ЗСМ}} = 1,62 \text{ м}$ с её высотой $H_{\text{ЗСМ}} = 1 \text{ м}$. Толщины стенок равны размерам, используемым при численном моделировании, что позволяет моделировать условия прогрева борта реального резервуара.

При проектировании физической модели резервуара соблюдены критерии подобия пламени, зависящие от геометрического подобия резервуара. Главным геометрическим показателем модели резервуара, в котором он должен быть подобен натурному резервуару, является его диаметр. Диаметр модели резервуара превышает один метр $D_{\text{м}} \geq 1 \text{ м}$. При таком показателе пламя считается полностью турбулентным с преобладанием лучистой компоненты в процессе нагрева, а также соблюдается автомодельность выгорания углеводородных жидкостей.

Серия огневых экспериментальных исследований ставится:

- для оценки влияния тепловых нагрузок пожара, падающих на ЗС при пожаре в ОР, за счёт установления распределения на ней температурных полей, что позволит изучить нестационарный процесс нагрева защитной стенки;
- внесения при необходимости корректировок в математическую модель, 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, необходимый для обоснования интенсивности или удельной интенсивности подачи воды на охлаждение горящего резервуара и соседнего с горящим резервуара.

Измерительные приборы и методика проведения огневых испытаний

Для проведения огневых испытаний системы «основной резервуар с нефтепродуктом – защитная стенка» использована разработанная нами методика проведения огневых испытаний на научно-исследовательском полигоне Академии ГПС МЧС России. При проведении огневых испытаний интерес представлял поиск следующих физических величин: температура ОР и ЗС модельного резервуара, температура пламени нефтепродукта, значение теплового потока, воздействующего на защитную стенку, время теплового воздействия, длина факела пламени, скорость ветра.

Для измерения температурных показателей корпуса модели резервуара и температуры пламени использован модуль аналогового ввода МВ 110-224.8А

«ОВЕН». Диапазон измеряемых температур от 0 до 2500 °С. Погрешность измерений составляет $\pm 0,5$ % от показания.

Для снятия температурных показателей применялись вольфрам-рениевые термопары с диапазоном измерения от 0 °С до 1800 °С. Термопары закреплялись на корпусах ОР и ЗС методом зачеканивания с шагом по высоте 0,3 м, для чего модель резервуара была разделена на три пояса. Каждый пояс имеет следующий линейный размер с началом отсчёта от уровня основания модели: нижний пояс ОР от 0–0,4 м; средний пояс ОР 0,4–0,8; верхний пояс ОР 0,8–1,3 м; нижний пояс ЗС от 0–0,4 м; средний пояс ЗС 0,4–0,7; верхний пояс ЗС 0,7–1 м. Для уменьшения теплопотерь при проведении огневых испытаний на места крепления термопар наносился слой эпоксидной смолы. Термопары защищались кварцевой соломкой, выдерживающей экстремальный перепад температур, остальная их часть изолировалась асбестовой ниткой.

Измерение и регистрация лучистого теплового потока проводилась с помощью прибора ПТП-2001, который имеет диапазон измерений от 1 до 100 кВт/м², погрешность измерений $\pm 4,8$ %. Регистрация сигнала проводилась с помощью цифрового мультиметра УТ60А с погрешностью измерений $\pm 0,8$ %, получающего сигнал от приёмника теплового потока. Для фиксирования полученных данных мультиметр был подключен к персональному компьютеру. 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.

Для искусственного создания воздушного потока использован осевой вентилятор с вращающимся статором YWF4E SC-630 и хонейкомбом в виде сотообразной решетки, предназначенной для выравнивания поля скоростей и турбулентности воздушного потока. Измерение скорости искусственно создаваемых и естественных движений воздушных масс проводилось с помощью цифрового анемометра ТКА-ПКМ 50. Диапазон измерения скорости ветра составляет 0,1÷20 м/с. Для измерения длины пламени применяли штатив высотой 5 м с нанесённой измерительной шкалой.

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

Объем ГЖ определялся исходя из продолжительности горения, которая составила 900 секунд. ОР наполнялся на высоту 1 м водой, в которую погружался стальной поддон с ЛВЖ. Указанная высота моделировала максимальный уровень разлива нефтепродукта в натурном резервуаре. Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 4.

Результаты экспериментального исследования и их обсуждение

Методика проведения огневых испытаний состояла из определённого алгоритма действий, заключающихся в подготовке испытательного полигона, установке и наладке экспериментального стенда с измерительной аппаратурой, подготовкой модельного очага пожара и его воспламенением, непосредственным измерением искомых величин.

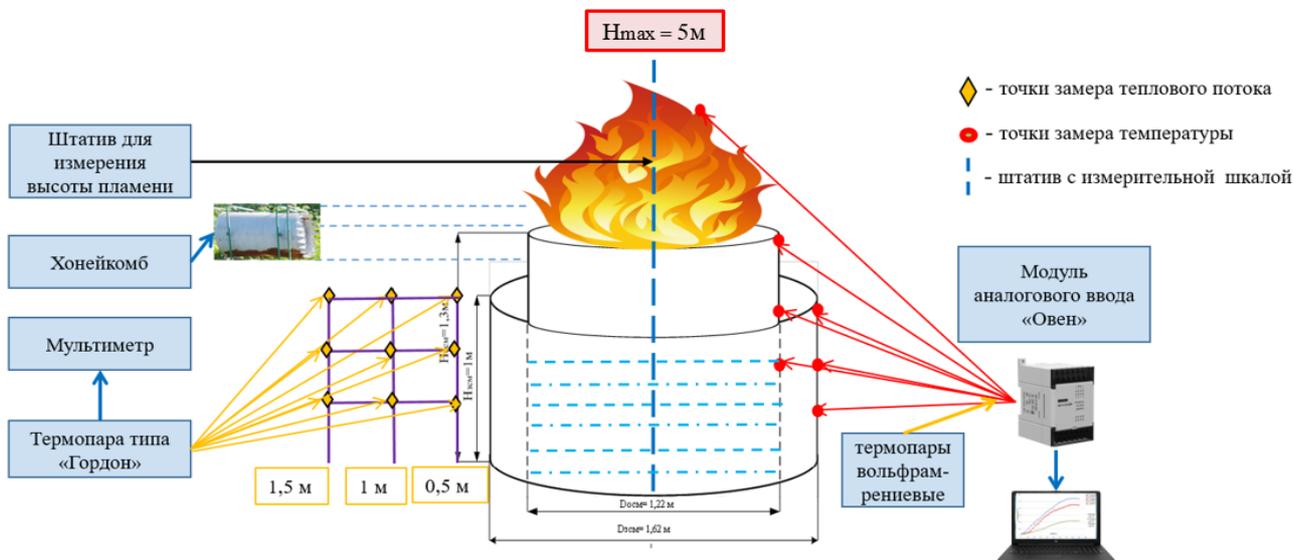


Рисунок 4 – Принципиальная схема экспериментального стенда для проведения огневых испытаний физической модели резервуара типа «стакан в стакане»

На рисунке 5 представлены фотофрагменты проведения огневых испытаний физической модели. Из представленных рисунков видно, что образование сажевых частиц наблюдается у вершины пламени, или они вообще не образовывались, следовательно, не могли влиять на снижение степени нагрева защитной стенки за счёт экранирования (поглощения) теплового потока. При проведении экспериментов ЗС испытывает наибольшие тепловые нагрузки. Время наступления критической температуры для сталей, равной 500 °С, представлено в таблице 1.

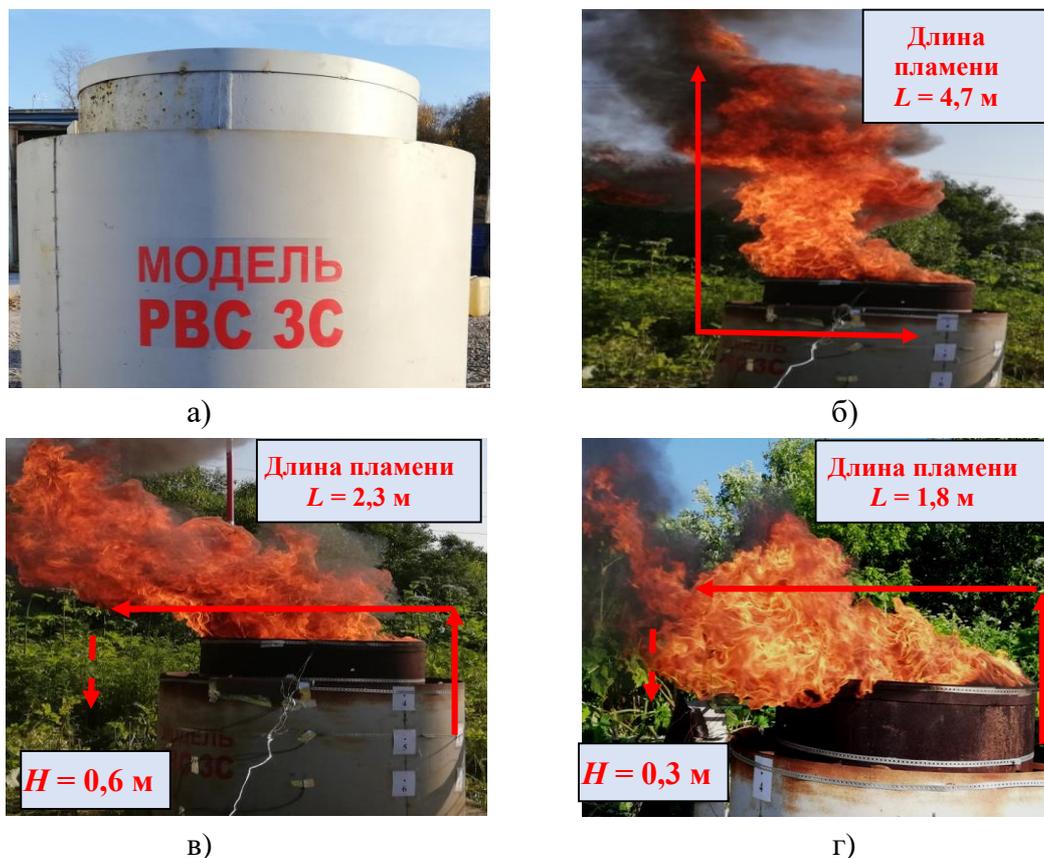


Рисунок 5 – Этапы проведения огневых экспериментов:

- а) общий вид модели резервуара типа «стакан в стакане»; б) испытания в условиях штиля;
 в) испытания при скорости ветра $u = 3$ м/с; г) испытания при скорости ветра $u = 5$ м/с

Таблица 1 – Время наступления критической температуры на модели резервуара

№ 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

Обобщение и обработка полученных экспериментальных данных проведена с помощью статистической обработки методом регрессионного анализа, при использовании программного обеспечения Microsoft Office Excel. На рисунках 6–8 представлено семейство кривых, описывающих динамику изменения теплового состояния системы «основной резервуар с нефтепродуктом – защитная стенка» с учётом воздействия разных скоростей ветра, а также приводится апробация разработанной математической модели с проверкой её адекватности методом сопоставления результатов численного моделирования с результатами натурных экспериментальных исследований.

Для определения связи между полученными в ходе проведения экспериментов данными использовали их статистическую обработку методом регрессионного анализа.

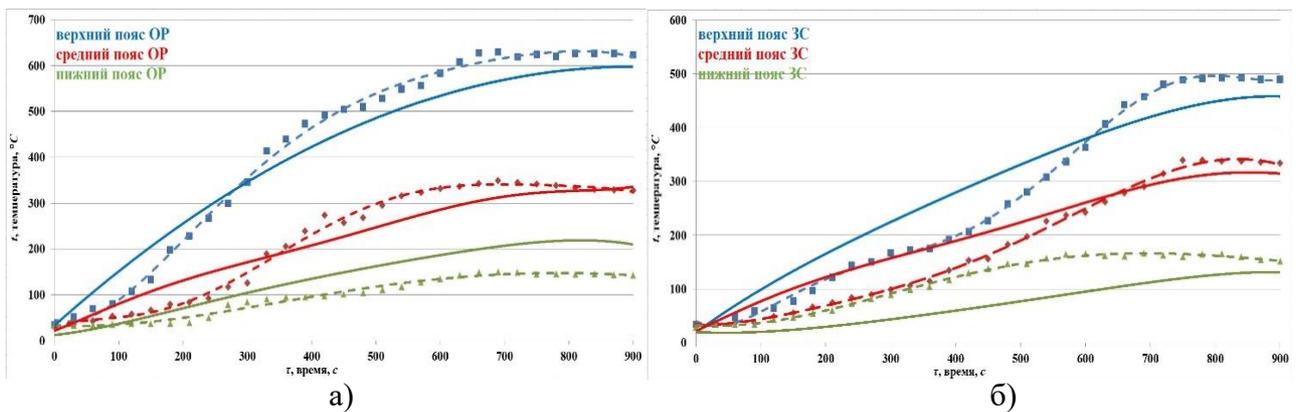


Рисунок 6 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры ОР (а) и ЗС (б) на разных уровнях в зависимости от времени при $u = 0$ м/с:
 - - - - - аппроксимация экспериментальных значений; ———— расчетные значения.

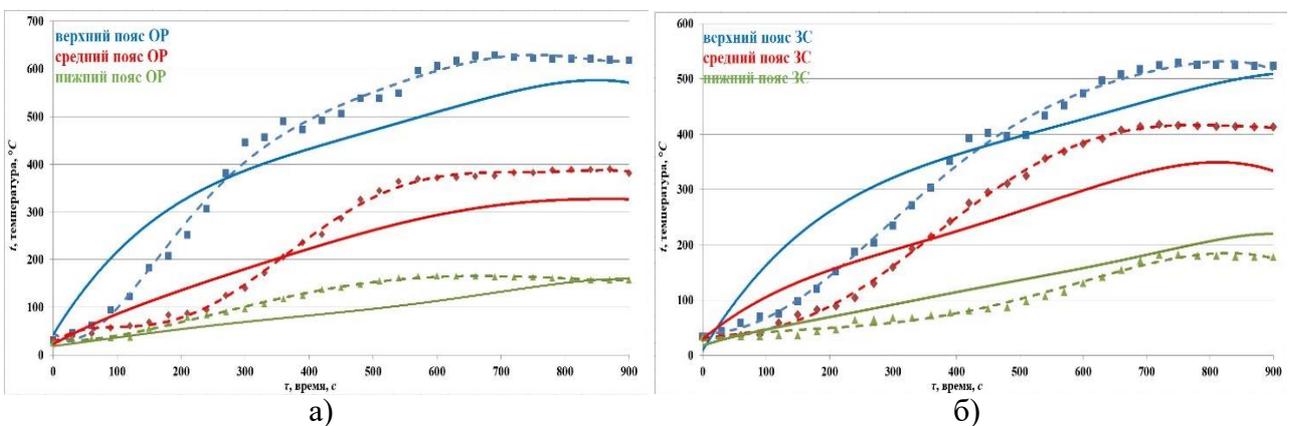


Рисунок 7 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры ОР (а) и ЗС (б) на разных уровнях в зависимости от времени при $u = 3$ м/с:
 - - - - - аппроксимация экспериментальных данных; ———— расчетные данные

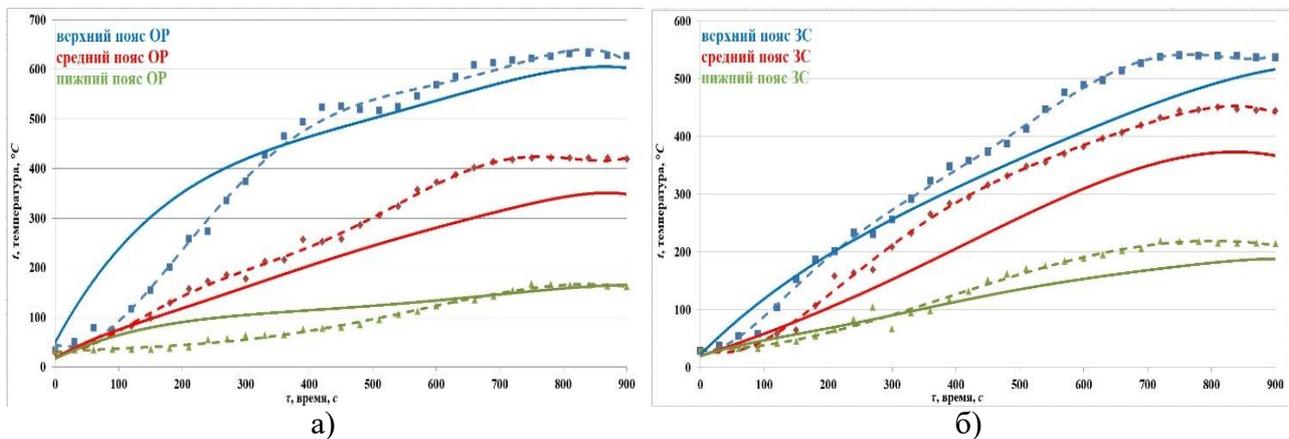


Рисунок 8 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры ОР (а) и ЗС (б) на разных уровнях в зависимости от времени при $u = 5$ м/с:
 - - - - - аппроксимация экспериментальных данных; ———— – расчетные данные

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

Среднее значение коэффициента корреляции R^2 составляет порядка 0,98, что показывает тесную связь между экспериментальными данными. Из них видно, что процесс нагрева выходит на стационарный режим начиная с десятой минуты процесса горения.

Установлено, что определённую роль может оказывать скорость ветра. При шторме 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. В эксперименте при скорости ветра равной 5 м/с установлено, что на этапе преобладания максимального значения скорости ветра выравнивается и скорость нагрева корпуса основного резервуара и защитной стенки с приобретением равномерного характера нагрева. Вместе с этим сам ветер при такой скорости способен отводить значительную часть тепла и снижать температуру защитной стенки.

Необходимо отметить, что при проведении огневых испытаний даже в условиях максимальной экспериментальной скорости ветра равной 5 м/с образующиеся переливы пламени через борт ОР не имеют прямого контакта с верхним краем ЗС. То есть ЗС в условиях пожара ОР при скорости ветра 0–5 м/с не омывается пламенем пожара, происходящего в границах основного резервуара. Однако расстояние между открытым пламенем H , м и защитной стенкой при скорости ветра 3 м/с составляло 0,6 м, а при скорости 5 м/с $H = 0,3$ м, что приводило к увеличению интенсивности теплового излучения за счёт снижения расстояния от пламени до облучаемого объекта.

Необходимо отметить, что темп нагрева ЗС по её высоте отличается от темпа нагрева корпуса ОР. Нагрев нижней части этих конструктивных элементов проходит следующим образом: в первые минуты рост температуры нижней части корпуса ОР протекает с опережением темпа нагрева этой же части ЗС. 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, темп нагрева ОР замедляется, а темп нагрева ЗС происходит в опережающем режиме.

Температурные показатели указанного участка начинают превышать такие же показатели нижнего пояса корпуса основного резервуара. В таблице 2 представлены длины пламени, полученные при проведении огневых испытаний.

Таблица 2 – Длины 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	4,5	2,7	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 горючей жидкости.

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. Максимальное значение теплового излучения, равного 37 кВт/м^2 , получено при удалённости от защитной стенки на расстоянии 0,5 м на уровне ее верхнего пояса, что свидетельствует о том, что верхний борт ЗС испытывает значительные тепловые нагрузки, способные привести к её напряжённо-деформированному состоянию (НДС).

В четвертой главе «Практическое применение результатов исследования» представлены результаты апробации применения разработанной математической модели по определению нестационарных температурных полей ЗС резервуара типа «стакан в стакане» для прогнозирования её устойчивости при пожаре в ОР.

Для прогнозирования устойчивого состояния ЗС при пожаре необходимо определить возникающие в ней температурные поля с соответствующим им НДС, для чего в 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. В связи с этим в уравнение теплового баланса добавляется учёт количества теплоты от теплового расширения материала стенок при нагреве, Q_{ted} , $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}$, представленное в следующем виде (15):

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted}, \quad (15)$$

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 корпусах резервуара представлено в

следующем виде с учётом тензора напряжений Пиолы – Кирхгофа, S , Па (16):

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot S + F_v, \quad (16)$$

где u – вектор смещений, м;

F_v – объёмные силы, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-3}$, тензор напряжений Пиолы – Кирхгофа, S (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 9–11.

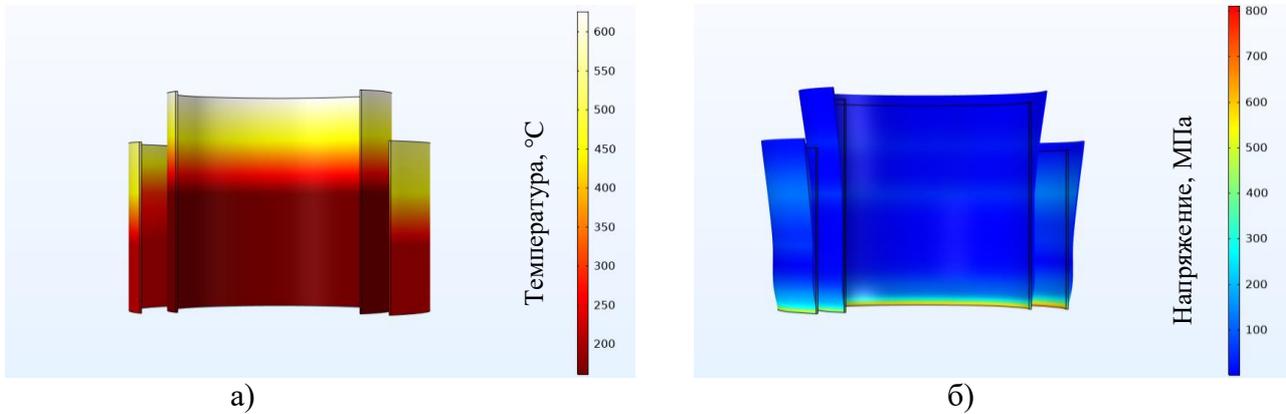


Рисунок 9 – Распределение температурных полей (а) и НДС (б) на корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м^3 при скорости ветра 0 м/с

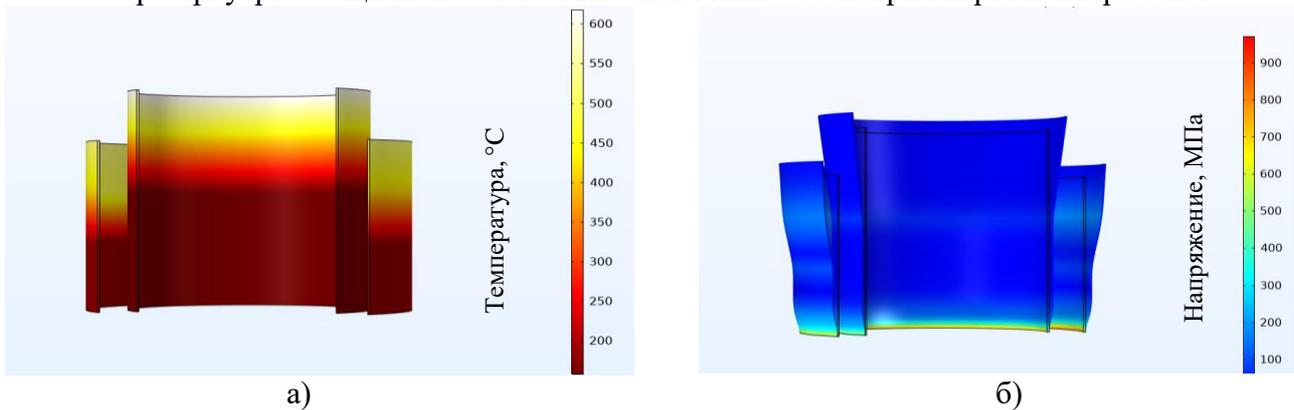


Рисунок 10 – Распределение температурных полей (а) и НДС (б) на корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м^3 при скорости ветра 3 м/с

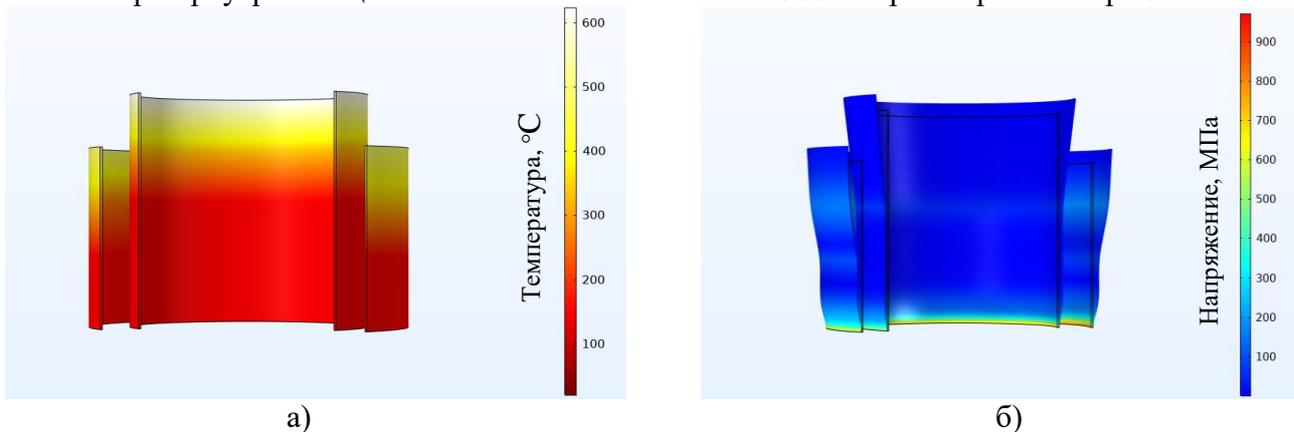


Рисунок 11 – Распределение температурных полей (а) и НДС (б) на корпусах натурального резервуара с защитной стенкой вместимостью 700 м^3 при скорости ветра 5 м/с

Объектом апробации является резервуар с наиболее распространённой в практике эксплуатации номинальной вместимостью 5000 м^3 с соответствующими геометрическими параметрами: высота ОР – 12 м и ЗС – $9,6 \text{ м}$; диаметр ОР – $22,80$

м и ЗС – 24,6 м; расстояние между корпусами – 1,8 м; материал корпусов ОР и ЗС – сталь марки 09Г2С. Необходимо отметить, что тепловой режим пожара определяется количеством тепловыделения, от чего зависит мощность излучения пламени, влияющей 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 при проведении численного расчёта для указанного натурального резервуара использовано значение теплового потока, равное 80 кВт/м^2 , приведенное в экспериментальных работах других исследователей.

Время нагрева в математическом моделировании 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 типа «стакан в стакане»: нижний пояс ОР ($ОР_{НП}$) 0–4 м; средний пояс ОР ($ОР_{СП}$) 4–8 м; верхний пояс ОР ($ОР_{ВП}$) 8–12 м; нижний пояс ЗС ($ЗС_{НП}$) 0–3,2 м; средний пояс ЗС ($ЗС_{СП}$) 3,2–6,4; верхний пояс ЗС ($ЗС_{ВП}$) 6,4–9,6 м. Результаты математического моделирования температурных полей и НДС представлены на рисунке 12.

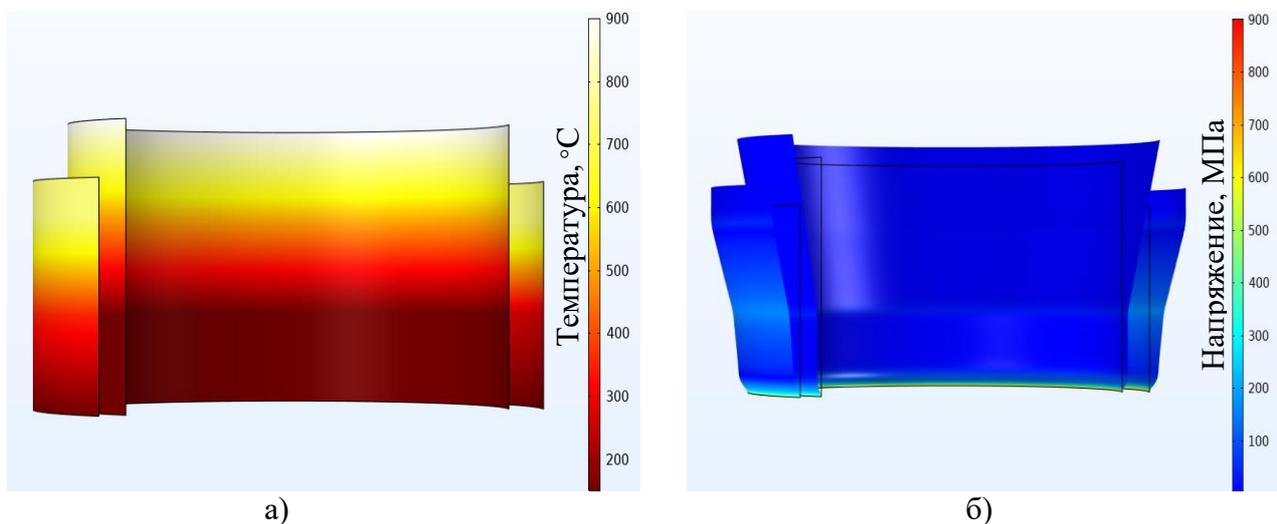


Рисунок 12 – Результаты визуализации температурных полей (а) и деформации (б) корпусов резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре в ОР вместимостью 5000 м^3

Из рисунка 12 (а) видно, что средний и верхний пояса корпусов резервуара подвержены нагреву, превышающему критическое значение для стали. Рабочее напряжение в корпусах резервуара находится в диапазоне $\sigma_p = 50\text{--}150 \text{ МПа}$, что значительно превышает нормативное напряжение $\sigma_n = 53 \text{ МПа}$. Деформация и распределение напряжений корпусов резервуара от действия пожара показаны на рисунке 12 (б) 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 типа «стакан в стакане» представлены на рисунках 13–14 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.

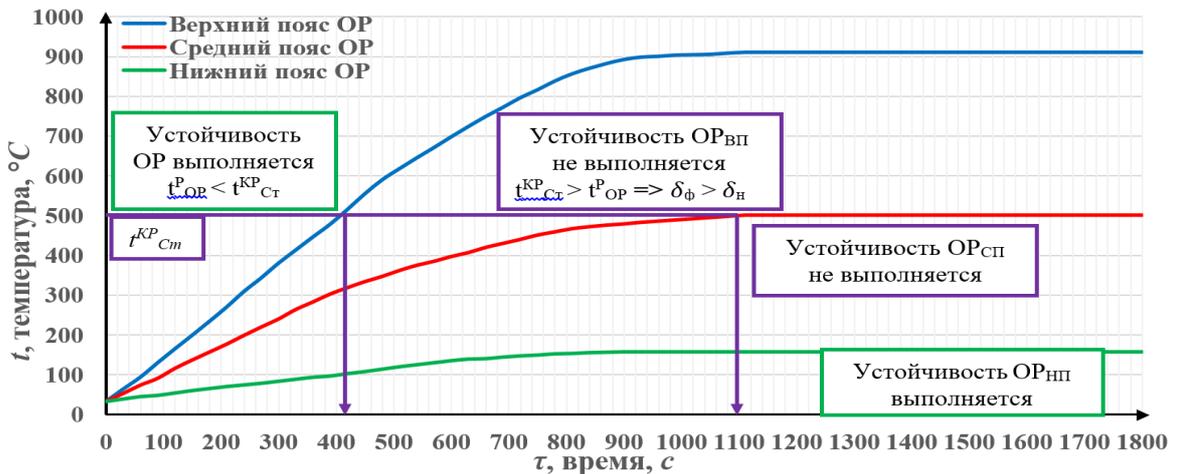


Рисунок 13 – Графическое представление результатов прогноза устойчивости ОР резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре в нём

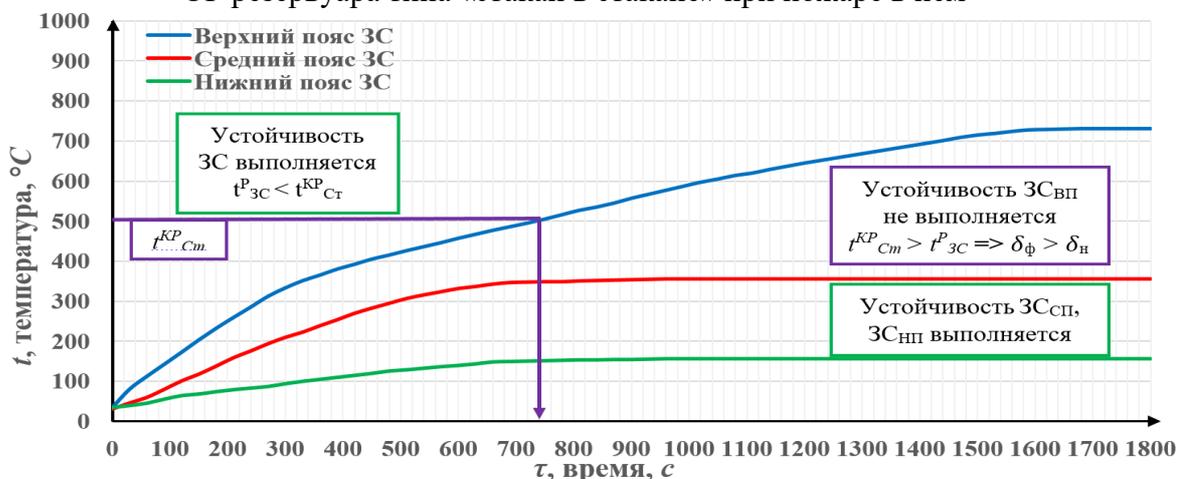


Рисунок 14 – Графическое представление результатов прогноза устойчивости ЗС резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре в ОР

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

Заключение содержит констатацию основных научных и практических результатов работы. **В приложении** представлены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 м^3 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 $500 \text{ }^\circ\text{C}$, 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/м^2 , 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 напряженно-деформированное состояние для резервуара типа «стакан в стакане». В качестве тестируемого использован резервуар типа «стакан в стакане» номинальной вместимостью 5000 м^3 .

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.

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

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

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

3. Егоров, А.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, В.В. Рубцов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация: научный журнал. – 2019. – № 1. – С. 25–30. – DOI 10.25257/FE.2019.1.25-31.

4. Егоров, А.Н. Термография в экспериментальных исследованиях нагрева защитной стенки модельного резервуара типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 2(84). – С. 54–62. – DOI 10.25257/TTS.2019.2.84.54-62.

5. Егоров, А.Н. Экспериментальная оценка температурного режима модельного резервуара с защитной стенкой типа «стакан в стакане» в условиях пожара [Электронный ресурс] / Д.Н. Рубцов // Технологии техносферной безопасности. – 2020. – № 4(90). – С. 32–48. – DOI: 10.25257/TTS.2020.4.90.32-48.

6. 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. – DOI: 10.25257/TTS.2024.2.104.165-176.

Остальные публикации по теме научно-квалификационной работы:

7. Егоров, А.Н. Причины возникновения пожароопасных аварийных ситуаций на резервуарах с плавающей крышей [Текст] / Д.Н. Рубцов // Материалы V международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 152–157.

8. Егоров, А.Н. Оценка состояния защитной стенки нефтяного резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре [Текст] / Д.Н. Рубцов // Материалы 25-й

международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2016». М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 325–327.

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

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

11. Егоров, А.Н. Проблема устойчивости защитной стенки нефтяного резервуара типа «стакан в стакане» при пожаре [Текст] / Д.Н. Рубцов // Материалы XII международной научно-практической конференции курсантов, студентов и слушателей «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы». Мн.: Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, 2018. – С. 40.

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

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

14. Егоров, А.Н. Анализ нормативных требований к устойчивости защитной стенки резервуаров типа «стакан в стакане» при пожаре [Текст] / Д.Н. Рубцов // Материалы 32-й международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2023». М.: Академия ГПС МЧС России, 2023. – С. 249–254.

Подписано в печать 01.10.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 650.

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