

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

**Академия Государственной противопожарной службы**

*На правах рукописи*



**Халиков Ринат Валерьевич**

**ОБЪЕМНОЕ ПОЖАРОТУШЕНИЕ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ  
ТЕМПЕРАТУРНО-АКТИВИРОВАННОЙ ВОДОЙ  
С ВОДОРАСТВОРИМЫМИ ИНГИБИТОРАМИ**

Специальность: 2.10.1. – Пожарная безопасность  
(технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, профессор  
Роевко Владимир Васильевич

Москва – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ПОЖАРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ.....	10
1.1 Анализ обстановки с пожарами на объектах газокompрессорных станций.....	10
1.1.1 Общая характеристика газокompрессорных станций .....	10
1.1.2 Анализ пожаров на газокompрессорной станции и причин их возникновения .....	12
1.2 Анализ состояния систем обеспечения пожаровзрывобезопасности замкнутых пространств объектов на газокompрессорных станциях .....	16
1.2.1 Характеристика опасных веществ.....	16
1.2.2 Огнетушащие вещества, применяемые для тушения пожаров в замкнутых объемах газокompрессорных станций .....	17
1.3 Анализ типовых сценариев аварий с участием горючих веществ в замкнутых объемах газокompрессорных станций .....	20
Выводы по первой главе.....	25
ГЛАВА 2 ВЫБОР МЕТОДА И РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОБЪЕМНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ ТЕМПЕРАТУРНО- АКТИВИРОВАННОЙ ВОДОЙ С ИНГИБИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ .....	27
2.1 Обоснование метода ингибирования горения и механизмов, влияющих на кинетику химической реакции.....	28
2.1.1 Разработка вероятностной модели разветвленно-цепного процесса горения предельных углеводородов .....	28
2.1.2 Выбор эффективных параметров подачи струй температурно- активированной воды для охлаждения зоны горения.....	37
2.2 Экспериментальное определение минимальной гасящей концентрации ингибирующей соли в высокодисперсных водных растворах .....	46
2.3 Выбор способа и устройства дозирования химических ингибиторов горения для создания температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами .....	58

Выводы по второй главе .....	62
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ОБЪЕМНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-АКТИВИРОВАННОЙ ВОДОЙ С ИНГИБИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ .....	63
3.1 Экспериментальное исследование эффективных параметров дозирования ингибиторов в недогретую воду .....	63
3.2 Экспериментальное исследование электропроводимости струй температурно- активированной воды при дозировании ингибирующих солей .....	72
3.3 Перспективы применения температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами для тушения замкнутых объемов газокомпрессорных станций .....	75
3.3.1 Экспериментальное исследование эффективности применения температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами при тушении замкнутых объемов.....	75
3.3.2 Экономическая эффективность применения температурно- активированной воды с ингибирующими свойствами при тушении замкнутых объемов газокомпрессорных станций.....	79
Выводы по третьей главе.....	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	86
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	87
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗВЕТВЛЕННО-ЦЕПНОГО ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-АКТИВИРОВАННОЙ ВОДЫ С ИНГИБИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ .....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	131

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В соответствии с Указом Президента Российской Федерации «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года» одним из ключевых моментов является повышение эффективности функционирования системы обеспечения пожарной безопасности на объектах нефтегазовой отрасли.

Особое место среди объектов нефтегазовой отрасли занимают газокompрессорные станции. Пожары на данных объектах создают прямые и косвенные угрозы не только для промышленной безопасности и экономики, но и для устойчивого функционирования социальной инфраструктуры. Так, например, в результате пожара на Курской газокompрессорной станции город Железногорск с населением более 100 тысяч человек более суток находился без газоснабжения, и вследствие пожара было остановлено производство на Михайловском горно-обогатительном комбинате.

Согласно статистике, в период с 2002 по 2022 гг. [1–9] на газокompрессорных станциях ежегодно происходит до 22 пожаров. Более 70 % из них происходит в замкнутых пространствах.

В объеме помещений газокompрессорных станций одним из наиболее опасных элементов является технологическая обвязка газоперекачивающих агрегатов (ГПА). В технологической обвязке ГПА наибольшую пожарную опасность представляют трубопроводы, перекачивающие турбинные и судовые масла, на долю пожаров с их участием приходится до 75 % всех пожаров, происходящих в замкнутых пространствах газокompрессорных станций.

Анализ эффективности объемного тушения пожаров газокompрессорных станций имеющимися технологиями пожаротушения составляет не более 57 % по основным показателям для объемных средств пожаротушения.

Таким образом, актуальными являются исследования, позволяющие повысить эффективность работы подразделений пожарной охраны при тушении пожаров в замкнутых объемах газокompрессорных станций.

**Степень разработанности темы исследования.** Научными исследованиями в области пожаротушения объектов газокompрессорных станций занимались как отечественные ученые (И.М. Абдурагимов, С.Ю. Серебренников, С.М. Шевченко, А.Е. Дерябин, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник и др. [10–14]), так и зарубежные (U. Warzyńska, W. Kollek, K. Kutrowski, N. Gasunie, H. Liu, F. Wang и др. [4–6, 15]). Благодаря работе таких ученых, как Н.Н. Семенов, В.В. Азатян, М.Д. Безбородько, В.В. Роечко, А.В. Решетников, С.Г. Цариченко, В.Ю. Навцена, И.А. Болодьян и других [16–38] были изучены процессы химического ингибирования и их применение для объемного пожаротушения, свойства температурно-активированной и тонкораспыленной воды.

Однако, не смотря на значительные достижения в данных областях, отсутствуют теоретически и экспериментально обоснованные механизмы применения температурно-активированной воды при дозировании в нее водорастворимых ингибирующих солей для тушения пожаров газокompрессорных станций.

Таким образом, **целью работы** является исследование объемного тушения пожаров газокompрессорных станций температурно-активированной водой при дозировании в нее водорастворимых ингибирующих солей.

**Объект исследования** – процесс объемного тушения пожара газокompрессорных станций высокодисперсными водными системами.

**Предмет исследования** – процесс подавления газофазного горения температурно-активированной водой при дозировании в нее водорастворимых ингибирующих солей.

Для реализации поставленной цели в работе были решены следующие **задачи:**

– анализ основных средств объемного пожаротушения для защиты замкнутых объемов газокompрессорных станций;

– обоснование выбора способа ингибирования на основе разработки вероятностной модели разветвленно-цепного процесса горения предельных углеводородов в замкнутом объеме газокompрессорных станций;

– экспериментальное исследование эффективных концентраций ингибирующей соли в температурно-активированной воде для объемного пожаротушения;

– экспериментальное исследование электропроводимости струй температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами;

– экспериментальное исследование объемного пожаротушения замкнутых объемов струй температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Установлена зависимость возникновения разветвленно-цепного процесса горения для радикалов в зависимости от углеводорода.

2. Разработана модель испарения водных полидисперсных капельных фазы.

3. Получена зависимость массовой концентрации гексацианоферрата калия (II) от температуры среды температурно-активированной воды.

**Теоретическая и практическая значимость** результатов диссертационного исследования заключается:

– разработана вероятностная модель горения предельных углеводородов для определения наиболее эффективного водорастворимого ингибитора;

– в теоретическом обосновании распределения диаметров капель структуры температурно-активированной воды для доставки ингибирующих солей в зону горения;

– в разработке конструкции устройства для создания ингибирующих свойств в температурно-активированной воде для объемного тушения пожаров газокompрессорных станций;

– в обосновании электробезопасности струй температурно-активированной воды при дозировании в нее водорастворимых ингибирующих солей.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач были использованы методы математической статистики и анализа, теория разветвленно-цепных процессов горения, теория конвективного теплообмена, теория химической термодинамики, физический эксперимент.

**Положения, выносимые на защиту:**

- сценарный подход к анализу пожаров газокomppressorных станций;
- способ ингибирования газофазного горения и техническое устройство для его реализации;
- результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований эффективных массовых концентраций ингибирующих составов в температурно-активированной воде для объемного пожаротушения.

**Степень достоверности.** Достоверность результатов исследования достигалась:

- проведением экспериментальных исследований с использованием сертифицированного, поверенного оборудования, достаточной точностью средств измерения;
- использованием обоснованных физическо-математических моделей для установления способа ингибирования газофазного горения;
- удовлетворительной сходимостью экспериментальных и теоретических результатов.

**Практическая значимость исследования подтверждена использованием результатов при:**

- разработке рабочей конструкторской документации и изготовлении устройства дозирования: агрегата электронасосного дозирующего одноплунжерного для модернизации конструкции модельного ряда многоцелевых пожарно-спасательных автомобилей с установкой пожаротушения температурно-активированной водой на заводе по производству насосных агрегатов ООО «Норнат»;
- модернизации конструкции модельного ряда многоцелевых пожарно-спасательных автомобилей с установкой пожаротушения температурно-

активированной водой устройствами дозирования химических компонентов, с целью повышения ингибирующей способности струй температурно-активированной воды на ООО «Мытищинский приборостроительный завод»;

– подготовке фондовой лекции по дисциплине «Пожарная и аварийно-спасательная техника» на тему «Многофункциональная пожарная и аварийно-спасательная техника» для учебного процесса Академии ГПС МЧС России.

**Апробация работы.** Результаты исследования были доложены на 8 международных и 2 всероссийских конференциях:

– 3-я Международная научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы дальнейшего развития системы гражданской обороны Донецкой Народной Республики» (г. Донецк, Академия гражданской защиты МЧС ДНР, 2019);

– 28-я Международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2019» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019);

– 14-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (г. Минск, УГЗ МЧС Беларуси, 2020);

– 27-я Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2020» (г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020);

– 4-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности» (г. Москва, РХТУ им Д.И. Менделеева, 2020);

– Всероссийский круглый стол «Актуальные вопросы пожаротушения» (г. Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2020);

– 1-я Международная научная конференция «Роль противопожарных служб в решении нетрадиционных угроз безопасности» (Вьетнам, Институт пожарной безопасности МОБ СРВ, 2020);



– Международная научно-практическая конференция «Школа молодых ученых и специалистов МЧС России» (г. Санкт-Петербург, СПбУ ГПС МЧС России, 2020);

– 32-я научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (г. Москва, ВНИИПО МЧС России, 2020);

– 17-я Международная научно-практическая конференция «Пожарная и аварийная безопасность» (г. Иваново, ИПСА МЧС России, 2022).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 19 научных работ, из них 8 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Личное участие соискателя в получении результатов заключается в разработке вероятностной модели горения предельных углеводородов и обосновании распределения диаметров капель структуры температурно-активированной воды для доставки ингибирующих солей в зону горения, получении зависимости массовой концентрации гексацианоферрата калия (II) от температуры среды температурно-активированной воды.

**Структура, объем работы.** Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 134 страницах текста, включает в себя 8 таблиц, 51 рисунок, список литературы из 131 наименования, 3 приложения.

# ГЛАВА 1 ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ПОЖАРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

## 1.1 Анализ обстановки с пожарами на объектах газокompрессорных станций

### 1.1.1 Общая характеристика газокompрессорных станций

Газокompрессорная станция – это сложный комплекс взаимосвязанного технологического оборудования, предназначенного для бесперебойной поставки природного газа с заданными параметрами от места его добычи до потребителей в соответствии с утвержденным планом (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Общий вид типовой газокompрессорной станции:

1 – блоки пылеуловителей; 2 – машинный зал и галерея нагнетателей; 3 – агрегаты воздушного охлаждения газа; 4 – участки перехода газа в магистральный газопровод

Общая протяженность системы газопроводов Российской Федерации составляет более 190 тыс. км, для осуществления бесперебойной транспортировки используют более 260 газокompрессорных станции (ГКС) с суммарной мощностью газоперекачивающих агрегатов более 50 тыс. МВт.

Электроснабжение ГКС осуществляется по I (особой) категории электроснабжения.

По данным Росстата, ГКС входят в 1 группу социально-стратегического назначения, это обуславливает значимость повышения системы пожарной безопасности данных объектов. Система пожарной безопасности неразрывно связана с особенностями технологических процессов, которые являются одинаковыми для всех ГКС [39–41]. Поэтому рассмотрение типового проекта ГКС позволит понять их общую схему технологических процессов на данных объектах.

Общая схема технологических процессов ГКС начинается с момента поступления природного газа в систему отчистки. После чего отчищенный газ направляется к компрессорному оборудованию, функционирование которого обеспечивается работой энергетических объектов (рисунок 1.2).

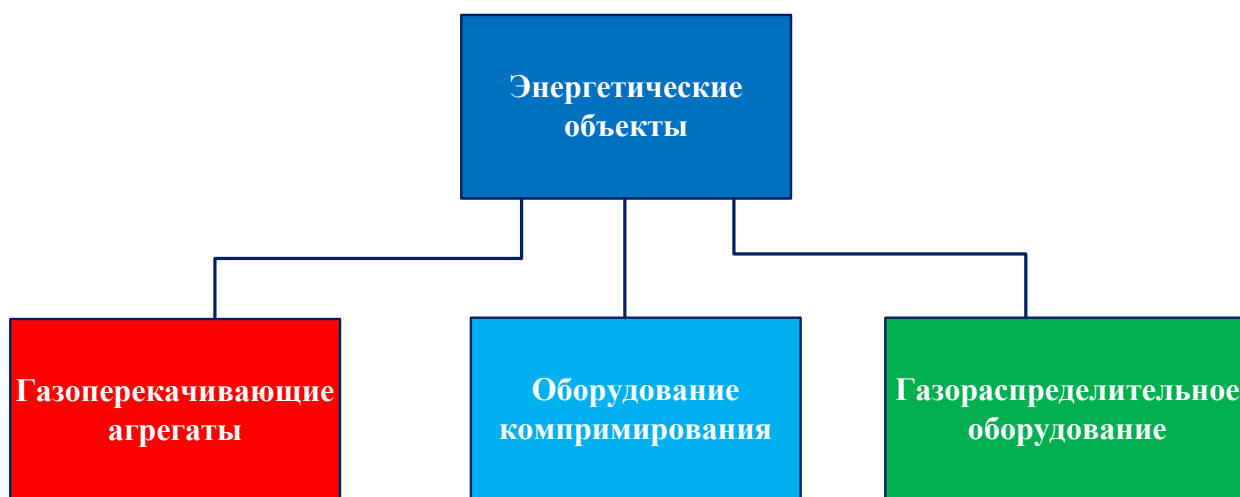


Рисунок 1.2 – Блок-схема функционирования компрессорного оборудования

После процесса отчистки газ, предназначенный для компримирования, поступает в компрессорные станции, где проходит через ГПА, для доведения характеристик газа до заданных параметров. Нагретый после компримирования газ отправляется в аппараты охлаждения по нагнетательным шлейфам, после чего поступает в магистральный газопровод. Следует отметить, что энергетические объекты связаны с компрессорным оборудованием не только токоведущими частями, но и единой системой маслоснабжения (рисунок 1.3).

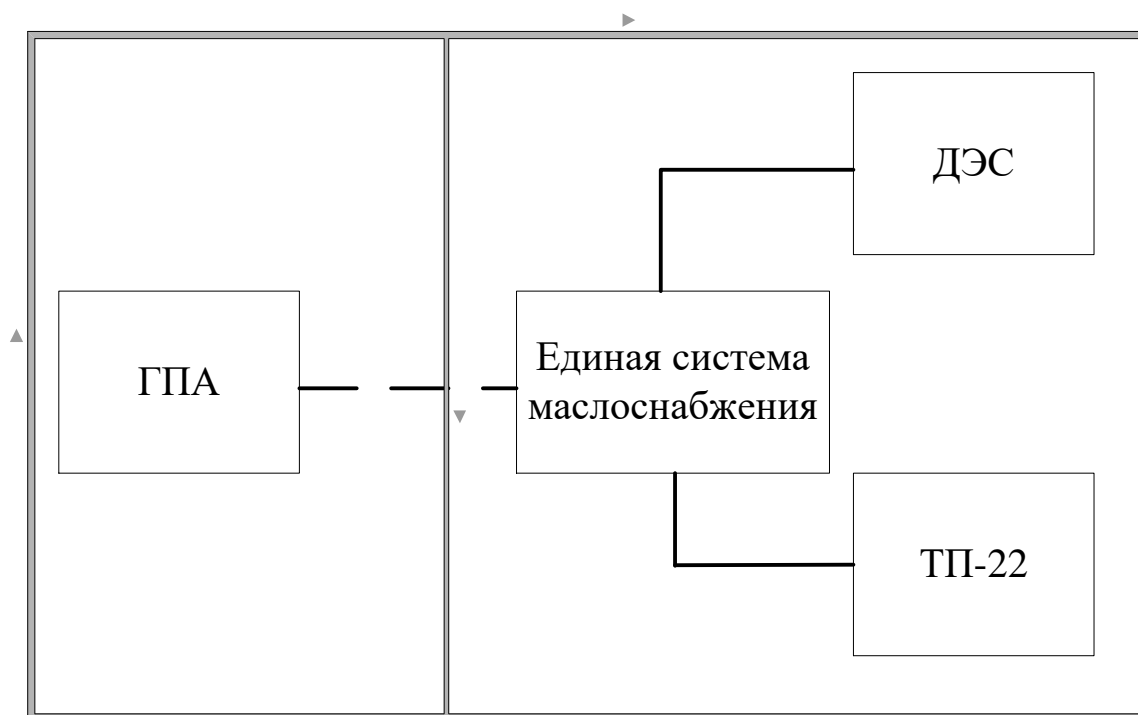


Рисунок 1.3 – Блок-схема функционирования компрессорного оборудования машинного зала:  
 ГПА – газоперекачивающий агрегат, установленный в смежном помещении; ДЭС – дизельная электростанция; ТП-22 – типовой трансформатор

Поэтому при пожарах в замкнутых объемах ГКС пламя по системе маслообеспечения и по токоведущим частям способно менее чем за 15 с распространяется в машинном зале [2, 3, 39–42]. Эти факторы обуславливают быстрое развитие пожара в замкнутом объеме ГКС и создают условия, при которых реализация поверхностного тушения практически невозможна.

### **1.1.2 Анализ пожаров на газокompрессорной станции и причин их возникновения**

Проведенным анализом пожаров установлено, что на ГКС Российской Федерации в период 2014–2019 гг. ежегодно происходило от 14 до 22 пожаров, при этом в 81 % случаев причинами стали технологические нарушения в работе ГПА машинных залов [2, 3, 10, 12, 42, 43].

Проведенный анализ [39, 44, 45] более чем 290 пожаров на объектах нефтегазового комплекса показал, что в период с 2014 по 2019 гг. среднее количество пожаров на ГКС было значительно выше, чем на других объектах нефтегазовой отрасли.

Рассмотрим рост числа пожаров на ГКС в период с 2014 по 2019 гг. (рисунок 1.4). Данная зависимость имеет линейно-дискретный характер, поэтому для анализа данных используется коэффициент корреляции Пирсона с расчетом доверительного интервала [46].

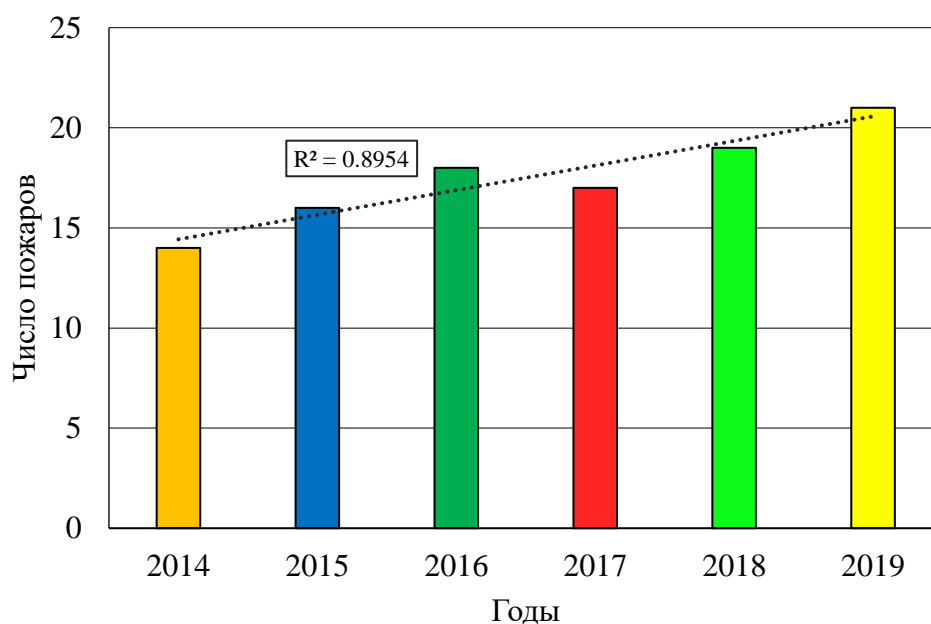


Рисунок 1.4 – Гистограмма количества пожаров на газокompрессорной станции в 2014–2019 гг.

Установлено, что коэффициент корреляции Пирсона для количества пожаров ГКС за 2014–2019 гг. равен 0,9, что соответствует восходящему направлению и подтверждает необходимость совершенствования системы обеспечения пожарной безопасности данных объектов, в том числе повышение эффективности тушения пожаров.

На основе алгоритма Диксона был сделан прогноз обстановки с пожарами при условии сохранения прежних показателей системы обеспечения пожарной безопасности на ГКС (надежность срабатывания систем предотвращения пожаров и противопожарной защиты, эффективность их работы, эффективность тушения

пожаров подразделениями пожарной охраны, временные показатели тушения пожаров) до 2023 г. (рисунок 1.5).

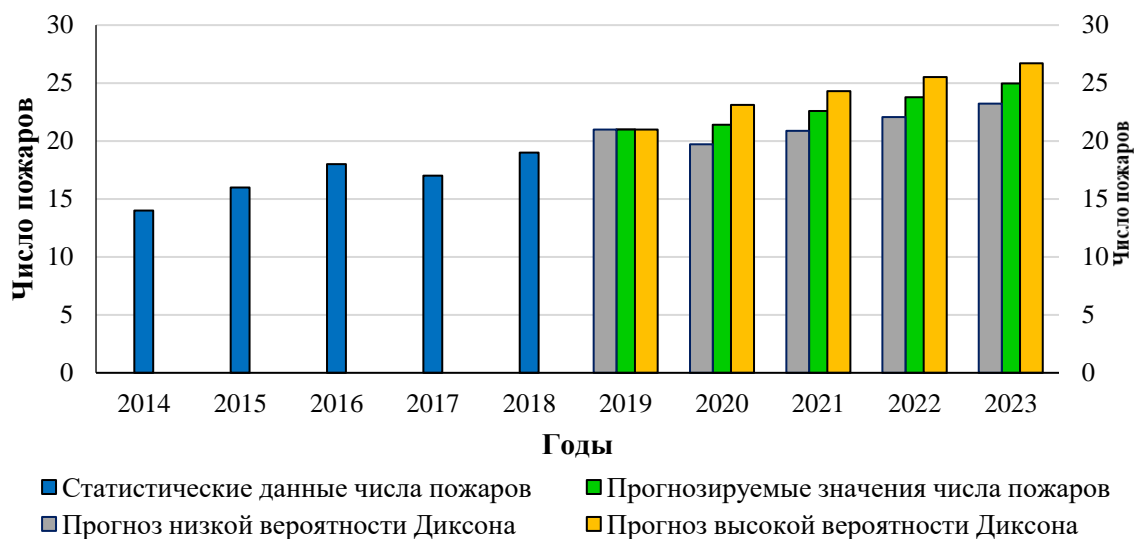


Рисунок 1.5 – График прогноза числа пожаров ГКС на основе алгоритма Диксона

При сохранении существующих показателей значение роста числа пожаров на ГКС может достигнуть более чем 25 случаев в год, что на 60 % выше показателей 2014 г., что подтверждает необходимость совершенствования существующих подходов в части тушения пожаров.

Низкая эффективность тушения пожаров на объектах ГКС может быть рассмотрена в проекции времени тушения пожаров на данных объектах (рисунок 1.6).

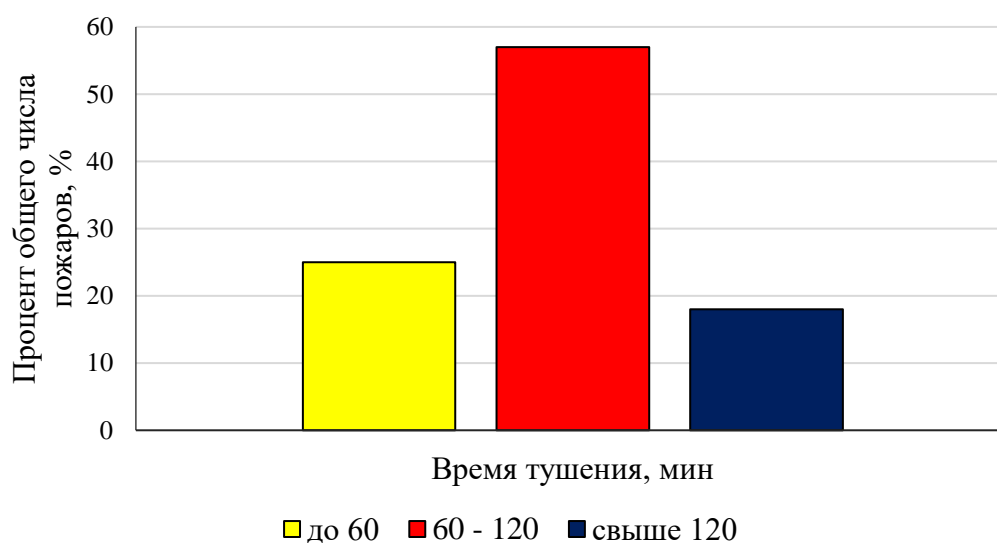


Рисунок 1.6 – Гистограмма интервалов времени тушения пожаров замкнутых объемов ГКС в 2014–2019 гг. (в %)

В более чем 75 % случаев время тушения превысило 60 мин при этом, согласно имеющимся данным [2, 3, 10, 12, 42, 43], время прибытия в 95 % было менее 10 мин.

Проанализируем пожары ГКС с 2014 по 2019 гг., время тушения которых превысило 120 мин (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Диаграмма распределения пожаров ГКС (в %) с временем тушения более 120 мин в 2014–2019 гг.

Установлено (рисунок 1.7, [39]), что более чем в 87 % случаев пожары, время тушения которых превышало 120 мин, происходили в замкнутых объемах. Далее анализируем вещества, участвующие в пожарах замкнутых объемах ГКС, время тушения которых превысило 120 мин (рисунок 1.8).

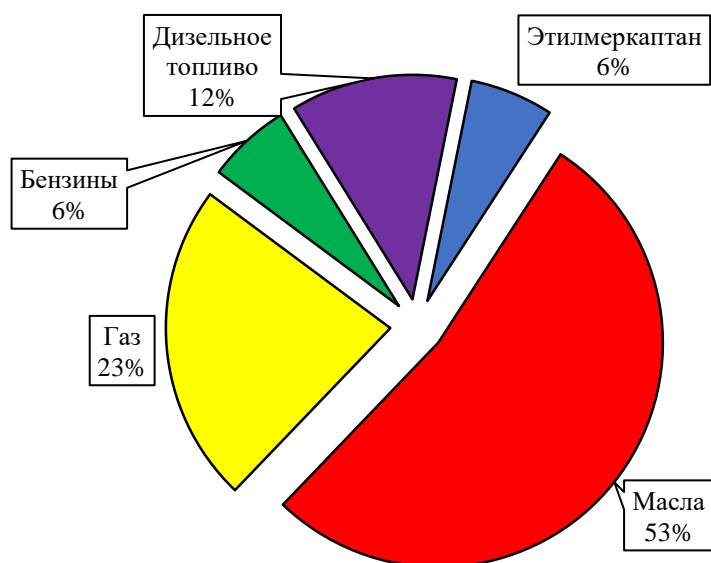


Рисунок 1.8 – Диаграмма веществ, участвующих в пожарах замкнутых объемах ГКС в 2014–2019 гг.

Определено, что наибольшую потенциальную опасность участия в затяжных пожарах замкнутых объемов ГКС представляют масла и природный газ (см. рисунок 1.8), однако это не отражает возможной динамики развития подобных ситуаций, поэтому необходимо рассмотреть дерево сценариев возможных пожаров на данных объектах на основе реально произошедших пожаров.

Таким образом, следует принять во внимание второй и третий факторы, снижающие эффективность тушения пожаров ГКС. На основе данных факторов и основных причин пожаров сформируем и проанализируем типовые сценарии пожаров на газокompрессорных станциях.

Анализ причин возникновения пожаров и аварий позволяет сделать предположение, что наиболее опасными являются участки технологического процесса, где происходит сильная вибрация в совокупности с повышенным коррозионным воздействием. Для составления типовых сценариев пожаров необходимо проанализировать системы обеспечения пожаровзрывобезопасности замкнутых пространств ГКС.

## **1.2 Анализ состояния систем обеспечения пожаровзрывобезопасности замкнутых пространств объектов на газокompрессорных станциях**

### **1.2.1 Характеристика опасных веществ**

Система обеспечения пожаровзрывобезопасности замкнутых пространств объектов ГКС – это комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на предотвращение и ликвидацию аварий в замкнутых объемах ГКС [3].

Анализ типовых сценариев аварий с участием горючих веществ, проведенный в пункте 1.1.2, показал необходимость совершенствования



мобильных средств объемного пожаротушения, так они используются в более чем 97 % случаев, но эффективность их применения составляет не более 57 %.

Для того чтобы выбрать наиболее эффективное огнетушащее средство, необходимо проанализировать особенности горения и тушения, обращающихся в объеме ГКС веществ, затем, провести сравнительный анализ имеющихся огнетушащих агентов.

Рассмотрим особенности горения веществ, обращающихся в объеме помещений ГКС. В соответствии с пунктами 1.1.1 и 1.1.2 было установлено, что более чем в 75 % случаев в замкнутых пространствах ГКС горят масла единой системы маслоснабжения. Турбинные, судовые и трансформаторные масла имеют сходные характеристики по пожаровзрывоопасности, поэтому рассмотрим их характеристики в совокупности [47–53]. Таким образом, основную горючую нагрузку в замкнутых пространствах ГКС представляют углеводородные соединения. Согласно пункту 1.1.2, наибольшую опасность представляют пожары с участием масел, так как данные пожары имеют наиболее разветвленный характер, а их тушение не сводится только к подавлению горения, но и к созданию взрывобезопасности в замкнутом объеме ГКС. Проведем сравнительный анализ огнетушащих составов, используемых в замкнутых объемах ГКС.

### **1.2.2 Огнетушащие вещества, применяемые для тушения пожаров в замкнутых объемах газокompрессорных станций**

К основным огнетушащим веществам объемного пожаротушения относятся газовые, водяные, пенные, порошковые и комбинированные, доля использования пенного, газового и водяного тушения на территории ГКС составляет более 90 % [3, 10, 13, 14, 41, 54, 55]. Проведем сравнительный анализ каждого по основным показателям объемного пожаротушения (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Сравнительная таблица возможности объемного пожаротушения различными огнетушащими веществами

Группа огнетушащих веществ	Огнетушащее вещество	Реализуемые способы прекращения горения	Нормативное время тушения, мин	Нормативная интенсивность, л(кг)/м <sup>2</sup> с	Максимальный расход одного прибора подачи, л (кг, м <sup>3</sup> )/ с	Максимальная скорость подачи, м <sup>3</sup> /с	Объем (площадь) заполняемый (орошаемый) одним прибором подачи, (м <sup>3</sup> , м <sup>2</sup> )	Защищаемый объем, м <sup>3</sup>	Допустимая негерметичность помещения пожара, при которой осуществляется тушение	Продвижение огнетушащего вещества по прямой от прибора подачи / влияние планировки помещения на продвижение	Заполнение объема выше прибора подачи огнетушащего вещества (возможно ли и на какую высоту)	Особенности применения	
												Факторы, ограничивающие применение в стационарном и мобильном исполнении	Факторы, способствующие применению в стационарном и мобильном исполнении
Пенная	Пена средней кратности	Охлаждение, изоляция [1]	15 [56]	0,08 [57]	6 [46, 57]	0,6 [46]	180/120 [46, 57]	90 [46]	Не влияет [57]	До 25 м / частично препятствует	2-3 м, [3]	Не универсальность, преимущественно поверхностное тушение, порча имущества, подверженного смачиванию или коррозии	Компактность, распространенность на мобильных средствах
	Пена высокой кратности	Изоляция [1]	10 [56]	0,04 [58, 59]	10 [56, 58]	2 [56, 59]	675 [59]	675 [59]	0,5 [58]	До 25 м / препятствует	3-4 м, [59]	Геометрические параметры помещения, техническая сложность устройства подачи и малая дальность	Один объем простой планировки
	Компрессионная пена	Изоляция, охлаждение [60]	15 [56]	0,028 [56, 60]	6 [56, 58]	0,6 [56, 60]	270/240 [59]	270 [59]	Не влияет [58]	До 5 м / препятствует	0,5-1 м, [56, 59]	Малый объем получаемой пены	Дальность подачи по рукавам и струи
Газовая	Углекислота	Разбавление [61]	15 [62]	0,004 [56]	6 [56, 58]	5 [56, 62]	5680 [61]	3789 [56, 62]	0,04 [58]	Заполнение по объему/ Не влияет	Занимают весь объем	Техническая сложность создания запаса, воздействие на людей	Дополнительное охлаждение зоны горения
	Азот	Разбавление, ингибирование [63]	15 [62]	0,004 [58]	2 [56]	5 [56, 58]	3390 [43, 63]	2264 [56, 63]	0,01 [58]	Заполнение по объему/ не влияет	Занимают весь объем	Техническая сложность создания запаса, дороговизна, воздействие на людей	Безопасность для оборудования
Водяная	Тонкораспыленная вода	Охлаждение, разбавление [62, 64]	12 [65, 66]	0,01 [58, 64]	6,5 [65]	6,5 [65, 66]	200-500 [58, 65]	200-500 [58, 65]	Не влияет	До 5 м / препятствует	Невозможно	Техническая сложность устройства подачи, малый объем, защищаемый одним прибором	Возможность локального тушения по объему
	Паротушение	Разбавление [67]	12 [58, 68]	0,008 [58, 68]	4 [68]	5 [68]	300–600 [58, 68]	500 [58, 68]	0,044 [58]	Заполнение по объему/ не влияет	Занимают весь объем	Техническая сложность подачи на удалении от устройства получения	Наличие паропроизводящей установки на защищаемом объекте
	Температурно-активированная вода (ТАВ)	Охлаждение, изоляция, Разбавление, ингибирование [58]	15 [65, 66]	0,005 [56, 68]	1 [66]	10 [69]	5000-10000 [66,69]	5000 [59, 68, 69]	0,01 [58]	Заполнение по объему/ не влияет	Занимают весь объем	Особый подход к тактике применения	Универсальность механизмов прекращения горения, дальность подачи

На основе данных таблицы 1.1 рассмотрим отдельные показатели средств объемного пожаротушения (рисунки 1.9, 1.10)

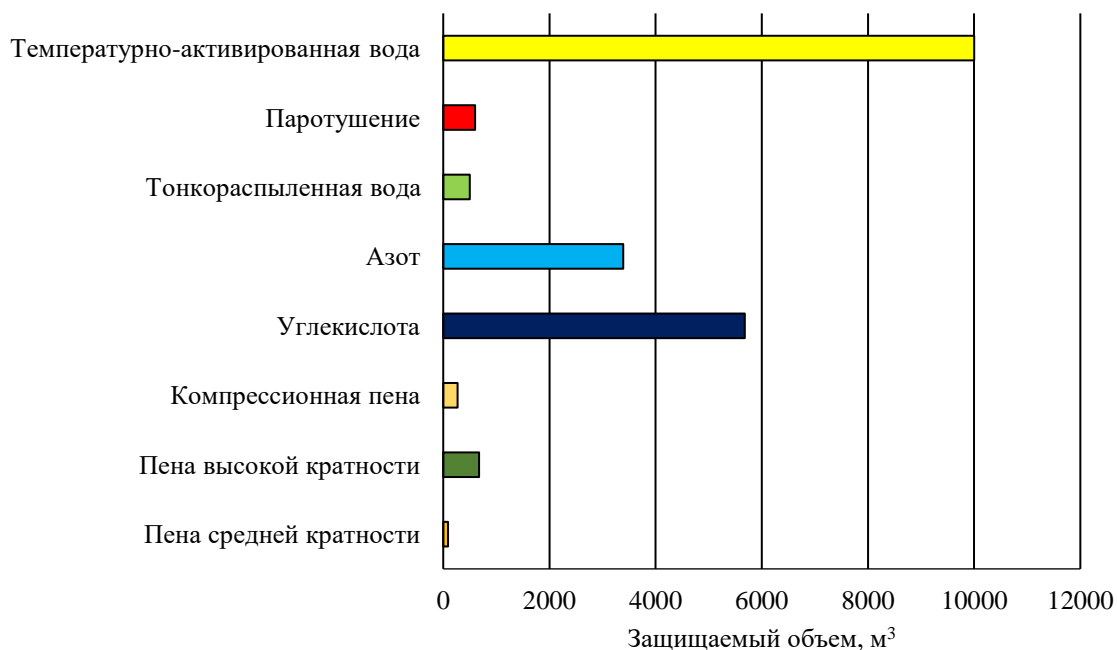


Рисунок 1.9 – Диаграмма распределения защищаемых объемов при использовании различных огнетушащих веществ, м³

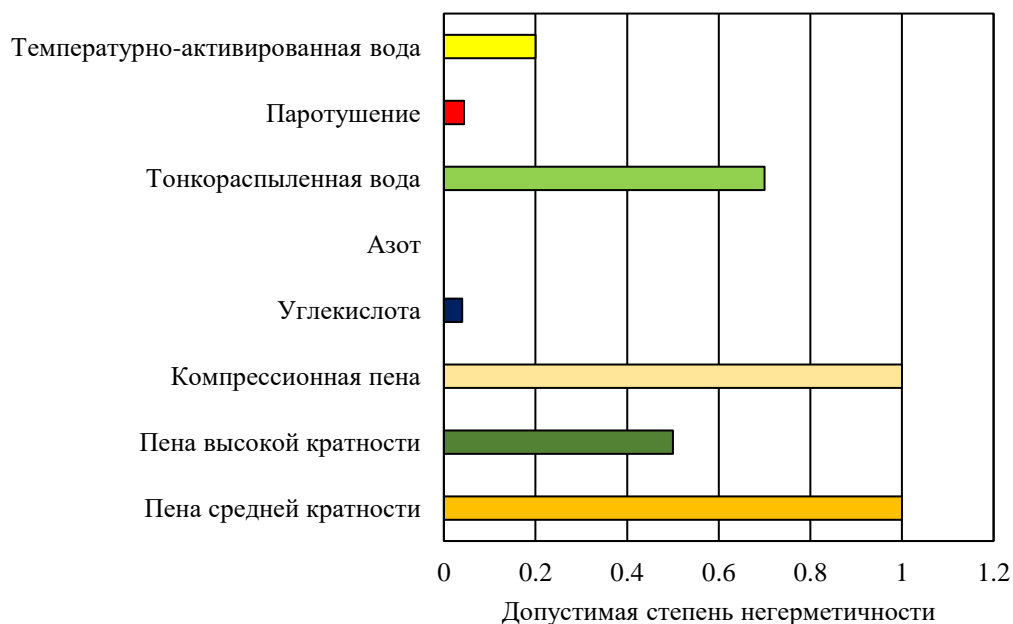


Рисунок 1.10 – Диаграмма допустимой негерметичности помещения при использовании различных огнетушащих веществ, м³

Анализ таблицы 1.1 и рисунков 1.9, 1.10 показал, что для объемного пожаротушения прямое значение имеют такие показатели, как теплоемкость и дисперсность среды. Это связано с тем, что повышение дисперсности среды увеличивает площадь взаимодействия огнетушащего вещества с областью горения, более того, огнетушащие высокодисперсные системы флегматизируют зону горения, повышая пожаровзрывобезопасность в замкнутом объеме помещения. Таким образом, наибольшей эффективностью обладают составы, которые имеют высокие показатели теплоемкости и дисперсности. Однако необходимо отметить, экспериментальные исследования комбинированных составов [70–72] и изучение влияния реакционных цепей на распространение пламени [26, 29, 31] позволили сделать предположение, что наибольшее влияние на подавление пламени имеют процессы химического ингибирования. Используя данные сведения и результаты анализа обстановки и состояния систем обеспечения пожаровзрывобезопасности ГКС, переходим к анализу типовых сценариев аварий с участием горючих веществ, приводящих к пожарам в замкнутых объемах ГКС.

### **1.3 Анализ типовых сценариев аварий с участием горючих веществ в замкнутых объемах газокompрессорных станций**

Рассмотрим и проанализируем примеры крупных аварий, сопровождавшихся пожарами горючих веществ в замкнутых объемах помещений ГКС, для формирования их сценариев.

*23 февраля 2000 г.* в помещении агрегатов газораспределительной станции № 38 города Ульяновск произошло возгорание масла. В результате пожара произошел отказ в работе контрольно-измерительного оборудования, который повлек нагнетание давления в газоотводную трубу (рисунок 1.11). Повышение давления выше критического вызвало разрыв трубы с последующим

возгоранием газа. Результатом аварии стала остановка промышленных предприятий и котельных одного из районов города и, как следствие, оставление без тепла в зимний период времени более чем 33 тысяч домов и квартир с общим населением около 100 тысяч человек.



Рисунок 1.11 – Пожар на газораспределительной станции в городе Ульяновск

*11 ноября 2012 г.* на ГКС в поселке Щелковская Чеченской республики произошел пожар судового масла при разгерметизации системы маслоснабжения (рисунок 1.12). Автоматическая установка газового пожаротушения сработала, но пожар масла не ликвидировала. В результате без газоснабжения на 3 суток остались 2 школы и больница, 5 детских садов, 3 котельные. Более 10 тысяч человек остались без тепла в период отопительного сезона.

*4 сентября 2018 г.* в результате вибрации газоперекачивающего агрегата в совокупности с коррозионным истончением стенки трубопроводной обвязки масляной системы произошел ее разрыв с последующим выходом турбинного масла и его воспламенением в помещении машинного зала на Курской ГКС (рисунок 1.13). В результате пожара город Железногорск с населением более 100 тысяч человек более суток находился без газоснабжения, кроме того, пожар повлек за собой временную остановку в работе Михайловского горно-обогатительного комбината.

Рассмотрим типовые сценарии аварий, учитывая анализ пожаров и причины их возникновения, сопровождающиеся выбросами горючих веществ в замкнутых объемах помещений ГКС [73].



Рисунок 1.12 – Последствия пожара на газораспределительной станции в поселке Щелковская



Рисунок 1.13 – Последствия пожара на Курской газораспределительной станции

Возможные сценарии аварий на технологическом оборудовании в объемах помещений ГКС можно разделить на четыре группы, в зависимости от признака обрабатываемых опасных веществ, вида и особенностей расположения

оборудования [74]:

1. Группа сценариев для надземных внутренних газопроводов.
2. Группа сценариев для технологических жидкостных трубопроводов и оборудования с горючими термодинамически стабильными жидкостями.
3. Группа сценариев для технологических жидкостных трубопроводов и оборудования с горючими нестабильными жидкостями.
4. Группа сценариев для технологических жидкостных трубопроводов и оборудования с горючими нестабильными жидкостями с возможностью образования при пожаре парового облака, сгорающего в дефлаграционном режиме.

Анализ данных групп позволяет выделить наиболее сложные сценарии пожаров, происходящих в объеме помещений ГКС. В их число входят следующие сценарии [74]:

- пожары газа;
- пожары термодинамически стабильных жидкостей;
- пожары термодинамически нестабильных жидкостей.

Рассмотрим взаимосвязи данных сценариев на структурной блок-схеме (рисунок 1.14) для установления точек сукцессий.

Анализ групп взаимодействия сценариев пожаров, приводящих к пожарам на энергетических объектах ГКС, показал, что наиболее сложными для тушения и частыми являются пожары термодинамически стабильных жидкостей, а именно: турбинных, судовых и трансформаторных масел. Данные пожары происходят в помещениях газоперекачивающих агрегатов в результате разгерметизации трубопроводов масляной системы. Повышенная частота пожаров обусловлена тем, что в блоке газоперекачивающих агрегатов системы трубопроводов подвержены серьезным вибрационным нагрузкам и термическим воздействиям, а существующие системы контроля не способны с достаточной точностью определить степень износа технологической обвязки агрегатов.

Сложность тушения пожаров возгорания масел в объеме помещений газоперекачивающих агрегатов зависит от нескольких факторов. ГПА имеют



многоуровневую систему установки, при которой наибольшему вибрационному воздействию подвергаются вышележащие элементы технологической обвязки, поэтому в более чем 85 % случаев аварий технологической обвязки происходит на элементах вышележащего уровня [2, 3, 41–43, 54, 55, 75].

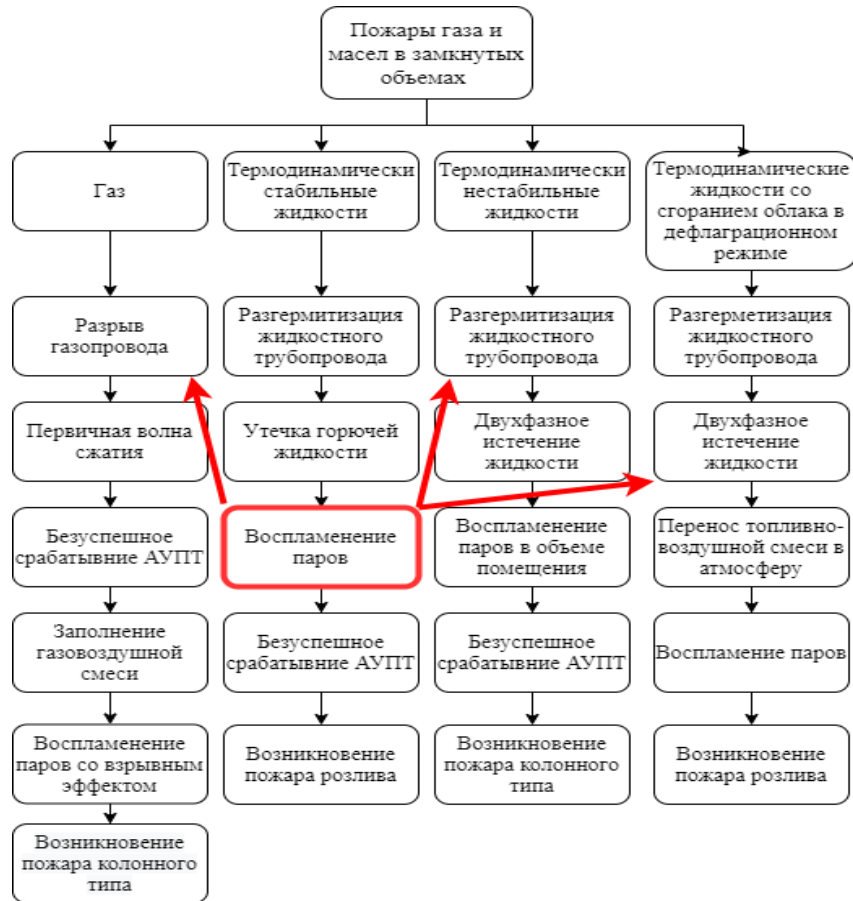


Рисунок 1.14 – Блок-схема групп сценариев пожаров и аварий в объемах помещений газораспределительной станции

Таким образом, при аварии системы маслопроводов наивысшего уровня горящее масло истекает на нижележащие через технологические уровни, что создает ступенчатые площадки пожара, тушение которых поверхностным способом либо осложнено, либо практически невозможно. Эффективность применения существующих средств объемного пожаротушения в данном случае не превышает 57 % [39, 40, 73]. Это связано с тем, что основное огнетушащее воздействие существующих средств объемного пожаротушения имеет нехимический характер. Кроме того, при пожарах в замкнутых объемах ГКС



происходит разрушение остекления, технологических конструкций, т. е. происходит превышение нормативной негерметичности помещения, поэтому при сохранении расхода подаваемых огнетушащих веществ происходит снижение эффективности объемного пожаротушения.

### **Выводы по первой главе**

1. Интегрированный подход к анализу пожаров позволил определить основные группы веществ, участвующих в пожарах замкнутых объемов объектов ГКС: горючие жидкости (турбинное, судовое и трансформаторное масла) и природный газ. На основе алгоритма Диксона и математической модели регрессионного анализа с коэффициентом детерминации равным 0,86 сделан вывод, что существует необходимость совершенствования системы обеспечения пожарной безопасности данных объектов, в том числе повышение эффективности тушения пожаров в замкнутых объемах.

2. Рассмотрены основные огнетушащие составы, применяемые для объемного пожаротушения. Установлено, что наибольшей пожаротушащей способностью обладают комбинированные составы.

3. На основе анализа статистики за период 2014 – 2019 гг. и реальных пожаров были определены и описаны сценарии развития пожаров в замкнутых объемах ГКС. Установлено, что сценарии пожаров с участием термодинамически стабильных жидкостей являются самыми сложными с точки зрения пожаротушения. Основная причина возникновения пожаров данного сценария является разгерметизация трубопровода масляной системы.

4. Группы сценариев с разгерметизацией масляных трубопроводов происходят с возникновением ступенчатых площадей пожара, тушение которых поверхностным способом либо осложнено, либо практически невозможно, а эффективность применения существующих средств объемного пожаротушения не

превышает 57 %. Это связано с тем, что основное огнетушащее воздействие существующих средств объемного пожаротушения имеет нехимический характер.

## **ГЛАВА 2 ВЫБОР МЕТОДА И РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОБЪЕМНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ ТЕМПЕРАТУРНО-АКТИВИРОВАННОЙ ВОДОЙ С ИНГИБИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ**

На основе анализа пожаров и сценариев их развития на энергетических объектах ГКС автор настоящего диссертационного исследования получил следующие результаты: горение масел, состоящих из предельных углеводородов, происходит в газовой фазе, а одним из приоритетных направлений повышения эффективности применения огнетушащих составов является введение в них ингибиторов, поэтому необходимо описать методы и механизмы ингибирования газовой фазы горения углеводородных смесей.

Процессы горения имеют химическую природу в своей основе, поэтому наибольшей эффективностью обладают огнетушащие составы, оказывающие влияние на химические механизмы горения. Для изучения данных процессов используется теория процессов горения, взрыва и детонации газов. Согласно [38, 76] горение представляет собой ускоряющийся химический процесс, сопровождающийся выделением тепла и света. Существует две теории, описывающие данный процесс: теория теплового горения и разветвленно-цепных процессов горения [70–72, 77].

В основе тепловой теории горения лежит условие превышение скорости образования тепла, над скоростью теплоотвода, она позволяла с высокой точностью описывать процессы горения, однако накопление экспериментальных данных, которые выходили за рамки данной теории, сформировало предпосылки к формированию теории разветвленно-цепных процессов горения. Изначально теория разветвленно-цепных процессов, описанная Н.Н. Семеновым [38], была применима для областей с давлением в сотни раз меньшим атмосферного, однако в экспериментальных и теоретических исследованиях, проведенных под руководством В.В. Азатяна [78–81], было установлено, что разветвленно-цепная

природа горения проявляется и в области атмосферного давления и является определяющей в рассмотрении процессов взрыва и детонации. Теория разветвленно-цепных процессов горения и взрыва объясняет фундаментальную основу процессов ингибирования, так как ингибиторы при малых мольных концентрациях (менее 5 %) либо незамедлительно прекращали горение, либо прерывали цепные процессы горения [78, 79], более того, была экспериментально установлена возможность разрушения ингибиторами детонационной волны [79].

Таким образом, ингибиторы горения – это химически активные вещества, замедляющие процессы горения, путем блокирования разветвленно-цепных процессов. Влияние ингибирующих способностей огнетушащих составов на обеспечение пожаровзрывобезопасности может быть объяснено тем, что ингибирующие составы активно взаимодействуют с атомами и радикалами, создавая продукты неспособные или малоспособные к дальнейшему участию в процессе горения. Благодаря этому обеспечивается замедление лавинообразного процесса химической реакции горения, это обеспечивает прекращение горения.

## **2.1 Обоснование метода ингибирования горения и механизмов, влияющих на кинетику химической реакции**

### **2.1.1 Разработка вероятностной модели разветвленно-цепного процесса горения предельных углеводородов**

Горение – это кинетический режим прогрессирующего самоускорения химического процесса, сопровождающегося выделением тепла и света, реализующего процессы воспламенения, распространения пламени, взрыва и детонации [82]. Наиболее значимым для описания процессов ингибирования горения являются исследования в области распространения пламени. Как известно, распространение пламени в газовой фазе в ламинарном режиме

обеспечивается поступлением тепла и активных частиц из зоны горения в зону свежей смеси, т. е. может реализовываться двумя принципиально различными по физико-химической природе процессами:

1. тепловой процесс горения;
2. разветвленно-цепной процесс горения.

В теории теплового горения определяющую роль играет прямая зависимость между саморазогревом системы и скоростью химической реакции [83, 84], т. е. определяется выполнением неравенств (2.1)–(2.2):

$$q_+ > q_-; \quad (2.1)$$

$$\frac{dq_+}{dT} > \frac{dq_-}{dT}. \quad (2.2)$$

Здесь  $q_+$  – скорость выделения тепла в реакции горения, кДж/с;  $q_-$  – скорость отведения тепла из зоны горения, кДж/с;  $T$  – температура, К.

Таким образом, уравнение для скорости химической реакции горения для первого кинетического порядка в рамках теории теплового горения может быть записано в виде [40]:

$$W = k^0 [C] \exp(-E_a/RT) \quad (2.3)$$

где  $[C]$  – объемная мольная или объемная молекулярная концентрация реагирующего вещества, моль/м<sup>3</sup>;  $E_a$  – энергия активации, определяющая минимальную энергию системы частиц для осуществления элементарного акта химической реакции, Дж;  $k^0$  – предэкспоненциальный множитель константы скорости [82].

Проанализировав зависимость 2.3 можно сделать вывод, что увеличение скорости химической реакции горения в рамках тепловой теории прямо пропорционально саморазогреву системы.

Долгое время было принято считать, что разветвленно-цепные процессы (РЦП) горения характерны только для реакций горения, происходящих при давлениях в десятки раз ниже атмосферного [85–87]. Однако приведение реакций горения к одностадийной форме, когда продукты реакции напрямую образуются из исходных веществ, не объясняло многих фундаментальных процессов, в том

числе как малые добавления определенных веществ в горючую смесь могут предотвращать процесс ее воспламенения, распространения пламени и детонации, ингибировать горение. Описать данные процессы позволила теория РЦП.

В рамках разветвленно-цепной теории основную роль в воспламенении и распространении пламени играют активные промежуточные продукты – атомы и радикалы, которые генерируют цепные процессы в пламени. Схематично разветвленно-цепной процесс может быть описан следующими превращениями [38]:



Здесь  $A$  и  $B$  – исходные вещества, вступающие в реакцию горения;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – монорадикалы и бирадикал соответственно.

В начальном этапе горения происходит образование атомов и радикалов – носителей цепей (НЦ), после чего НЦ вступают в быстрые реакции, что инициирует лавинообразный цепной процесс реакции горения. Скорость химической реакции горения РЦП может быть описана следующим уравнением:

$$W = - \frac{d[C]}{dt} = \omega_0 + k_p n [C], \quad (2.8)$$

где  $[C]$  – концентрация реагирующего вещества, моль/м<sup>3</sup>;  $\omega_0$  – скорость образования НЦ в реакции горения реагирующего вещества, моль/с;  $k_p$  – эффективная константа скорости лимитирующей стадии [88];  $n$  – концентрация носителей цепей в разветвленно-цепном процессе, моль/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с.

Основная часть реагирующих веществ химической реакции горения взаимодействуют с высокоактивными частицами НЦ, причем в силу большого количества НЦ часть из них участвует в реакциях рекомбинации и адсорбции, т. е.

происходит гибель активных центров цепи. Уравнение изменения концентрации НЦ во времени может быть записано следующим образом [38]:

$$\frac{dn}{dt} = \omega_0 - (f - g)n = \omega_0 - \varphi n, \quad (2.9)$$

где  $n$  – концентрация НЦ в химической реакции, моль;  $\omega_0$  – скорость образования НЦ в реакции горения реагирующего вещества, моль/с;  $f$  – константа скорости разветвления цепи при единичной концентрации НЦ,  $c^{-1}$ ;  $g$  – константа скорости обрыва цепи при единичной концентрации НЦ,  $c^{-1}$ ;  $\varphi$  – фактор разветвления НЦ;  $t$  – время, с.

Анализируя выражение (2.9), можно сделать вывод, что необходимым условием лавинообразного увеличения скорости горения РЦП является превышение скорости разветвленного процесса над процессом обрыва цепей, т. е. необходимо, чтобы в исходных реакциях образовывалось большее количество НЦ, чем количество адсорбированных и рекомбинированных НЦ в единицу времени.

Таким образом, анализ уравнений (2.3) и (2.9) для скорости химической реакции горения, позволяет сделать вывод, что физико-химические процессы воспламенения и распространения пламени в рамках тепловой теории горения и теории РЦП горения различны – для первого случая определяющую роль в распространении пламени играет прямая взаимосвязь скорости химической реакции горения и саморазогревом системы, для РЦП основным условием воспламенения и распространения пламени является превышение скорости разветвленного процесса над скоростью процесса обрыва цепей. Стоит отметить, что для РЦП есть своя минимально необходимая энергия активация процесса взаимодействия НЦ с реагентами реакции  $E_r$ , данный аспект может быть освещен распределением Больцмана в рамках молекулярно-кинетической теории (рисунок 2.1).

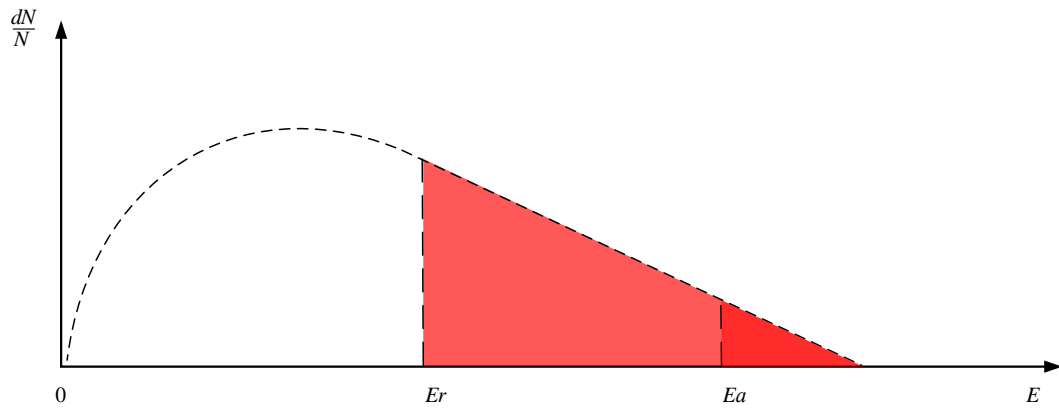


Рисунок 2.1 – Концентрация носителя цепей с различной энергией активации

На рисунке 2.1 представлено распределение частиц, участвующих в горении, по энергиям,  $E_a$  – энергия активации, определяющая минимальную энергию взаимодействия исходных реагентов между собой,  $E_r$  – минимально необходимая энергия активация процесса взаимодействия НЦ с реагентами реакции. Анализ данного рисунка позволяет сделать вывод, что доля частиц способных реагировать между собой для распространения пламени много раз меньше частиц, способных осуществить реакцию горения с НЦ, поэтому воспламенение идет в соответствии с РЦП, а при развившемся горении, когда происходит саморазогрев смеси в распространении пламени начинает играть роль также тепловое распространение пламени, однако определяющая роль остается за РЦП. Поэтому при построении модели горения углеводородных смесей, определяющую роль необходимо отводить РЦП.

Анализ горючих веществ и режим пожара, проведенный в пунктах 1.2.1 и 1.3 позволяет сделать вывод, что при пожарах на энергетических объектах ГКС горение происходит в газовой фазе, причем наиболее опасными являются трансформаторные масла и масла ГПА, более чем на 90 % стоящие из углеводорода  $C_{25}H_{52}$ , [47, 48]. Заметим, что, как и метан, так и углеводород  $C_{25}H_{52}$  являются предельными углеводородами, т. е. такими, что молекулы углерода полностью насыщены атомами водорода, поэтому при составлении модели горения данных углеводородных смесей в замкнутом объеме ГКС необходимо



учитывать возможность возникновения многостадийной реакций окисления данных веществ.

В работах [88, 89] дается характеристика стадий сгорания смеси метана и воздуха, включающая более 2000 химических реакций, однако в работе [90] описаны модели, позволяющие исключить необходимость дифференцирования данного процесса на блоки химических превращений без потери информационной нагрузки и физической обоснованности. Более того, в работах [91–95] теоретически и экспериментально доказана возможность использование данных моделей для процессов подавления пламени газовыми средами, однако в предложенных моделях не рассматривается компенсационный аспект образования новых связей в продуктах реакции, т. е. не учитывается гетерогенное образование свободных радикалов, которое влияет на снижение минимально необходимой энергии активации взаимодействия НЦ с реагентами реакции (см. рисунок 2.1), что очень важно для процессов ингибирования. Анализ моделей горения предельных углеводородов в работе [89] позволяет сделать вывод, что разветвленно-цепной процесс горения сводится к элементарному разветвленно-цепному процессу горения водорода, описанному Н.Н. Семеновым и С.Н. Хиншелвудом [38, 70, 80, 83, 96], остальные происходящие реакции в конечном счете либо приводят к гибели НЦ, либо образуют продукты полного сгорания.

Актуализация данных моделей для процессов ингибирования может быть произведена добавлением вероятностной характеристики данного процесса. На основе исследований, проведенных в работах [96], можно трансформировать модель, описанную в работе [89, 93–95], для горения предельных углеводородов в замкнутом объеме ГКС, используя теорему Байеса, которая позволяет учитывать влияние нескольких факторов на вероятность того или иного реакционного процесса. Необходимая модель была разработана и описана в [41, 54, 55, 97, Приложение А], она позволяет учитывать тот факт, что в развитии цепи наибольшую роль играет разветвленно-цепной процесс горения водорода. На

основе проведенных расчетов и сравнения результатов с энергией взаимодействия реагентами реакции (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Условие наступления разветвленно-цепных процессов горения углеводородов в замкнутом объеме

Анализ интервальной схемы вероятности разветвленно-цепного процесса горения предельных углеводородов в замкнутом объеме (рисунок 2.2) показал, что реальная вероятность наступления разветвленно-цепного процесса наступает в пределах 0,15 до 0,75 вероятности разветвления  $P$ , вычисленной по теореме Байеса, это объясняется тем, что НЦ, обладающие высокими энергетическими характеристиками, в большинстве случаев не участвуют в разветвленно-цепном процессе, а покидают зону горения и адсорбируются на свободных поверхностях, а радикалы, обладающие относительно низкими энергетическими характеристиками, попадают в зону реакции с малой долей вероятности. Таким образом наступление реального разветвленно-цепного процесса принимаем от 0,15 до 0,75 вероятности разветвления, вычисленной по теореме Байеса. Расчеты, проведенные по модели, и полученные результаты [97] позволяют провести анализ водорастворимых ингибирующих солей для определения наиболее эффективного состава (рисунок 2.3). Для проведения анализа были выбраны ингибирующие соли калия, используемые при тушении пожаров, описанные в работах [6, 36, 88, 98, 99].

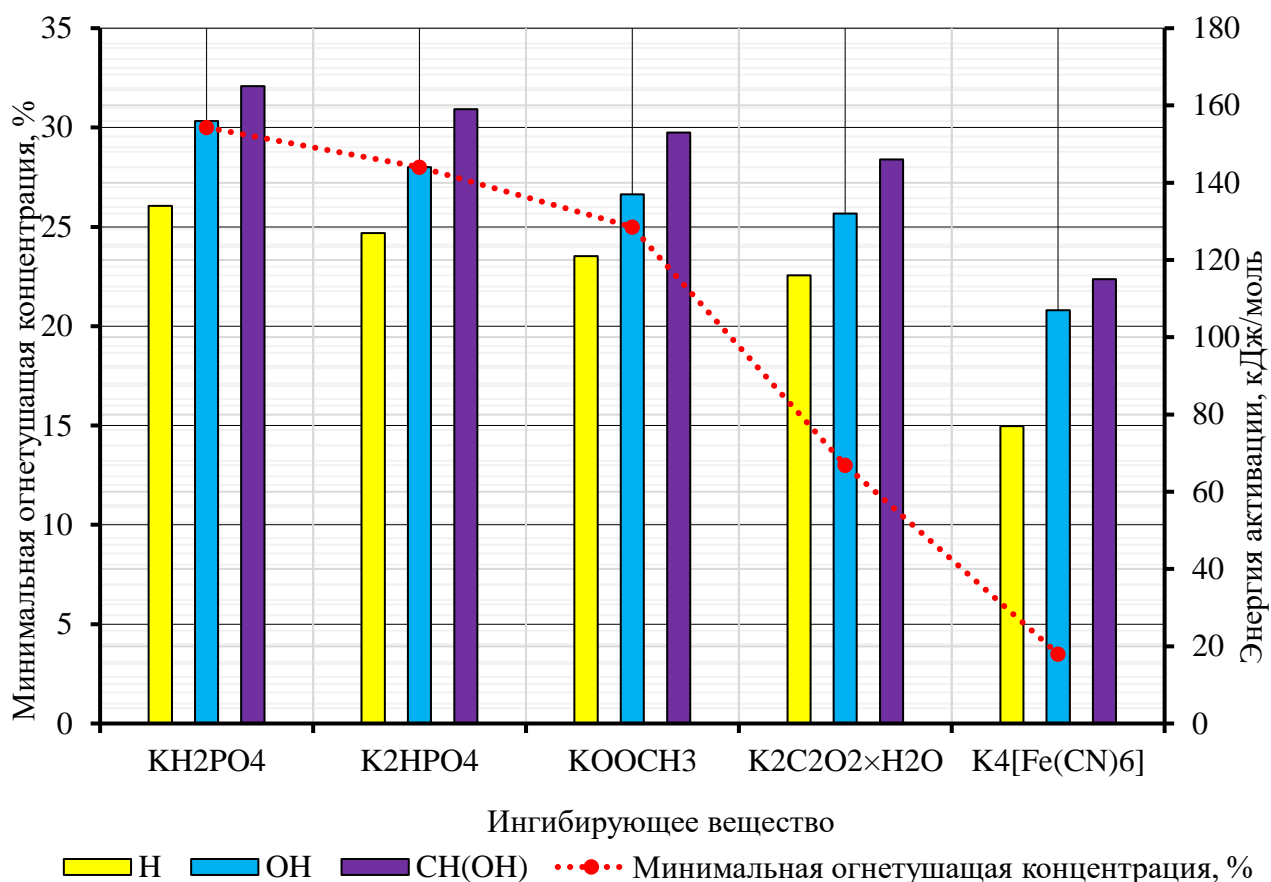


Рисунок 2.3 – Гистограмм расчета энергетической эффективности ингибирования водорастворимых солей калия

Наименьшей минимально-необходимой огнетушащей концентрацией обладает комплексное соединение  $K_4[Fe(CN)_6]$  – гексацианоферрат(II) калия (см. рисунок 2.3). Однако проведенные экспериментальные исследования [95, 100, 101] не позволяли объяснить причину различия в минимальной огнетушащей концентрации. Для этого был проведен энергетический расчет по найденной вероятностной модели разветвленно-цепного горения предельных углеводородов. Результаты расчета показали, что минимально-достаточная энергия связи функционального радикала Н с молекулой  $K_4[Fe(CN)_6]$  в 1,7 раза меньше чем с  $KN_2PO_4$ , поэтому для блокирования РЦП горения предельных углеводородов необходимо меньшее количество огнетушащего состава. Таким образом для экспериментального исследования в качестве ингибирующего агента выбираем гексацианоферрат(II) калия. Растворимость данной соли в воде приведена на рисунке 2.4.

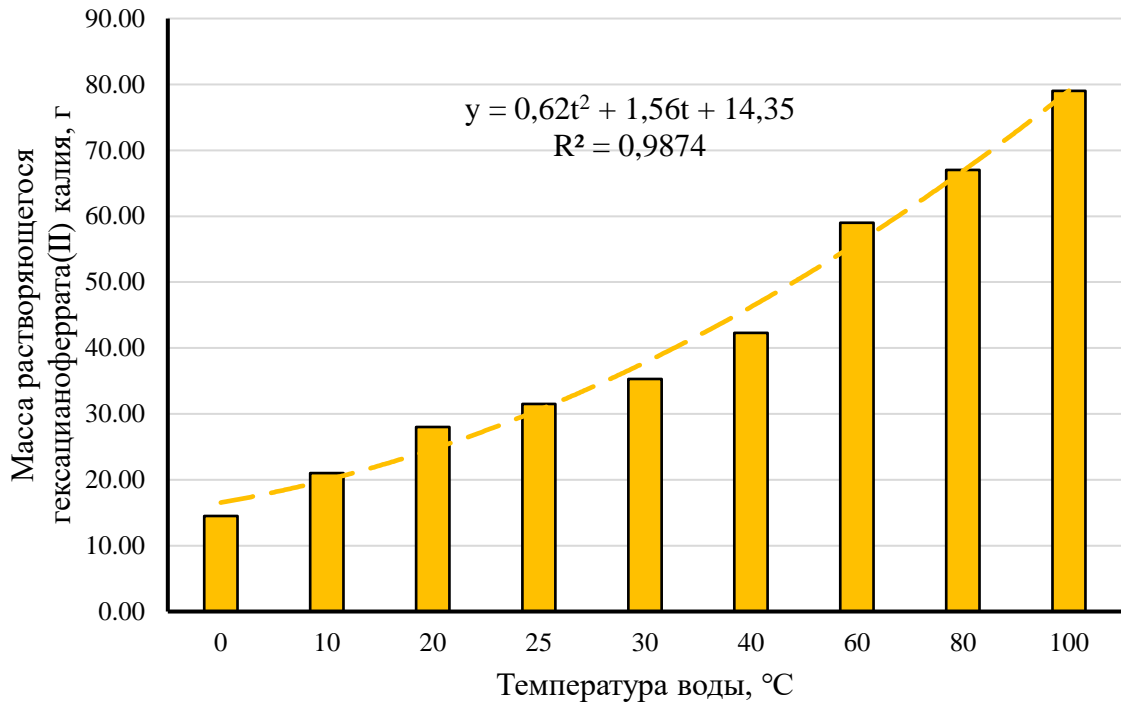


Рисунок 2.4 – Зависимость растворимости  $K_4[Fe(CN)_6]$  от температуры воды

Для экспериментальных исследований в температурном отрезке 0–100 °C (см. рисунок 2.4) можно вычислить предельно возможное значение растворимости при заданной температуре, используют уравнение с достоверностью 0,99:

$$y = 0,62t^2 + 1,56t + 14,35 \text{ при } R^2 = 0,99 \quad (2.10)$$

где  $t$  – температура воды, °C.

$$y = 7,8133t + 2,8889 \text{ при } R^2 = 0,956 \quad (2.11)$$

$$y = 27,109\ln(t) + 3,3956 \text{ при } R^2 = 0,7938 \quad (2.12)$$

Учитывая минимальную огнетушащую концентрацию и рисунок 2.4, можно предположить, что в нормальных условиях необходимость подогревания ингибирующего раствора отсутствует. Необходимо также отметить, что при расчете не учитывалось, что при тушении реального пожара высокодисперсными водными растворами ингибирующих солей, в зону пламени РЦП не попадают все капли воды, содержащие молекулы ингибирующей соли. Поэтому необходимо выбрать техническое устройство подачи ТАВ, которое вместе с ингибированием пламени будет обеспечивать эффективное охлаждение зоны горения.

## **2.1.2 Выбор эффективных параметров подачи струй температурно-активированной воды для охлаждения зоны горения**

Выбор наиболее эффективных параметров струй ТАВ для охлаждения зоны горения основан на определении зависимости между огнетушащими свойствами ТАВ и ее основными физическими характеристиками.

Впервые понятие ТАВ и температурной активации ввел академик Ф.А. Летников в середине 70-х XX в. [102]. В данной работе описаны основные свойства ТАВ и высказано предположение, что ТАВ в процессе остывания сохраняет характеристики воды при критической температуре. В работах [17, 69, 103] описано, что растворяющая способность ТАВ в десятки раз выше воды при обычных условиях. В данных работах также было отмечено, что струи ТАВ обладают ингибирующими свойствами благодаря присутствию паровой фазы [19, 104]. Однако эффективность ингибирования газофазных процессов горения паром минимум на два порядка ниже известных химических ингибиторов [104].

Таким образом, ТАВ – это парокапельная смесь, полученная в результате температурной активации воды. Для получения ТАВ необходимо техническое средство способное при большом избыточном давлении (не менее 1,5 МПа) нагревать обычную воду (без тонкой очистки) до температуры не менее 165 °С [17, 69]. Тогда при истечении из насадка ствола, ее давление резко уменьшится и на короткое время (менее чем за 0,0001 с) вода переходит в метастабильное состояние. При этом процессе менее 1/3 части воды превращается в пар, а остальная вода образует капельную среду со средним диаметром капель 0,01–10,0 мкм. Капельная фаза способна до 40 мин витать в воздухе, не осаждаясь [14–49, 69]. ТАВ для целей пожаротушения можно получить двумя способами – нагреть воду в замкнутом объеме или в теплообменнике.

Получение ТАВ объемным способом было предложено в 1978 г. [105]. Для этого герметичную емкость на 65–70 % заполняли водой и нагревали до 165–

200 °С, причем давление в емкости могло достигать 1,55 МПа. В целях безопасности работы установки были предусмотрены клапаны [69, 105].

Для обеспечения получения ТАВ на передвижной пожарной технике была необходима разработка специального водогрейного котла со временем выхода на режим не более одной минуты. Для этого был разработан специальный водогрейный котел [106], смонтированный на базовом шасси (рисунок 2.5).

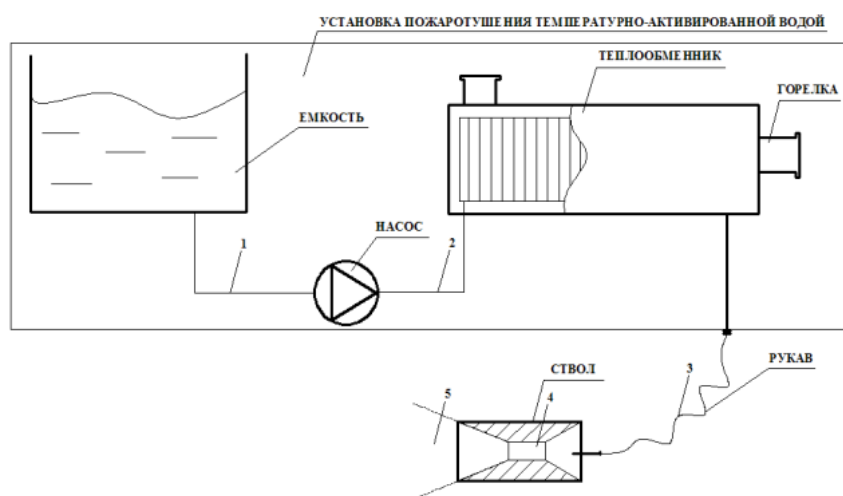


Рисунок 2.5 – Установка для получения температурно-активированной воды с помощью теплообменника

Струи ТАВ могут быть использованы для ликвидации горения всех веществ (рисунок 2.6), за исключением тех, которые вступают в реакцию с водой [23–28, 58].



Рисунок 2.6 – Тушение струями температурно-активированной воды модельных очагов класса А (слева) и В (справа)

Огнетушащее действие струй ТАВ включает в себя все существующие механизмы тушения, однако наибольшую роль имеет механизм охлаждения [17–19, 69]. Охлаждающая способность зависит от теплоемкости струи. Теплоемкость струи ТАВ зависит от следующих характеристик:

- соотношение паровой и капельной фаз ТАВ;
- математическое распределение капель в струе ТАВ;
- форма струи ТАВ;
- наличие примесей в используемой для тушения воде.

Проведенные исследования [18, 22, 26, 27] показали, что характеристики струи ТАВ зависят как от сочетания давления и температуры, создаваемых установкой, так и от конструкции насадков-распылителей:

- шайбы с острой кромкой;
- сопла Лавалья;
- сопла Лавалья с цилиндрической частью.

Для определения характеристик струи ТАВ в зависимости от типа ствола и сочетаний температуры и давления были проведены эксперименты на специально разработанной установке [16, 107–109], полученные результаты представлены на рисунке 2.7.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал (рисунок 2.7), что распределению капель в струях ТАВ имеет бимодальный характер, при этом его характер существенно зависит от технического средства подачи и режима работы установки. Как отмечалось выше, охлаждающая способность струй ТАВ зависит от создаваемой ими площади теплообмена, которая в свою очередь зависит от размера входящих в нее капель.

Таким образом, используя распределение капель по радиусам на рисунке 2.7, необходимо установить взаимосвязь между площадью теплообмена и радиусом капель струй ТАВ. Расчетами, проведенными в работе [7], была установлена зависимость площади теплообмена от радиуса капли:

$$S_{\text{общ}} = \frac{1}{16} \pi \times ([R]^2 \times e^{-\left(\frac{R}{8\sqrt{2} * R_{\text{общ}}}\right)^2}) \quad (2.13)$$

где  $R$  – математическое ожидание радиуса капли каждой из групп, м.

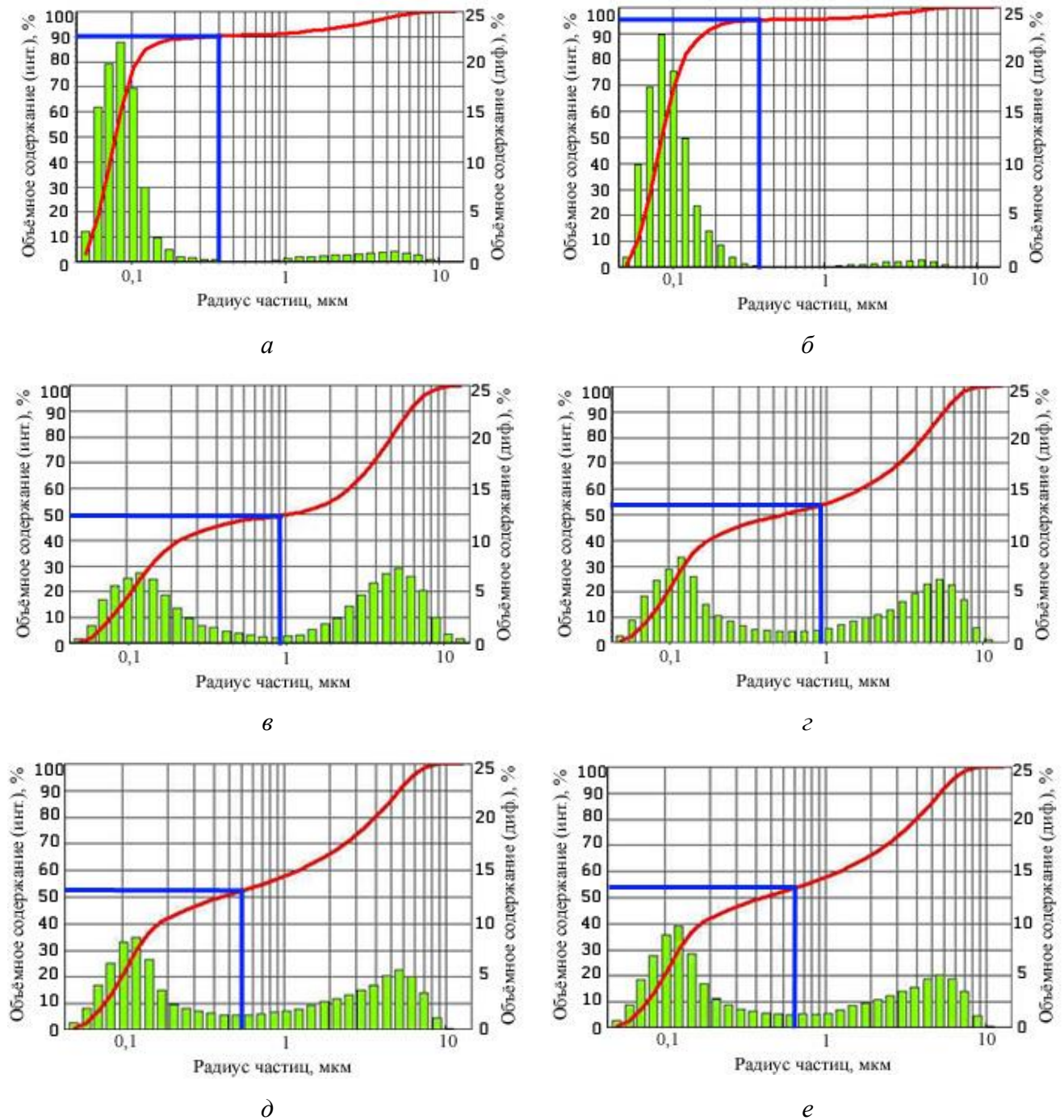


Рисунок 2.7 – Гистограмма и интегральная кривая объемного (массового) распределения (содержания) капель сконденсированного пара и воды по размерам при температуре недогретой воды перед соплом 170 °С (а, в, д) и 200 °С (б, г, е):

а, б – сопло Лаваля; в, г – сопло Лаваля с удлиненной проточной частью;

д, е – сопло в форме шайбы с острой кромкой

Струи ТАВ, в которых математическое ожидание радиуса капли будет наибольшим для капель с наименьшим диаметром, будут проявлять наилучшую способность к охлаждению, однако при подаче среды ТАВ в зону горения



подобной среды капли воды могут испариться, еще не достигнув очага, поэтому эффективность тушения подобной средой будет невысокой, более того, испарение до подлета к очагу не позволит таким каплям доставлять ингибирующие компоненты в область газозаженного горения.

Таким образом, в рамках данного исследования необходимо определить параметры подачи ТАВ, обеспечивающие эффективное охлаждение зоны горения и доставку молекул ингибирующих веществ в очаг пожара. Данная проблема может быть решена составлением модели движения капли в высокотемпературных тепловых потоках (рисунок 2.8) с последующей ее реализацией в среде математического моделирования.

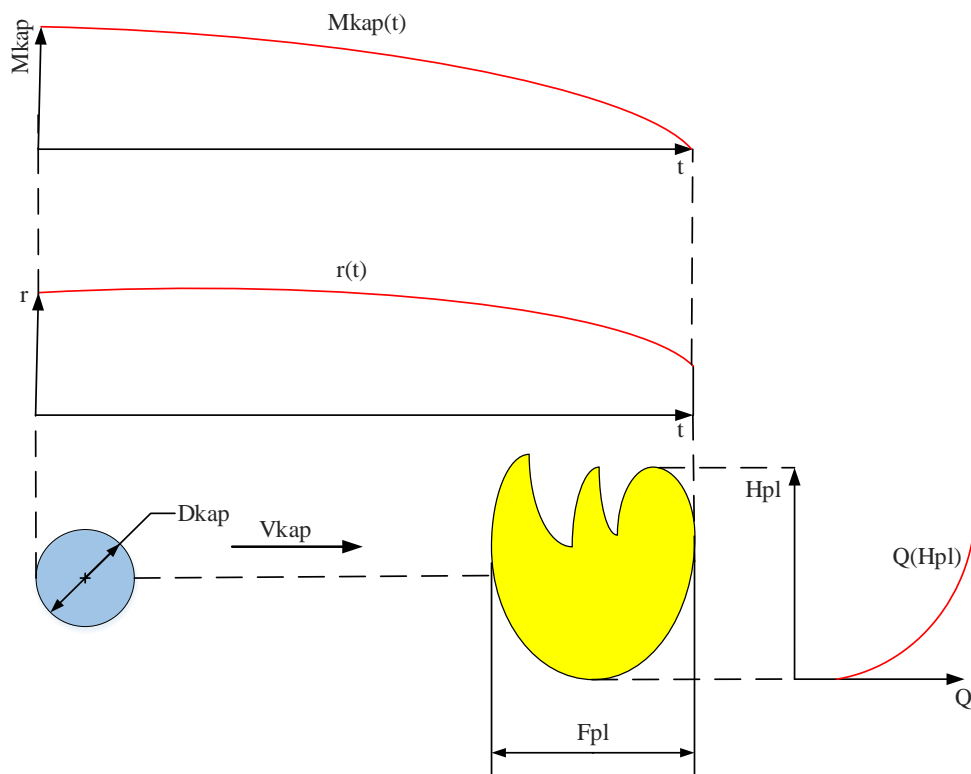


Рисунок 2.8 – Модель движения капли в тепловых потоках:

$D_{\text{кап}}$  – диаметр капли среды, м;  $V_{\text{кап}}$  – скорость капли, м/с;  $F_{\text{пл}}$  – длина тепловой зоны пожара, м;  $H_{\text{пл}}$  – границы действия тепловых потоков, м;  $Q_{\text{пот}}$  – интенсивность теплового потока, кВт/(м $\cdot$ с $^2$ );  $t$  – время, с;  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $M_{\text{кап}}$  – масса капли огнетушащей среды, кг

В работах [110–112] приведены модели, позволяющие рассматривать процессы, происходящие при испарении капель в тепловых потоках. Однако данные модели не позволяют описать движение полидисперсных капельных сред

в условиях пожара. Кроме того, их применение не позволяет определить размер капель водной среды, которые будут эффективно доставлять ингибирующий состав в зону горения. Для этого была создана обобщенная модель движения полидисперсной водной среды в тепловых потоках пожара.

Используя разработанную модель (см. рисунок 2.8) и алгоритм, представленный на рисунке 2.9, была создана программа в комплексе математического моделирования MatLab.

Результатами моделирования была проведена визуализация процесса испарения капель полидисперсной водной среды ТАВ в условиях тушения пожаров в замкнутом объеме машинного зала ГКС (рисунок 2.10).

На втором этапе был определен диаметр капель струй ТАВ, время испарения которых будет равно их времени прохождения сквозь тепловые потоки (рисунок 2.11).

В заключение моделирования было установлено наиболее эффективное распределение капель в струях ТАВ для тушения пожаров в машинных залах ГКС (рисунок 2.12).

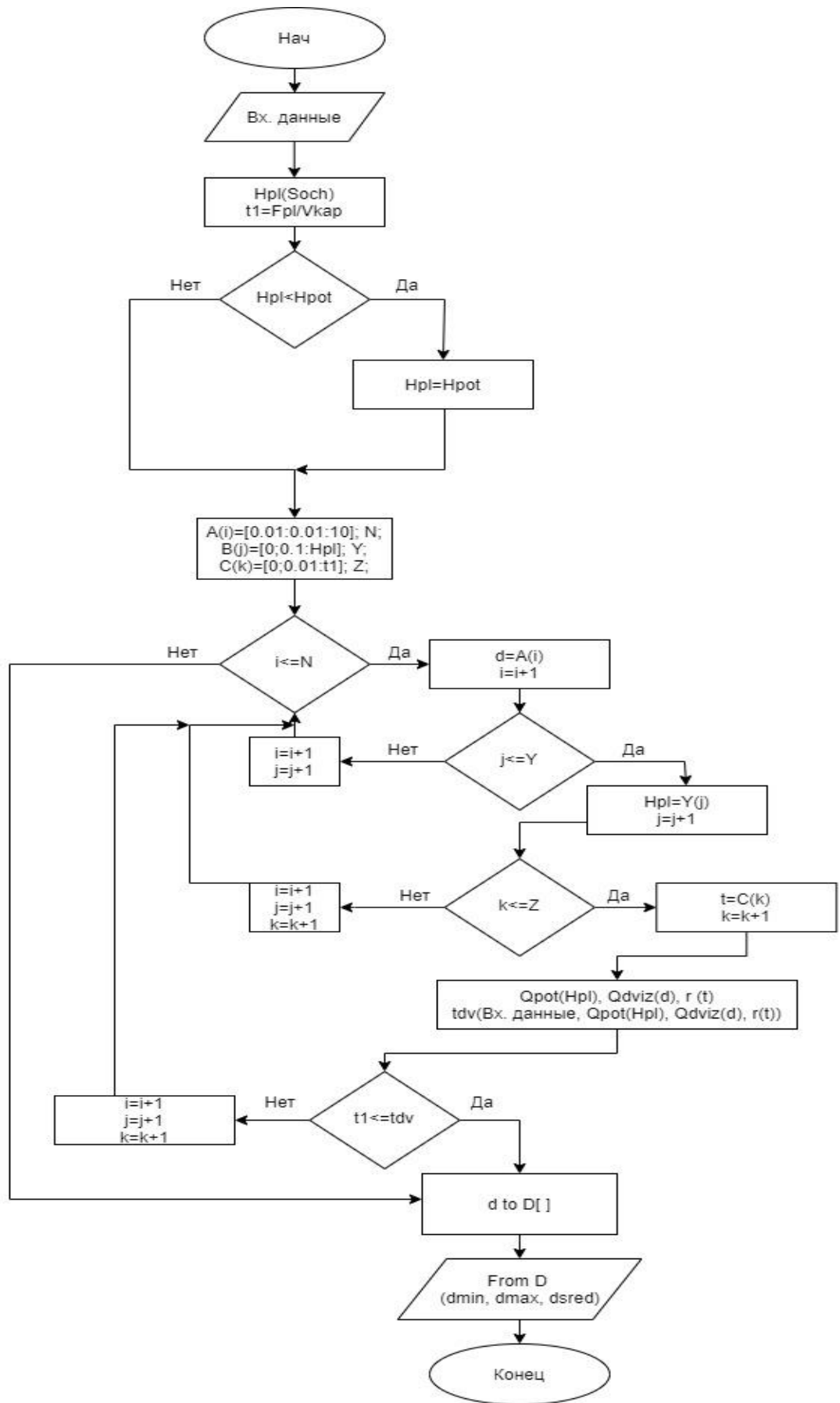


Рисунок 2.9 – Блок-схема нахождения эффективного распределения капель в струе температурно-активированной воды

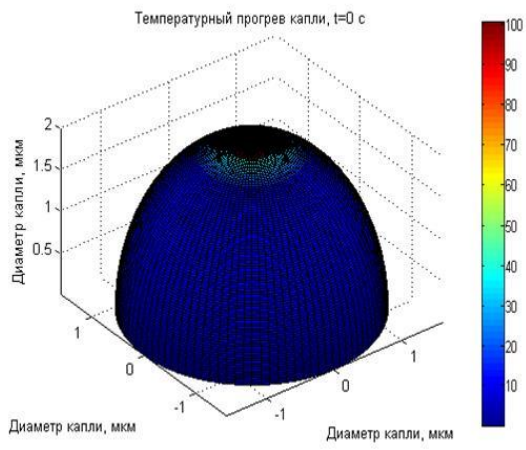
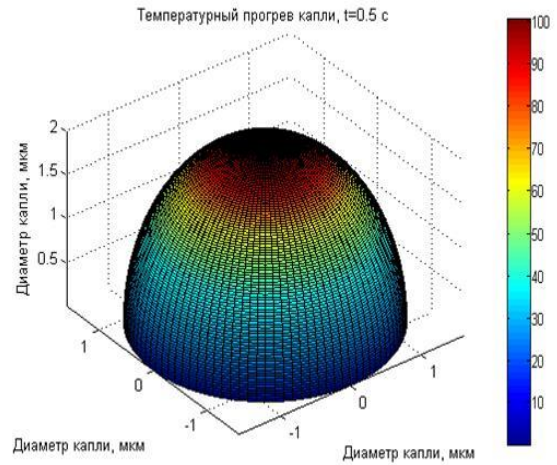
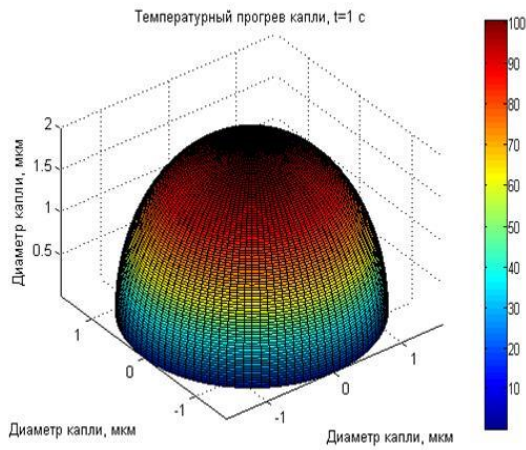
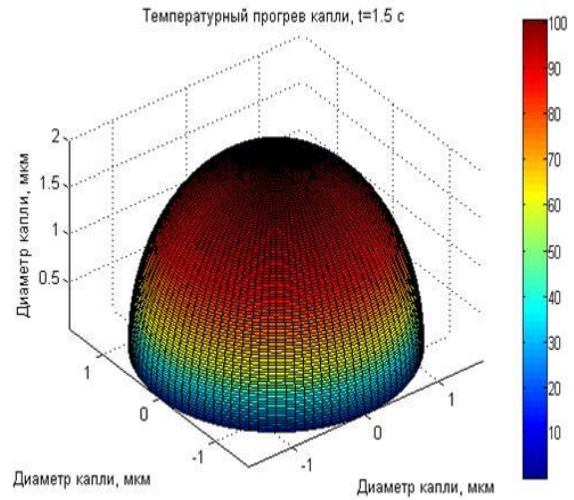
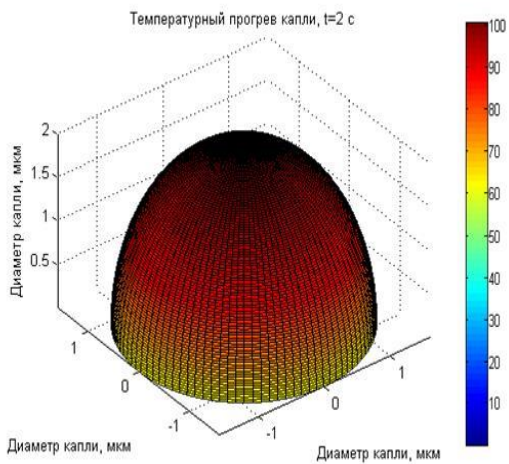
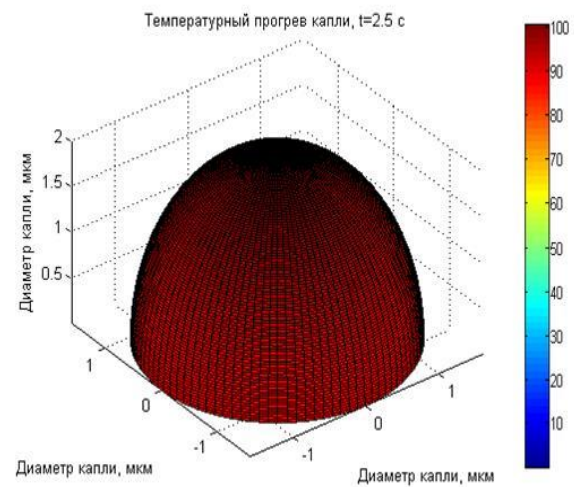
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 2.10 – Динамика прогрева капли диаметром 3,2 мкм в высокотемпературных тепловых потоках пожара разлива судового масла машинного зала газокompрессорной станции в зависимости от времени: *a* – 0 с; *б* – 0,5 с; *в* – 1 с; *г* – 1,5 с; *д* – 2 с; *е* – 2,5 с

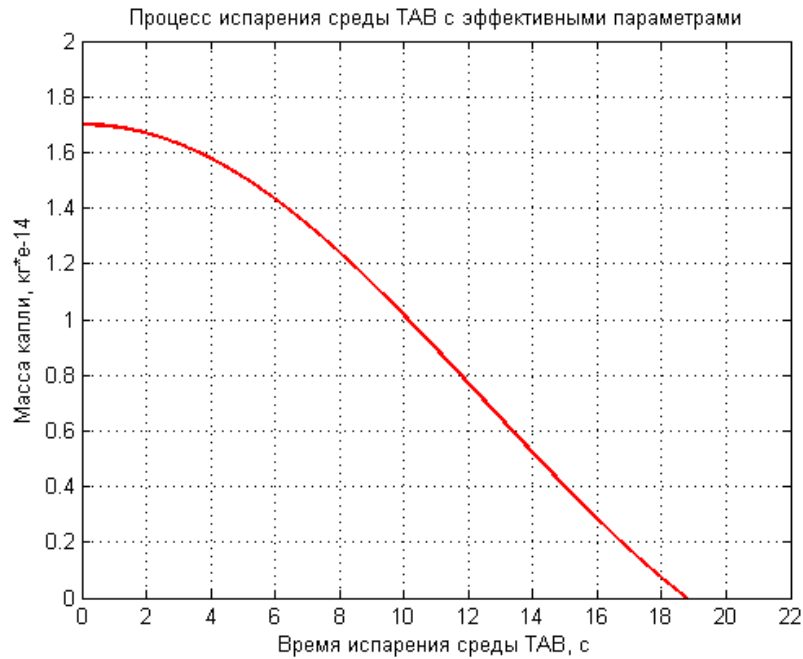


Рисунок 2.11 – Зависимость массы капли от времени движения в тепловых потоках пожара разлива судового масла машинного зала газокompрессорной станции

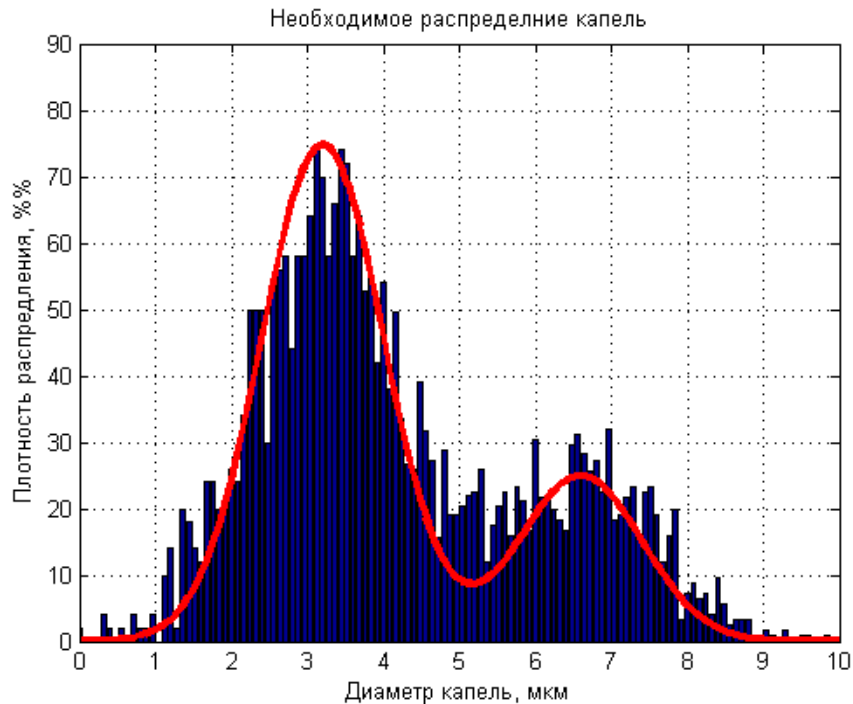


Рисунок 2.12 – Полидисперсная структура капельной среды температурно-активированной воды для тушения пожара разлива судового масла машинного зала газокompрессорной станции

Согласно распределению, показанному на рисунке 2.12 и полученному по результатам моделирования, наиболее эффективное тушение будет обеспечено при плотности распределения капель среднего диаметра около 40 %, т. е. капли среднего диаметра должны быть близки к математическому ожиданию реально

получаемой среды. Кроме того, энергетический расчет ингибирующих солей по вероятностной модели РЦП горения показал [97], что необходимо подавать в зону пламенного горения водную среду с ингибирующими свойствами, содержащую максимальное количество капель с минимальным диаметром. Таким образом, для повышения эффективности ингибирования РЦП горения необходимо использовать стволы подачи ТАВ с насадком-распылителем вида сопло Лавалья.

## 2.2 Экспериментальное определение минимальной гасящей концентрации ингибирующей соли в высокодисперсных водных растворах

Для исследования определения минимальной гасящей концентрации ингибирующей соли в высокодисперсных водных растворах была проведена серия экспериментальных исследований [44] в соответствии с [109]. Доставка ингибирующих составов струями ТАВ осуществляется капельной фазой, в связи с этим для проведения экспериментального исследования была использована установка получения высокодисперсных водных растворов.

Для расчетного описания процесса подавления пламени высокодисперсными водными растворами были проведены исследования [44] на основе работ [98, 99, 113–116]. Путем применения при расчете времени объемного тушения пожара необходимо введение соответствующих коэффициентов, позволяющих учесть влияние параметров отношения площадей вытяжного и приточного проемов  $K_{\text{проем}}$  и неравномерного распределения огнетушащей среды в объеме помещения  $K_{\text{объем}}$ :

$$K_{\text{объем}} = \frac{V_{\text{пом}}}{h_{\text{пл}} S_{\text{оч}} N_{\text{оч}}}, \quad (2.14)$$

где  $V_{\text{пом}}$  – объем помещения в котором происходит горение,  $\text{м}^3$ ;  $h_{\text{пл}}$  – средняя высота пламени горящих очагов в объеме помещения, м);  $N_{\text{оч}}$  – количество очагов, шт.

Интенсивность подачи ингибирующей соли будет определяться по следующему выражению:

$$J = \frac{m_{\text{огнетуш}} \varphi_{\text{к}}}{S_{\text{оч}} N_{\text{оч}}}, \quad (2.15)$$

где  $m_{\text{огнетуш}}$  – масса огнетушащего состава поданного в объем, кг;  $\varphi_{\text{к}}$  – массовая концентрация, %.

Массовая МГК в объеме помещения может быть рассчитана:

$$m_{\text{кр}} = m_{\text{об}} V_{\text{пом}}, \quad (2.16)$$

где  $m_{\text{об}}$  – массовая МГК, найденная экспериментально [98], кг/м<sup>3</sup>.

Подставляя выражение (2.14) в формулу (1) работы [98], получим соотношение для нахождения расчетного времени тушения очагов горения в замкнутом объеме:

$$t_p = -K_{\text{проем}} K_{\text{объем}} \frac{\rho h_0}{J_{\text{кр}}} \left[ 1 + \left( \frac{J}{J_{\text{кр}}} \right)^n \right] \ln \left( 1 - \frac{J_{\text{кр}}}{J} \right). \quad (2.17)$$

Область допустимых значений выражения (2.17) по площади зеркала горения: 20,3 от 42,2 м<sup>2</sup>. Используя верхнее значение площади горения, можно определить верхний предел интенсивности подачи огнетушащего вещества, зная величину расхода технического средства подачи огнетушащего вещества. Кроме того, используя граничные условия площади зеркала горения, определяем границы расхода масел при аварийной разгерметизации системы маслоснабжения газокompрессорных агрегатов. Нижний предел расхода определяется отношением объема масла для нижней границы площади зеркала горения к среднему времени прибытия пожарно-спасательных подразделений к месту тушения пожара на ГКС по методике [117]. Верхний предел расхода определяется аналогичным образом с использованием верхней границы площади зеркала горения.

Исследования, проведенные в работах [118–120], позволяют сделать вывод, что толщина масляного слоя на бетонной поверхности при растекании будет от 0,001 м до 0,02 м в зависимости от условий истечения. Для проведения расчетов выбрана максимально возможная толщина масляного слоя. Таким образом, при аварийной разгерметизации масляной системы с учетом среднего времени

прибытия пожарно-спасательных подразделений к месту тушения пожаров на ГКС выражение (2.17) определено на отрезке расхода масла от 2,7 до 5,6 л/с.

Значения расчетного удельного расхода  $q_p$  и экспериментальных определялись по формуле:

$$q = Jt, \quad (2.18)$$

где  $q$  – удельный расход ингибирующей соли, кг/м<sup>2</sup>;  $t$  – время, необходимое для подавления горения очагов, с.

Экспериментальное исследование было проведено в соответствии с разработанной методикой (Приложение Б). Для проведения экспериментального исследования был использован условно герметичный объем с регистрацией следующих параметров:

- удельный расход водного раствора с ингибирующей солью,  $q_{эи}$ , кг/м<sup>2</sup>;
- интенсивность подачи ингибирующей соли,  $J$ , кг/(м<sup>2</sup>·с);
- время тушения очагов водным раствором с ингибирующей солью,  $t_{эи}$ , с;
- массовая концентрация ингибирующих солей в растворе воды для объемного подавления горения очагов, %.

Эксперименты проводили в помещении с ограждающими конструкциями из негорючих материалов. Объем помещения 75 м<sup>3</sup> с суммарным параметром негерметичности для группы помещений 0,012 м<sup>-1</sup>. Отношение площади приточного проема к вытяжному составляло 3:1, а также имелась тяга, вызванная перепадом высот приточного и вытяжного проемов в 1000 мм. Три модельных очага размещены по периметру помещения на расстоянии 2500 мм друг от друга и 500 мм от стен помещения, поэтому не оказывали взаимного влияния друг на друга. Средняя температура воздуха в момент проведения экспериментального исследования составляла 38 °С. Очаги представляли собой прямоугольные металлические противни размерами 500×300×200 мм, заполненные горючей жидкостью (далее – ГЖ) – бензином АИ-92 по ГОСТ 2084–77 «Бензины автомобильные. Технические условия». Общий вид используемого замкнутого объема представлен на рисунке 2.13.





Рисунок 2.13 – Общий вид, используемого помещения

В качестве ингибирующего компонента был использован гексацианоферрат(II) калия.

Максимальная процентная концентрация соли в воде, необходимая в экспериментальном исследовании, не превышала 25 %, поэтому предварительный нагрев растворителя (воды) в условиях проведения экспериментального исследования не требовался (см. рисунок 2.4). Схема расположения очагов и устройство подачи огнетушащей среды указаны на рисунке 2.14.

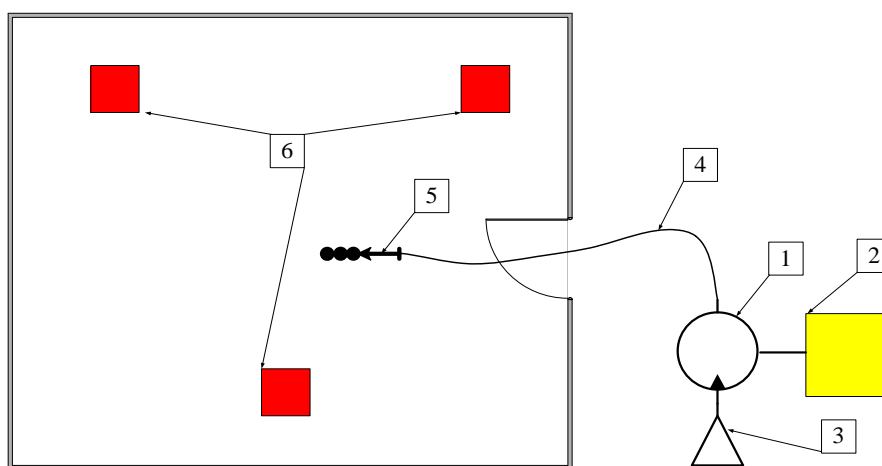


Рисунок 2.14 – Схема экспериментальной установки

1 – установка получения высокодисперсной водной среды; 2 – бак с раствором ингибирующего вещества; 3 – источник питания; 4 – гибкий резиновый шланг высокого давления; 5 – ствол получения огнетушащей среды; 6 – модельные очаги

Подача огнетушащей среды в помещение в каждой серии экспериментов начиналась спустя 60 с после начала горения (рисунок 2.15). Для создания высокодисперсной среды была использована установка высокого давления без

подогрева воды HD 13/18 S Plus, с возможность создания струй тонкораспыленной воды. Для проведения экспериментального исследования было выбрано сопло EASYForce обеспечивающее создание среды со средним диаметром капель воды 100 мкм при расходе воды 2,5 кг/с. Массовые концентрации ингибирующих солей в растворе были выбраны с учетом предыдущих исследований [98, 99, 114], (таблица 2.1).



Рисунок 2.15 – Очаг в момент начала тушения (слева) и ствол для подачи среды (справа)

Во второй серии экспериментов для каждого значения массовой концентрации ингибирующей соли в растворе воды проводили одиннадцать измерений.

Используя значение расхода огнетушащих веществ из сопла EASYForce, определим верхний предел площади зеркала горения, верхнюю границу расчетной интенсивности подачи ингибирующей соли струями водной среды по выражению 2.15. Таким образом, в рамках данного экспериментального исследования расчетное изменение интенсивности лежит на полуинтервале  $J \in (0,25; 0,6]$ .

Таблица 2.1 – Экспериментальные значения массовой концентрации и интенсивности подачи ингибирующей соли

№ п/п	Массовая концентрация, %	$J$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)
1.	2	0,12
2.	5	0,28
3.	7	0,38
4.	10	0,56
5.	12	0,66
6.	15	0,84

Окончание таблицы 2.1

№ п/п	Массовая концентрация, %	J, кг/(м <sup>2</sup> ·с)
7.	17	0,94
8.	20	1,1
9.	23	1,28
10.	25	1,38
11.	27	1,5

Результаты экспериментально найденной массовой концентрации и интенсивности подачи ингибирующей соли во второй серии экспериментов были обработаны методом математической статистики [121, 122] по формулам (2.19)–(2.22) и приведены в таблице 2.2.

Среднее арифметическое полученных результатов времени подавления очагов в замкнутом объеме определялось по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.19)$$

где  $n$  – количество измерений, шт.;  $x_i$  – значение времени подавления очага огнетушащим составом в конкретном эксперименте, с;  $i$  – порядковый номер экспериментального исследования.

Дисперсия полученных результатов измерений определялась по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (2.20)$$

Используя найденную дисперсию, было определено среднее квадратичное отклонение:

$$S(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (2.21)$$

Случайная погрешность измерений определялась в соответствии с коэффициентом Стьюдента, так как количество измерений времени подавления горения очагов для каждой концентрации ингибирующей соли не превышало  $n < 3$ :

$$\varepsilon(x) = t_n(P) S(\bar{x}), \quad (2.22)$$

где  $t_n(P)$  – коэффициент Стьюдента (таблица 7 [121]), с надежностью 99 %, при  $n = 10$  принимаем  $t_n(P) = 3,3$ .

Суммарная инструментальная погрешность электронного секундомера,

электронных весов была принята в соответствии с технической документацией:  $\theta(x) = 0,005$ . В связи с тем, что суммарная инструментальная погрешность много меньше случайной погрешности для данного экспериментального исследования, суммарная доверительная погрешность  $\Delta x$  будет определяться случайной погрешностью.

Таблица 2.2 – Значения массовой концентрации и интенсивности подачи ингибирующей соли во второй серии экспериментов

№ п/п	Массовая концентрация, %	J, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$\bar{x}$	$\sigma$	S( $\bar{x}$ )	$\varepsilon(x)$	$\Delta x$
1.	2	0,12	61,22	0,79	0,24	0,79	0,79
2.	5	0,28	46,51	0,77	0,23	0,76	0,76
3.	7	0,38	43,46	0,78	0,23	0,76	0,76
4.	10	0,56	37,12	0,78	0,23	0,76	0,76
5.	12	0,66	35,67	0,79	0,24	0,79	0,79
6.	15	0,84	35,43	0,78	0,23	0,76	0,76
7.	17	0,94	33,33	0,78	0,23	0,76	0,76
8.	20	1,1	33,27	0,77	0,23	0,76	0,76
9.	23	1,28	32,54	0,78	0,23	0,76	0,76
10.	25	1,38	32	0,78	0,23	0,76	0,76
11.	27	1,5	32	0,79	0,24	0,79	0,79

Экспериментальные значения интенсивности подачи ингибирующей соли были рассчитаны по формуле (2.18) в соответствии с массовой концентрацией ингибирующих солей и расходом воды используемой установки (таблица 2.3). Полученные экспериментальные значения после обработки методом математической статистики, а также установленные расчетом значения, были занесены в таблицу 2.3 и построены соответствующие зависимости (рисунок 2.16).

Таблица 2.3 – Расчетные значения и данные экспериментального исследования

№ п/п	Массовая концентрация, %	J, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$t_p$ , с	$t_{эи}$ , с	$q_p$ , кг/м <sup>2</sup>	$q_{эи}$ , кг/м <sup>2</sup>
1.	2	–	–	61,22	18,77	7,32
2.	2,52	–	–	–	14,76	0
3.	2,88	–	–	–	13,75	0
4.	3,24	–	–	–	13,49	0
5.	3,6	–	–	–	13,55	0

Продолжение таблицы 2.3

№ п/п	Массовая концентрация, %	J, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	t <sub>p</sub> , с	t <sub>эи</sub> , с	Q <sub>p</sub> , кг/м <sup>2</sup>	Q <sub>эи</sub> , кг/м <sup>2</sup>
6.	3,96	–	–	–	13,77	0
7.	4,32	–	–	–	14,10	0
8.	4,68	0,26	55,71	–	14,48	0
9.	5	0,28	53,27	46,51	14,91	12,88
10.	5,4	0,3	51,26	–	15,38	0
11.	5,76	0,32	49,58	–	15,86	0
12.	6,12	0,34	48,14	–	16,37	0
13.	6,48	0,36	46,91	–	16,89	0
14.	7	0,38	45,84	43,46	17,42	16,34
15.	7,2	0,4	44,89	–	17,96	0
16.	7,56	0,42	44,06	–	18,50	0
17.	7,92	0,44	43,31	–	19,06	0
18.	8,28	0,46	42,64	–	19,61	0
19.	8,64	0,48	42,03	–	20,18	0
20.	9	0,5	41,49	–	20,74	0
21.	9,36	0,52	40,98	–	21,31	0
22.	9,72	0,54	40,53	–	21,88	0
23.	10	0,56	40,11	37,12	22,46	20,72
24.	10,44	0,58	39,72	–	23,04	0
25.	10,8	0,6	39,36	–	23,62	0
26.	11,16	–	–	–	24,20	0
27.	11,52	–	–	–	24,78	0
28.	12	–	–	35,67	25,36	23,1
29.	12,24	–	–	–	25,95	0
30.	12,6	–	–	–	26,53	0
31.	12,96	–	–	–	27,12	0
32.	13,32	–	–	–	27,71	0
33.	13,68	–	–	–	28,30	0
34.	14,04	–	–	–	28,89	0
35.	14,4	–	–	–	29,48	0

Продолжение таблицы 2.3

№ п/п	Массовая концентрация, %	J, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	t <sub>p</sub> , с	t <sub>эи</sub> , с	Q <sub>p</sub> , кг/м <sup>2</sup>	Q <sub>эи</sub> , кг/м <sup>2</sup>
36.	14,76	–	–	–	30,07	0
37.	15	–	–	35,43	30,66	29,9628
38.	15,48	–	–	–	31,25	0
39.	15,84	–	–	–	31,84	0
40.	15,84	–	–	–	31,84	0
41.	16,2	–	–	–	32,44	0
42.	16,56	–	–	–	33,03	0
43.	17	–	–	33,33	33,62	31,4242
44.	17,28	–	–	–	34,22	0
45.	17,64	–	–	–	34,81	0
46.	18	–	–	–	35,41	0
47.	18,36	–	–	–	36,00	0
48.	18,72	–	–	–	36,60	0
49.	19,08	–	–	–	37,19	0
50.	19,44	–	–	–	37,79	0
51.	20	–	–	33,27	38,38	36,597
52.	20,16	–	–	–	38,98	0
53.	20,52	–	–	–	39,58	0
54.	20,88	–	–	–	40,18	0
55.	21,24	–	–	–	40,77	0
56.	21,6	–	–	–	41,37	0
57.	21,96	–	–	–	41,97	0
58.	22,32	–	–	–	42,56	0
59.	22,68	–	–	–	43,16	0
60.	23	–	–	32,54	43,76	41,6
61.	23,4	–	–	–	44,36	0
62.	23,76	–	–	–	44,96	0
63.	24,12	–	–	–	45,55	0
64.	24,48	–	–	–	46,15	0
65.	25	–	–	32	46,75	44,16

Окончание таблицы 2.3

№ п/п	Массовая концентрация, %	J, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	t <sub>p</sub> , с	t <sub>эи</sub> , с	q <sub>p</sub> , кг/м <sup>2</sup>	q <sub>эи</sub> , кг/м <sup>2</sup>
66.	21,6	–	–	–	41,37	0
67.	21,96	–	–	–	41,97	0
68.	22,32	–	–	–	42,56	0
69.	22,68	–	–	–	43,16	0
70.	23	–	–	32,54	43,76	41,6
71.	23,4	–	–	–	44,36	0
72.	23,76	–	–	–	44,96	0
73.	24,12	–	–	–	45,55	0
74.	24,48	–	–	–	46,15	0
75.	25	–	–	32	46,75	44,16
76.	25,2	–	–	–	47,35	0
77.	25,56	–	–	–	47,95	0
78.	25,92	–	–	–	48,55	0
79.	26,28	–	–	–	49,15	0
80.	26,64	–	–	–	49,75	0
81.	27	–	–	32	50,35	48

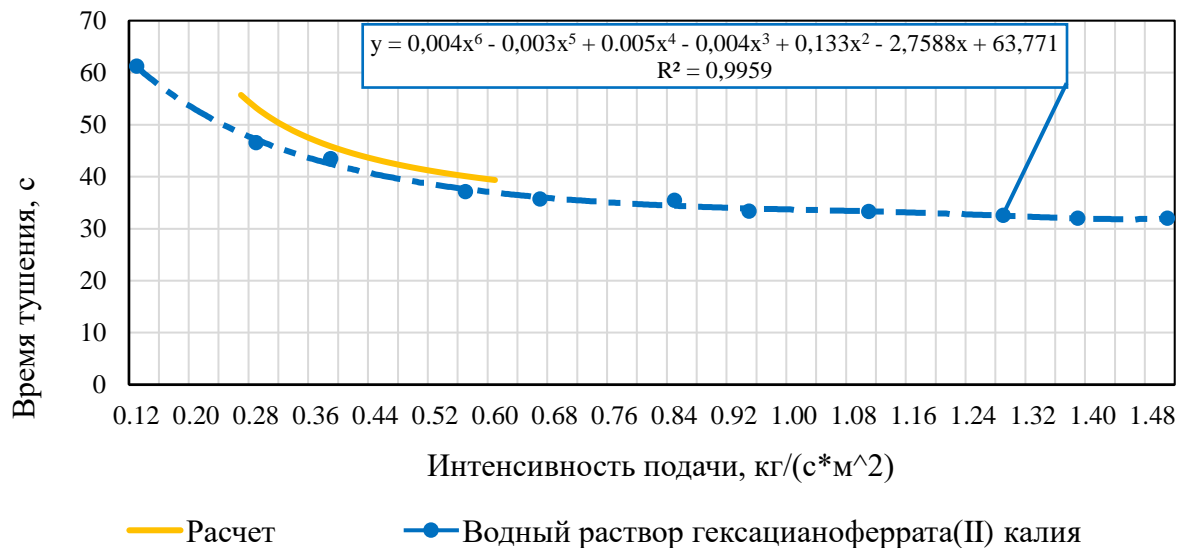


Рисунок 2.16 – График зависимости времени подавления газофазного горения модельных очагов в зависимости от интенсивности подачи ингибирующей соли

Согласно проведенным расчетам, уравнение (2.17) имеет погрешность 15 %, таким образом, рассчитываемые данные не должны отличаться от найденных экспериментальных более чем на 15 % (рисунок 2.17).

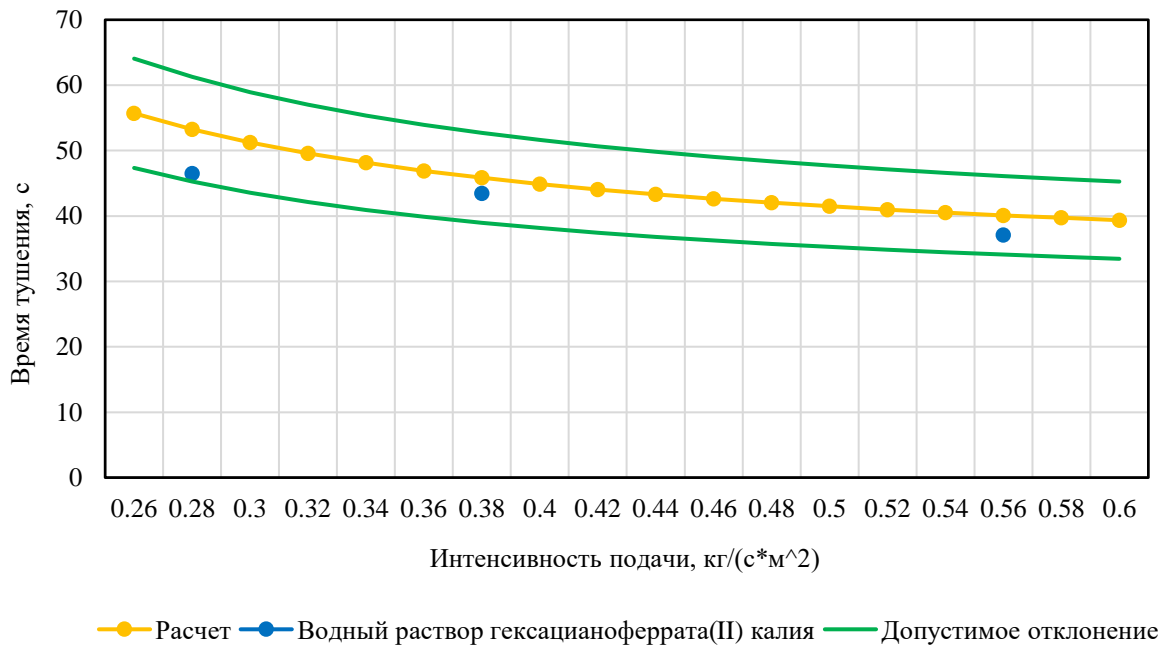


Рисунок 2.17 – График допустимого отклонения экспериментальных данных от расчетных

Результаты экспериментальных исследований были обработаны методом регрессионного анализа, коэффициент корреляции для экспериментальных исследований составил более 0,99. Эффективные интенсивности подачи ингибирующей соли в замкнутый объем для второй серии экспериментов были определены методом дифференциального анализа уравнения функций.

Перепишем уравнение, описывающее зависимость времени подавления очагов водным раствором ингибирующей соли, найдем последовательно вторую производную и определим наименьшее значение  $x$ , при котором вторая производная равна нулю:

$$f(x) = 0 \quad y = 0,004x^6 - 0,003x^5 + 0,005x^4 - 0,004x^3 + 0,133x^2 - 2,7588x + 63,771; \quad (2.23)$$

$$f''(x) = 3 \cdot 10^{-8}x^4 - 1,512 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,0009x^2 + 0,0231x + 0,2588. \quad (2.24)$$



Наименьшее значение  $x$ , при котором вторая производная обращается в ноль, равно 0,78, таким образом экспериментальное значение МГК для подавления очагов водным раствором ингибирующей соли равно 0,78 кг/(с·м<sup>2</sup>), в переводе в объемную это 4,68 г/м<sup>3</sup>.

Среднее время тушения по сравнению с подачей воды без ингибирующей соли было снижено в 1,61 раза и составило 38,26 с, а МГК, определенная методом дифференциального анализа, составила 4,68 г/м<sup>3</sup>. Расхождение полученных экспериментальных данных с расчетными значениями времени подавления не превышает 0,08, начиная с водного раствора, имеющего 7 % концентрацию ингибирующей соли. Для концентраций 2 и 5 % расхождение между значениями времени подавления очагов связано с тем, что в расчете не учитывается процесс конденсации капель водной среды на стенах помещения, что имеет существенное значение при малых концентрациях ингибирующей соли в водном растворе. Увеличение процентной концентрации ингибирующей соли от 7 до 15 % сопровождалось скачкообразным уменьшением времени тушения, однако при дальнейшем увеличении процентной концентрации ингибитора от 15 до 27 % практически не повлияло на изменение времени тушения, это позволяет утверждать, что МГК реализуется при 15 % массовой концентрации соли в водном растворе.

Таким образом, на основании экспериментально установленных МГК для ингибирующей соли и параметров установки для получения ТАВ необходимо подобрать устройство дозирования химических ингибиторов.

## **2.3 Выбор способа и устройства дозирования химических ингибиторов горения для создания температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами**

Выбор способа и устройства дозирования необходимо провести на основе оценки методов дозирования с учетом особенностей получения ТАВ. Существуют три основных характерных участка при подаче ТАВ, где можно производить дозирование химических ингибиторов:

- в недогретую воду до критического сечения [17, 21];
- в критическое сечение в момент взрывного вскипания [18, 19];
- в среду ТАВ после взрывного вскипания [18, 21].

Дозирование химических ингибиторов до критического сечения в среду недогретой воды может быть осуществлено с помощью насосов-дозаторов. Преимуществом данного способа является возможность обеспечения относительно однородного раствора, благодаря движению турбулизированного потока недогретой воды в рукавах до ствола. Кроме того, при реализации данного способа отсутствует необходимость усложнения конструкции стволов для подачи ТАВ, что обеспечит высокую мобильность личного состава подразделений пожарной охраны, работающего со стволом. Недостатком данного способа является то, что используемые дозирующие устройства должны создавать давление на выходе из напорного патрубка не менее 2 МПа, так давление в рукавных линиях при подаче недогретой воды может достигать данного значения [17, 18, 21]. Возможная схема дозирования химических ингибиторов докритического сечения представлена на рисунке 2.18.

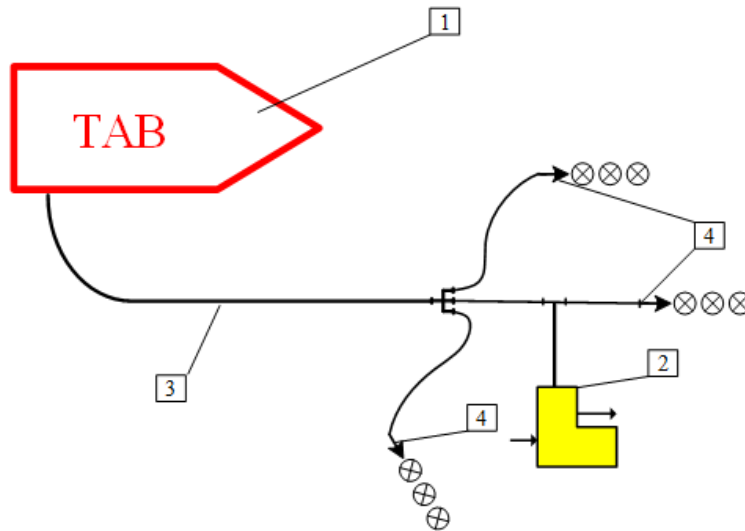


Рисунок 2.18 – Вариант схемы дозирования химических ингибиторов докритического сечения: 1 – установка получения ТАВ; 2 – устройства дозирования с емкостью для раствора ингибитора; 3 – рукав с недогретой водой; 4 – стволы подачи ТАВ и ТАВ с ингибитором.

Реализация способа дозирования в критическое сечение требует дополнительного исследования физико-химических процессов, происходящих при взрывном вскипании [17–19]. Дозирование химических ингибиторов после критического сечения возможно, однако реализация данного способа связана с конструктивными изменениями ствола для подачи ТАВ и увеличением массы, что будет осложнять проведение оперативно-тактических мероприятий в замкнутом пространстве ГКС при тушении пожаров. Таким образом, наиболее актуальным в данном исследовании является реализация способа дозирования химических ингибиторов до критического сечения.

Рассмотрим основные методы дозирования реагентов в жидкость при использовании схемы дозирования в докритическое сечение (рисунок 2.19) [123, 124].

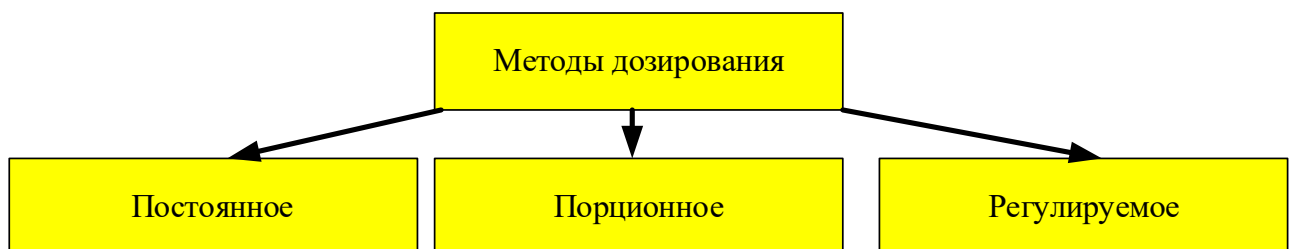


Рисунок 2.19 – Основные применяемые методы дозирования

Постоянный метод дозирования применяют для процессов, где необходима

высокая точность дозирования с отсутствием пульсаций потока, преимущество данного метода заключается в том, что создается относительно однородный раствор в любой промежуток времени. Порционное дозирование обеспечивает создание растворов относительно однородных растворов при условии, что промежуток времени между циклами дозирования много меньше необходимого времени дозирования. Основным определяющим фактором приведенных выше методов является период времени, в течение которого реализуется дозирование. Дозирующие устройства, реализующие постоянный метод дозирования, крупногабаритны, поэтому их использование на мобильных средствах пожаротушения не целесообразно. Согласно [46, 65], нормативное время тушения пожаров объемным способом не должно превышать 15 мин, таким образом, при использовании порционного дозирования необходимо выполнение следующего условия:

$$t \ll 15, \quad (2.25)$$

где  $t$  – время в течение которого реализуется дозирование, мин.

Для реализации данного способа дозирования в совокупности с указанными характеристиками выбран агрегат электронасосный дозировочный одноплунжерный (далее – устройство дозирования), предназначенный для объемного напорного дозирования нейтральных и агрессивных жидкостей, эмульсий и суспензий с кинематической вязкостью от  $3,5 \cdot 10^{-7}$  до  $8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. Общий вид используемого дозатора и металлического смесителя для подключения дозатора к рукавной линии представлены на рисунке 2.20.



Рисунок 2.20 – Образец выбранного дозатора (слева) и смесителя (справа)

Основные параметры выбранного дозатора представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Основные характеристики дозатора

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1.	Предельная плотность дозируемых жидкостей	2000 кг/м <sup>3</sup>
2.	Рабочая температура дозируемых жидкостей	258–473 К
3.	Максимальная плотность твердых неабразивных частиц	2300 кг/м <sup>3</sup>
4.	Допустимая величина твердой неабразивной фазы от диаметра условного прохода присоединительных патрубков	Не более 1 %
5.	Создаваемое давление на выходе из напорного патрубка	4 МПа
6.	Максимальный массовый расход дозируемой жидкости за один ход плунжера	Не менее 110 г/с

Выбранный дозатор можно применять для создания ТАВ с ингибирующими свойствами для проведения оперативно-тактических мероприятий на энергетических объектах ГКС при тушении пожаров. Однако следует ожидать, что эффективные параметры дозирования ингибиторов в среде ТАВ будут отличными от воды, взятой при нормальных условиях. Это связано с тем, что физико-химические параметры среды ТАВ могут оказывать влияние на химический состав веществ. Более того, при пожарах ГКС в 60 % случаев, автоматика управления воспринимает нарушение в электроснабжении во время пожара как сигнал к включению дизельной электростанции [2, 3, 10, 12, 42, 43], что может создавать условия поражения личного состава подразделений пожарной охраны электрическим током при тушении пожаров. Проведенные исследования в работах [34, 41, 54] показали, что тушение установок под напряжение струями ТАВ электробезопасно, однако дозирование ингибирующей соли в недогретую воду может привести к снижению комплексного сопротивления струй ТАВ.

Таким образом, для экспериментального исследования способа объемного пожаротушения ТАВ с ингибирующими свойствами необходимо установить эффективные параметры дозирования ингибиторов в недогретую воду и оценить электробезопасность струй ТАВ с ингибирующими свойствами.

## Выводы по второй главе

1. На основе теории РЦП горения, энергетических характеристик функциональных радикальных групп, образующихся при горении предельных углеводородов, используя вероятностную модель Байеса, была разработана вероятностная модель разветвленно-цепного горения предельных углеводородов на энергетических объектах ГКС. Установлены функциональные радикальные группы, которые с большей вероятностью приводят к наступлению РЦП горения. Определен водорастворимый ингибирующий состав, обладающий наибольшей энергетической способностью к блокированию установленных функциональных радикальных групп – гексацианоферрат калия(II).

2. Рассмотрены основные параметры струй ТАВ. Сделан вывод о необходимости подачи в зону пламенного горения водной среды с ингибирующими свойствами, содержащей максимальное количество капель с минимальным диаметром. Таким образом, для проведения повышения эффективности ингибирования РЦП горения необходимо использовать стволы подачи ТАВ с насадком-распылителем вида сопло Лавалья. Было отмечено, что применение ингибирующих солей блокирует развитие взаимодействия активных частиц с исходными веществами, но не предотвращает их возникновение.

3. Экспериментально установлено повышение эффективности подавления пламенного горения в замкнутом объеме более чем в 1,5 раз при дозировании гексацианоферрата калия(II) по сравнению с подачей воды без добавок. Методом дифференциального анализа с помощью полученных экспериментальных данных определена минимальная гасящая концентрация ингибирующей соли: водный раствор гексацианоферрата калия(II) – 4,68 г/м<sup>3</sup>.

4. На основе установленных МГК и основных параметров струй ТАВ выбран порционный способ и устройство дозирования химических ингибиторов горения – агрегат электронасосный дозировочный одноплунжерный для создания температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами.

# ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ОБЪЕМНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-АКТИВИРОВАННОЙ ВОДОЙ С ИНГИБИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

## 3.1 Экспериментальное исследование эффективных параметров дозирования ингибиторов в недогретую воду

Экспериментальные исследования, описанные в разделе 2.2, позволили подтвердить справедливость разработанной вероятностной модели РЦП горения предельных углеводородов и повысить эффективность объемного тушения пожаров высокодисперсными водными растворами с ингибирующими свойствами. Однако установленные МГК для высокодисперсных водных растворов могут быть отличными при использовании установки для получения ТАВ, так как в критическом сечении ствола для подачи ТАВ происходит процесс взрывного вскипания, который может создавать условия для перехода части ингибирующего состава в паровую фазу. Согласно исследованиям [125–127], паровая фаза обладает собственной ингибирующей способностью поэтому на первом этапе исследования необходимо провести экспериментальное определение эффективных параметров дозирования ингибирующих солей при поверхностном тушении струями ТАВ, что позволит максимально снизить ингибирующий эффект паровой фазы.

Для достижения данной цели была разработана программа экспериментального исследования по тушению модельных очагов класса А и класса В (Приложение В, [128]). При проведении экспериментальных исследований регистрировались следующие параметры:

- удельный расход недогретой воды,  $q_T$ , г/(м<sup>2</sup>·с);
- интенсивность подачи недогретой воды,  $I_T$ , г/(м<sup>2</sup>·с);

- содержание гексацианоферрата(II) калия в ТАВ, %;
- время тушения очагов,  $t_{\text{тг}}$ , с.

Экспериментальное исследование проводили на открытой асфальтированной площадке. Для исследования эффективных параметров дозирования солей при тушении пожаров различных классов были использованы очаги класса 10 А и 144В по ГОСТ Р 51105 [129].

Средняя температура воздуха при проведении экспериментального исследования составляла 38 °С. Принципиальная схема подключения оборудования представлена на рисунке 3.1.

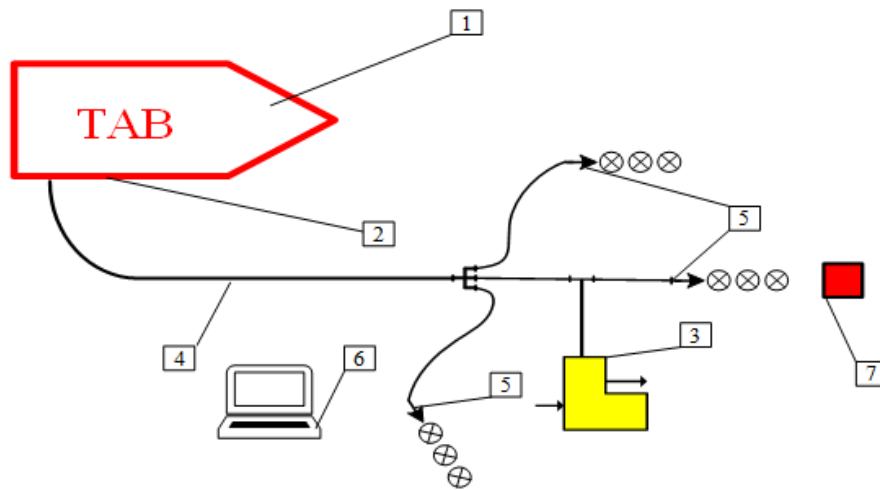


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема подключения оборудования:

1 – установка получения ТАВ; 2 – устройство регистрации давления и температуры недогретой воды; 3 – устройство дозирования с емкостью для раствора ингибитора; 4 – рукав с недогретой водой; 5 – стволы подачи ТАВ и ТАВ с ингибитром; 6 – персональный компьютер для регистрации результатов; 7 – модельный очаг (класса А или В).

Эксперименты проводили в соответствии с разработанной программой (см. Приложение В) с использованием разработанного устройства дозирования и специальным фильтром для задерживания крупных кристаллов соли и твердых абразивных частиц (рисунок 3.2).





Рисунок 3.2 – Переносной дозатор (слева) и фильтр (справа)

Для проведения экспериментальных исследований был выбран модельный очаг пожара класса 10А, представляющий собой деревянный штабель в виде куба (рисунок 3.3).

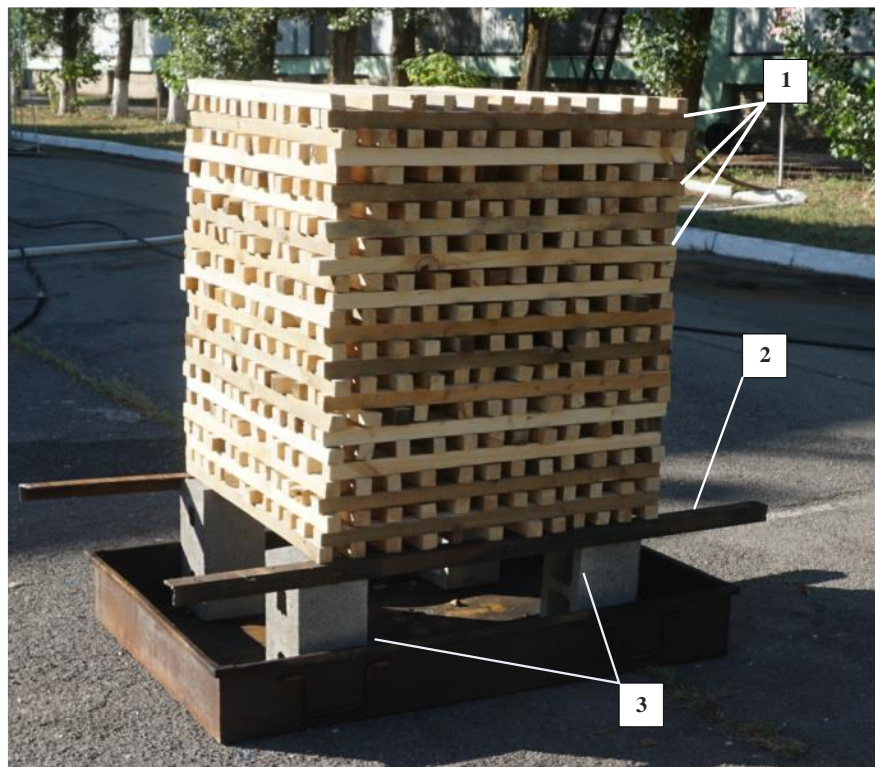


Рисунок 3.3 – Модельный очаг пожара класса 10А

В качестве горючего материала были использованы бруски хвойных пород первого сорта по ГОСТ 8486–86 «Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия» сечением 40×40 мм. Влажность пиломатериала была не более 15 %. Размеры металлического поддона, который был помещен под деревянный штабель, объемные характеристики для горючей жидкости и воды были выбраны

в соответствии с [129]. Перед проведением экспериментального исследования в поддон была залита вода, полностью закрывающая днище, далее на слой воды был налит автомобильный бензин, соответствующий требованиям таблице 3.2, представленной в ГОСТ Р 51105 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Процесс подготовки модельного очага 10А (слева) и его поджог (справа)

Поддон был помещен под штабель, таким образом, что центры штабеля и поддона совпали. До момента начала процесса подавления горения выдерживалось 9 мин устойчивого горения. С момента подачи огнетушащей среды до полного подавления горения модельных очагов 10А проходило не более 10 мин. Повторного возгорания не происходило.

Во второй серии экспериментов был использован модельный очаг 144В, состоящий из трех прямоугольных стальных противней (рисунок 3.5) диаметром 1000×1500 мм, высотой борта 200 мм и площадью 4,5 м<sup>2</sup> [129]. В качестве горючего материала применялся автомобильный бензин, соответствующий требованиям ГОСТ Р 51105.





а



б

Рисунок 3.5 – Модельный очаг пожара класса 144В: а – измерение высоты борта поддона; б – измерение ширины поддонов для проведения экспериментов.

Установка противней горизонтальным способом позволяла подавать огнетушащий состав равномерно со всех сторон. В противни в равном объеме была залита вода и автомобильный бензин, суммарным объемом равным табличному значению для модельного очага 144В [129], при этом было обеспечена сплошная поверхность воды, закрывающая неровности дна противней (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Порционное смешивание воды (слева) и бензина (справа) для модельного очага 144В

Поджог осуществлялся с помощью факела, тушение начиналось спустя 60 с свободного горения. Во всех сериях эксперимента очаг был потушен и повторного воспламенения не произошло.

Для каждого из модельных очагов были проведены три серии экспериментальных исследований. В качестве ингибирующего агента был выбран гексацианоферрат(II) калия. Тушение модельных очагов в первой серии

экспериментов проводилось струями ТАВ. Во второй серии экспериментального исследования тушение было проведено струями ТАВ с дозированием в недогретую воду раствора ингибирующих веществ так, что в недогретой воде создавалась МГК. В третьей серии экспериментального исследования тушение было проведено струями ТАВ с дозированием гексацианоферрата(II) калия в недогретую воду и ее последующей электромагнитной обработкой. Растворы готовили из кристаллогидрата  $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ . Тушение модельных очагов происходило с наветренной стороны. При тушении очагов 10А последовательно проводилось тушение каждого слоя, начиная с нижнего.

Оценкой времени тушения модельных очагов было установлено, что дозирование ингибирующих веществ в недогретой воде не влияет на огнетушащую способность струй ТАВ при поверхностном тушении очагов класса А и несущественно влияет на огнетушащую способность поверхностного тушения очагов класса В. Было установлено, что МГК гексацианоферрата(II) калия при ее дозировании в недогретую воду не соответствует экспериментально значению 3,5 %, установленному в работе [98] и п. 2.2 настоящей работы. Однако подобные выводы могут быть ошибочны, в силу того, что количество опытов в каждой серии экспериментов не превышало трех. Поэтому для подтверждения либо опровержения суждения о том, что дозирование ингибирующих веществ заданной концентрации в недогретую воду существенно не влияет на ингибирующую способность струй ТАВ, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований. Таким образом, можно предположить, что процесс ингибирования раствором гексацианоферрата(II) калия запускается при концентрациях, превышающих экспериментально установленные в п. 2.2. Для этого со ствола были взяты растворы ТАВ с ингибирующим веществом при различной температуре. Каждому из растворов был присвоен номер в порядке возрастания температуры взятия (рисунок 3.7, таблица 3.1).

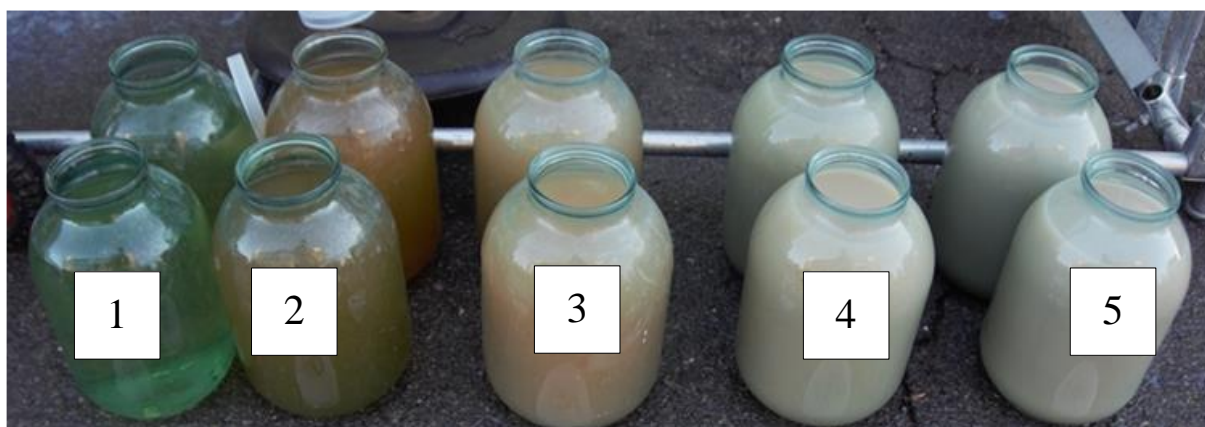


Рисунок 3.7 – Растворы ингибитора и температурно-активированной вода с концентрацией 5 % при различной температуре:

1 – 120 °С; 2 – 140 °С; 3 – 160 °С; 4 – 180 °С; 5 – 190 °С

Таблица 3.1 – Образцы 5%-го раствора гексацианоферрата(II) калия после взрывного вскипания в ТАВ при различных температурах

Номер образца	1	2	3	4	5
Температура, °С	120	140	160	180	190

Установлено, что в зависимости от повышения температуры изменяется окраска растворов – от прозрачного с желтым оттенком (номер образца 1) до мутного с белым оттенком (номер образца 5). Для установления причины подобного поведения жидкости при нагревании существует гравиметрический метод идентификации [128]. Перед его проведением твердый осадок во всех образцах был удален методом фильтрации, а жидкости перелиты в мерные емкости (рисунок 3.8).

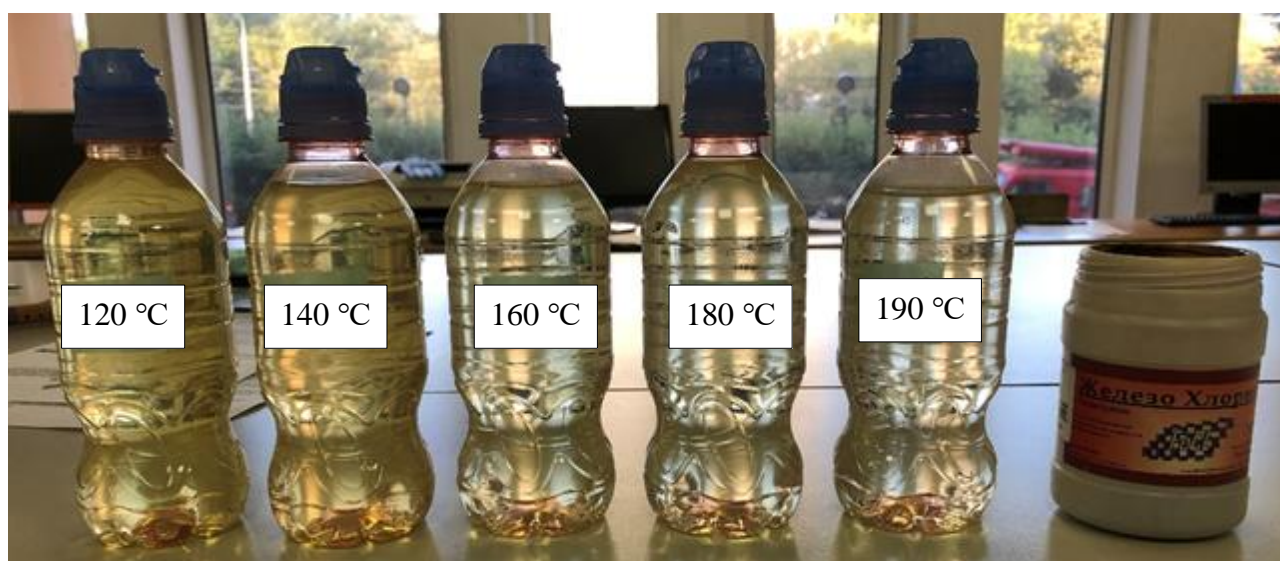
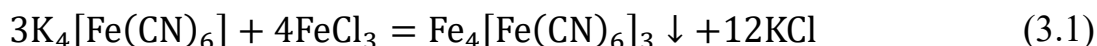


Рисунок 3.8 – Образцы температурно-активированной воды после полного осаждения твердофазного осадка и его удаления с помощью фильтрации

Теоретически процесс гравиметрического определения осадка может быть описан следующим уравнением химической реакции:



Концентрация  $3\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  в данном случае определяется по массе осадка берлинской лазури с характерным синим цветом  $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ . (рисунок 3.9).

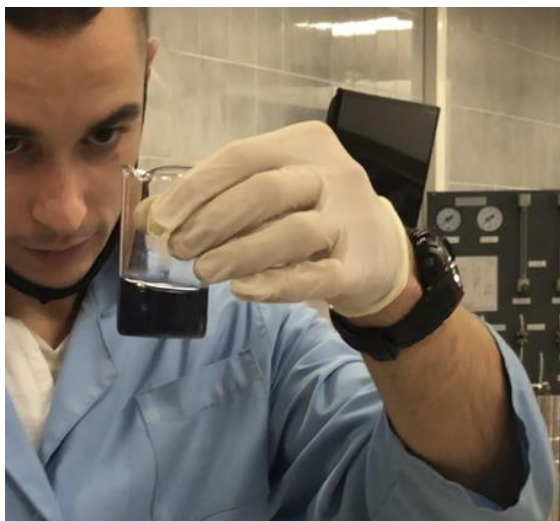


Рисунок 3.9 – Осадок нерастворимой берлинской лазури в образце 1

Концентрацию  $3\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  в исследуемом образце можно определить следующей зависимостью:

$$m_{\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3} = \frac{M(\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6])m_{\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3}}{3M(\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3)}, \quad (3.2)$$

где  $m_{\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3}$  – масса  $3\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  в исследуемом растворе на 100 мл раствора, г;  $M(\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6])$  – молярная масса гексацианоферрата(II) калия, г/моль;  $m_{\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3}$  – масса полученного сухого осадка, полученного осаждением из 100 мл исследуемого раствора, ( $\rho = 1,00 \text{ г/см}^3$ ), г;  $M(\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3)$  – молярная масса гексацианоферрата(II) железа(III) (нерастворимый осадок берлинской лазури), г/моль.

После проведения расчетов по формуле (3.2), переведем полученные значения масс соли  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  в долю от ее первоначальной концентрации в растворе ТАВ и построим зависимость снижения концентрации ингибирующего вещества в растворе от температуры струй ТАВ (рисунок 3.10).



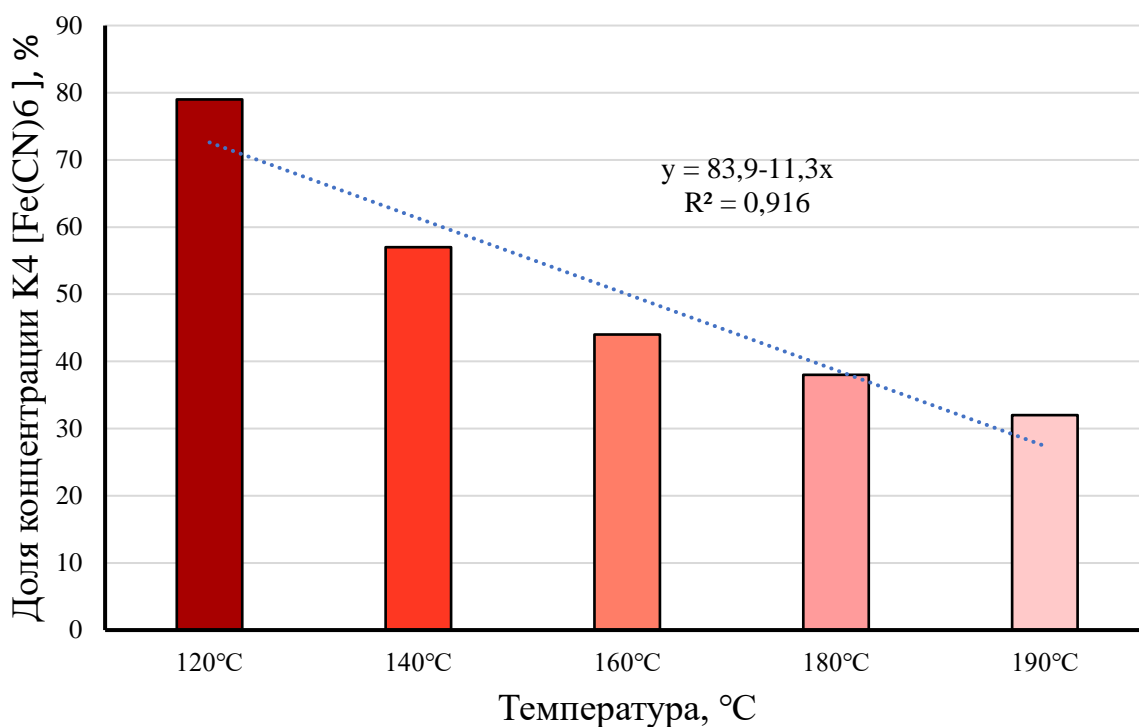


Рисунок 3.10 – График снижения концентрации ингибирующей соли в растворе от температуры струй температурно-активированной воды:

$\omega$  – массовая доля активного ингибирующего вещества

Установлено, что при дозировании ингибирующих солей калия в среду ТАВ при температуре более 120 °C происходит частичное разрушение химической структуры соли, которое приводит к снижению ингибирующей способности состава и увеличивает время подавления пламенного горения очагов. Для сохранения требуемой ингибирующей способности раствора необходимо дозировать ингибирующие составы сверх установленной МГК, определять величину дополнительного дозирования необходимо в соответствии с температурным режимом работы установки и установленной зависимостью (см. рисунок 3.10).

### 3.2 Экспериментальное исследование электропроводимости струй температурно-активированной воды при дозировании ингибирующих солей

Приведенные статистические данные в п. 1.1.2 и 1.3 и их анализ свидетельствуют, что при тушении пожаров на объектах ГКС может существовать реальная угроза поражения личного состава электрическим током. Экспериментально установлено, что струи ТАВ электробезопасны при тушении электроустановок, находящихся под напряжением [34, 118]. Однако при дозировании ингибирующих солей соответствующих концентраций в среду ТАВ может произойти повышение ее электропроводимости, что может привести к поражению личного состава подразделений пожарной охраны электрическим током при тушении пожаров электроустановок, находящихся под напряжением. Таким образом, необходимо экспериментально проверить электробезопасность струй ТАВ при добавлении в них ингибирующих веществ.

Удельная электропроводимость струй ТАВ (УЭТАВ) может быть описана следующей зависимостью [130]:

$$\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = \sigma_{\text{п}} \frac{\sigma_{\text{в}}(1 + 2C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})) + 2\sigma_{\text{п}}(1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))}{(1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\sigma_{\text{в}} + (2 + C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\sigma_{\text{п}}}, \quad (3.3)$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  — УЭТАВ капельной фазы, См/м;  $\sigma_{\text{п}}$  — УЭТАВ паровой фазы, См/м;  $C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})$  — нормированная к единице объемная концентрация полидисперсной фазы, зависящая от длины  $l_{\text{полн}}$  струи ТАВ.

Из выражения (3.3) видно, что УЭТАВ зависит от концентрации капельной фазы в струе ТАВ и размера капель и обратно связано с концентрацией паровой фазы. Справедливо предположение, что дозирование ингибирующих солей, которые переносятся в очаг капельной средой ТАВ, приведет к повышению электропроводимости струй [130]. Для проверки данного предположения необходимо провести серию экспериментальных исследований на опытно-экспериментальном стенде (рисунок 3.11).





Рисунок 3.11 – Опытно-экспериментальный стенд для проведения исследований по электропроводимости струй температурно-активированной воды

Для проведения установления УЭТАВ был выбран ствол подачи ТАВ, идентифицированный в п. 2.1.2 настоящего диссертационного исследования, как наиболее эффективный для тушения пожаров в замкнутых объемах ГКС с расходом 1 кг/с. Дозирование ингибирующих составов осуществлялось дозатором, создавая концентрацию 25 % в струях ТАВ, которая является эффективной при условии разрушения части ингибирующего вещества на высокотемпературных режимах работы установки получения ТАВ. Измерения были проведены в трех контрольных точках на расстоянии 0,3, 2 и 4 м от среза ствола до точек измерения [130]. Обработанные результаты исследований представлены на рисунке 3.12.

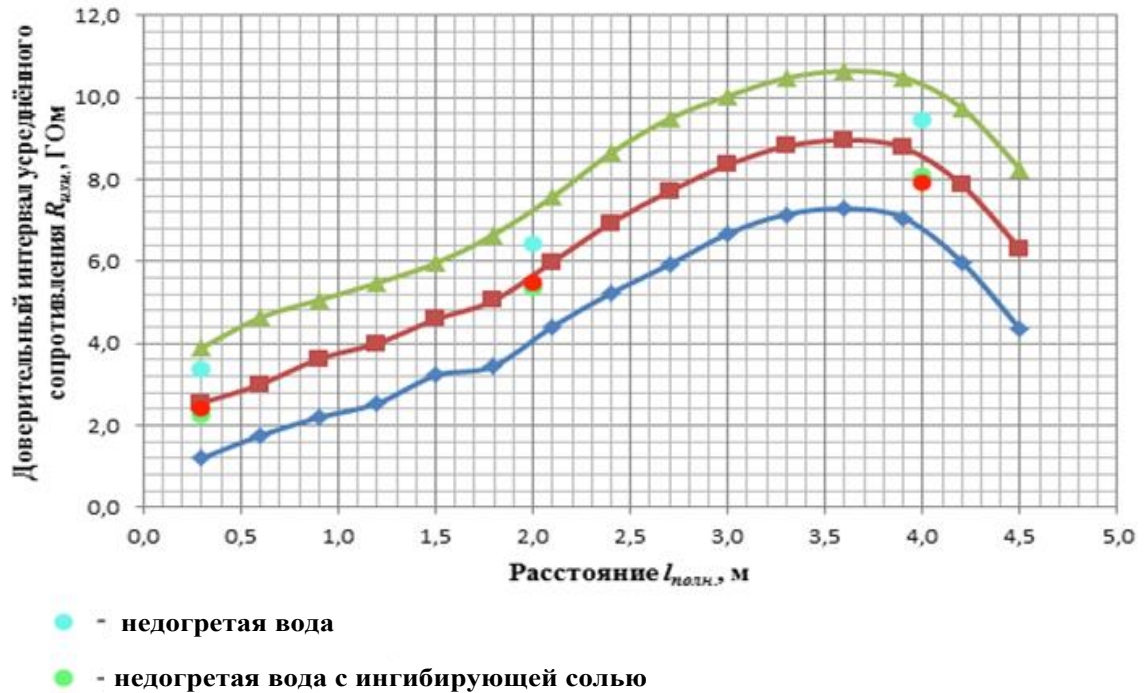


Рисунок 3.12 – Результаты измеренного усредненного сопротивления  $R_{изм}$  ствола для подачи температурно-активированной воды

Добавление ингибирующих солей в среду ТАВ приводит к увеличению ее проводимости не более чем на 4 %, что позволяет сделать вывод, что использование струй ТАВ с ингибирующими свойствами при тушении электроустановок, находящихся на территории ГКС, безопасно для личного состава подразделений пожарной охраны.

### **3.3 Перспективы применения температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами для тушения замкнутых объемов газокompрессорных станций**

#### **3.3.1 Экспериментальное исследование эффективности применения температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами при тушении замкнутых объемов**

В соответствии с полидисперсной структурой капельной среды температурно-активированной воды для тушения пожара разлива судового масла машинного зала газокompрессорной станции (рисунок 2.12) установлено, что наиболее эффективное объемное тушение пожаров будет обеспечено при плотности распределения капель среднего диаметра около 40 %, т. е. капли среднего диаметра должны быть близки к математическому ожиданию реально получаемой среды. Однако сделанные расчеты не позволяют смоделировать процесс объемного тушения пожара струями ТАВ. Для проведения моделирования объемного пожаротушения струями ТАВ был выбран программно-аппаратный комплекс PyroSim [8]. На первом этапе была создана модель ТАВ с качественными параметрами, на втором выбран реальный объект, определены его геометрические характеристики, проведен натурный эксперимент по объемному тушению модельных очагов в данном объекте [8]. После проведения натуральных экспериментов в программно-аппаратном комплексе PyroSim было смоделирован идентичный объект и условия проведения натурального экспериментального исследования [8]. Термопары, регистрирующие температуру, в натурном эксперименте и моделировании находились в одних и тех же точках объекта исследования. Визуализация процесса пожаротушения ТАВ с эффективными параметрами была получена в программно-аппаратном комплексе PyroSim [8] и представлена на рисунке 3.13.

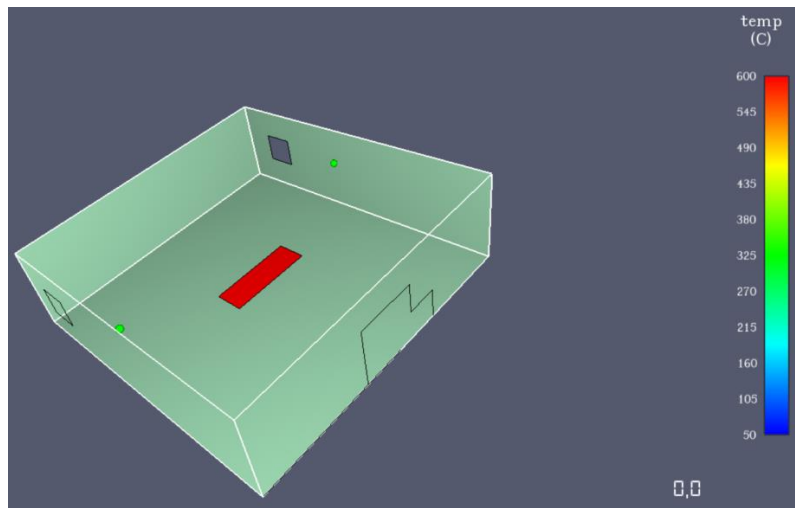
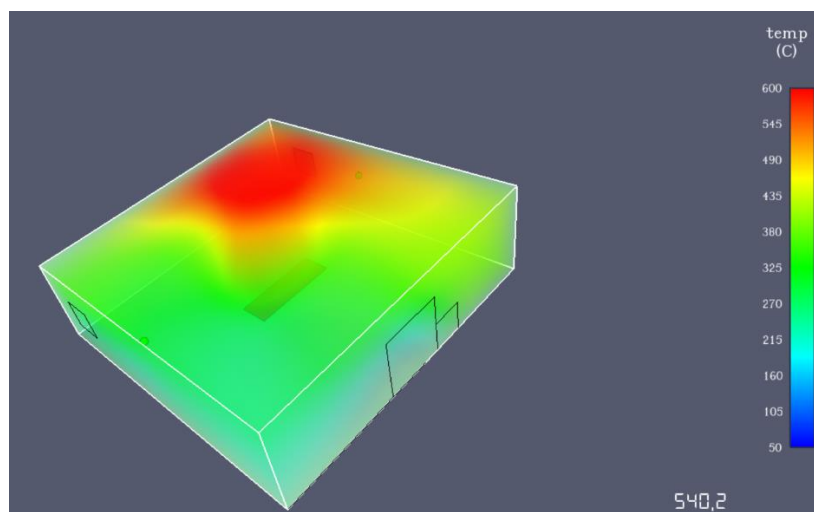
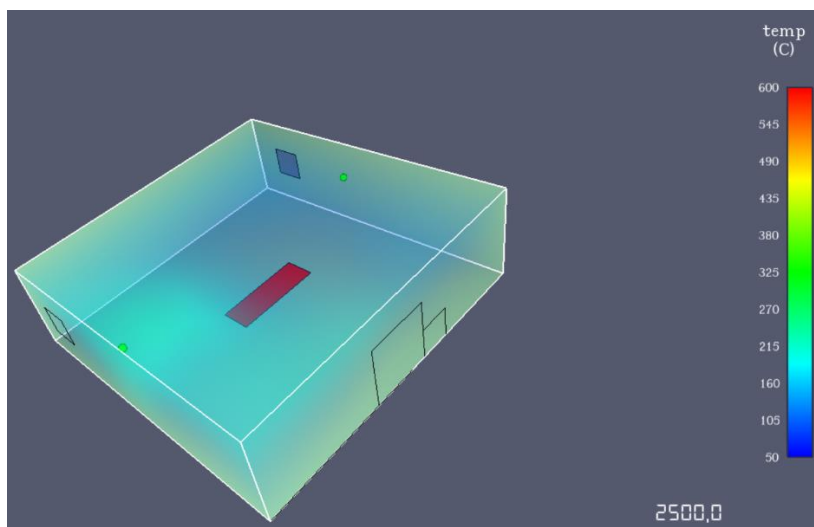
*a**б**в*

Рисунок 3.13 – Распределение полей температур в помещении процессе тушения струями температурно-активированной воды с эффективными параметрами:

*a* – 0 с; *б* – 540 с; *в* – 2500 с

Схема расположения приборов и АПМ при организации натурального эксперимента приведена на рисунке 3.14.

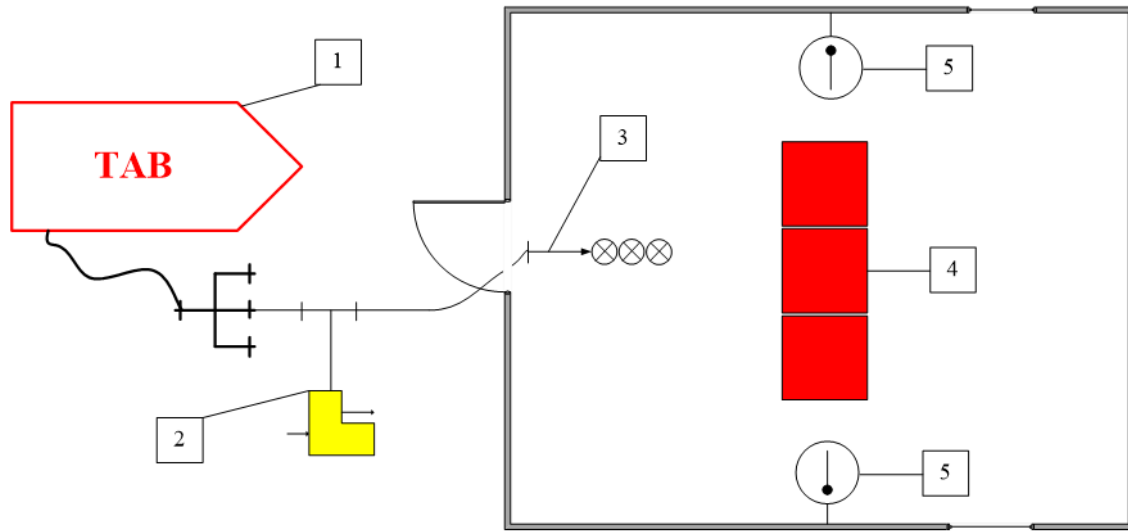


Рисунок 3.14 – Схема расположения приборов и автомобиля пожарного многоцелевого (далее – АПМ) при организации натурального эксперимента:

1 – АПМ; 2 – устройство дозирования; 3 – ствол температурно-активированной воды; 4 – очаги горючей жидкости; 5 – термопары

Дозирование ингибирующих веществ в струи ТАВ осуществлялось дозатором (рисунок 3.2).

Было проведено две серии экспериментальных исследований:

*первая серия* – объемное подавления очагов было проведено с использованием струй ТАВ;

*вторая серия* – объемное подавления очагов струями ТАВ при дозировании ингибирующих составов.

Во всех случаях выдерживалось 9 мин свободного горения модельных очагов в замкнутом объеме. Обработанные результаты с применением математических методов [97] занесены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты исследований по объемному подавлению очагов в замкнутом объеме струями ТАВ

№ п/п	$t_{\text{тав}}, \text{с}$	$I_{\text{тав}}, \text{г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	$q_{\text{тав}}, \text{г}/\text{м}^3$	$t_{\text{тави}}, \text{с}$	$I_{\text{тави}}, \text{г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	$q_{\text{тави}}, \text{г}/\text{м}^3$
1.	710	5	3550	410	5,35	2194
2.	659		3295	420		2247
3.	678		3390	410		2194



Тушение очагов в замкнутом объеме при добавлении ингибирующих веществ происходило быстрее более чем в 1,5 раза, при этом интенсивность подачи была выше в 1,07 раза (см. таблицу 3.2). Однако удельный объемный расход на тушение был ниже, что подтверждает эффективность применения данного способа объемного тушения. На основе показаний термопар были построены зависимости снижения температуры от времени тушения.

Динамика изменения температуры в измеряемой точке замкнутого объема показала, что расхождение результатов эксперимента и моделирования не превышала 15 %, что соответствует высокой степени сходимости (рисунок 3.15).

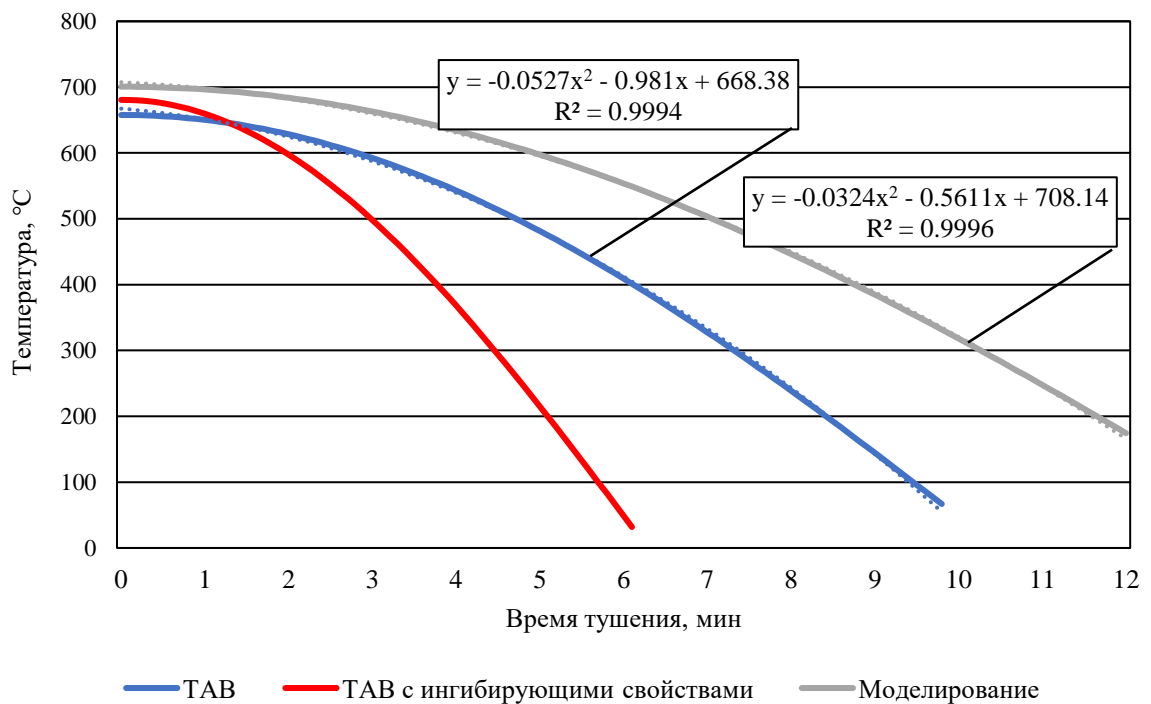


Рисунок 3.15 – Зависимость температуры в измеряемой точке помещения от времени подавления горения

При дозировании ингибирующих веществ время подавления горения в замкнутом объеме уменьшилось более чем в 1,65 раза.

### **3.3.2 Экономическая эффективность применения температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами при тушении замкнутых объемов газокomppressorных станций**

Объектовые пожарно-спасательные части газокomppressorных станций комплектуются передвижной пожарной техникой, при этом должно быть не менее двух автомобилей, перевозящих личный состав подразделений пожарной охраны и имеющих средства подачи огнетушащего состава на тушение пожара, в более чем 80 % случаев это пожарные автоцистерны (АЦ). Для объемного тушения пожаров в замкнутых объемах газокomppressorных станций с использованием передвижной пожарной техники на данный момент применяются пены средней и высокой кратности [10, 13, 14]. Таким образом, необходимо сравнить огнетушащую эффективность пены средней кратности и ТАВ с ингибирующими свойствами и провести расчет экономического эффекта от замены АЦ на АПМ.

Рассмотрим огнетушащие характеристики пен средней кратности и ТАВ с ингибирующими свойствами, приведенные в таблице 3.3, на основании экспериментальных исследований, проведенных в работах [19, 29] для объективной оценки каждого из огнетушащих составов.

Таблица 3.3 – Сравнение характеристик воздушно-механической и температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами

№ п/п	Характеристика	Воздушно-механическая пена	ТАВ с ингибирующими свойствами
1.	Содержание воды, при 6 %-ой концентрации пенообразователя или ингибитора	15 %	94 %
	Результат	Охлаждающий эффект практически отсутствует	Охлаждающий эффект тушения сильно выражен
2.	Состав пузырька	Воздух	Вода и молекулы ингибитора

Окончание таблицы 3.3.

№ п/п	Характеристика	Воздушно-механическая пена	ТАВ с ингибирующими свойствами
	Результат	При термическом разрушении пузырька происходит поступление кислорода в зону горения	При схлопывании пузырька происходит поступление паровой фазы и молекул ингибитора в зону горения
	Влияние гравитации	Существенное	Незначительное
3.	Результат	Под действием силы тяжести верхние слои пены давят на нижние, поэтому существует ограничение по высоте подачи	Капли ТАВ с ингибирующими свойствами витают в воздухе до 30 минут, не осаждаюсь. Под действием конвективных потоков инжектируются в зону горения.
4.	Среднее время тушения идентичных замкнутых объемов [46, 56]	15 мин	10 мин (табл. 1.1, п.3.3.1)

Рассмотрим данные, представленные в таблице 3.3, огнетушащие характеристики ТАВ имеют явное преимущество над идентичными свойствами воздушно-механической пены для тушения замкнутых объемов ГКС.

Рассмотрим два способа решения экономической задачи:

- расчетно-аналитический с использованием статистики;
- расчет стоимости.

Суть первого заключается в установлении зависимости между величиной ущерба от пожара на объектах нефтегазовой отрасли при тушении пожаров пеной средней кратности и временем тушения (рисунок 3.17) [9].

Рассмотрение рисунка 3.16 показало, что зависимость между величиной ущерба и временем тушения на объектах нефтегазовой отрасли отсутствует. Сделаем предположение, что такая зависимость существует, поэтому необходимо ввести еще один показатель. Для этого введем показатель относительной величины ущерба, равный отношению величины ущерба к площади пожара. Далее разобьем временной интервал тушения от 1 до 45 на полуинтервалы,



равные одной минуте, и оставим в данных промежутках те значения удельного ущерба, которые попадают в область одной дисперсии математического распределения (рисунок 3.17).

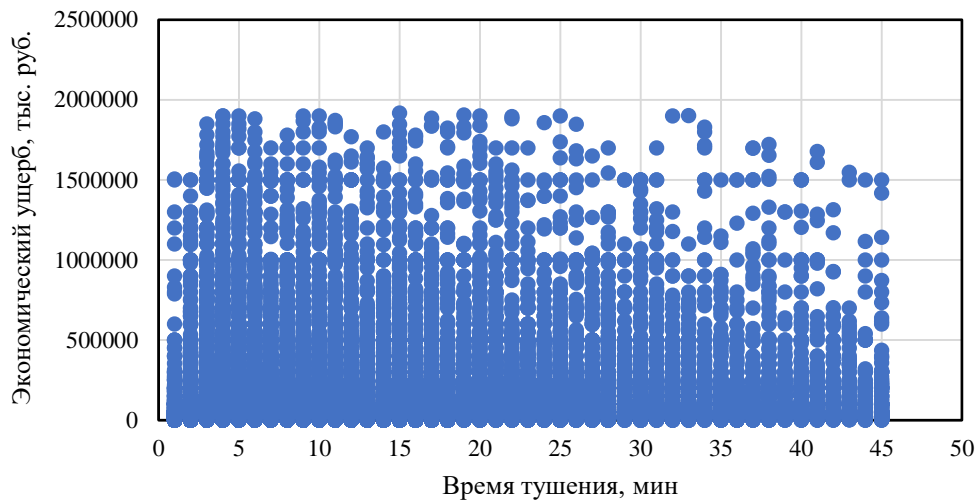


Рисунок 3.16 – Распределение величины ущерба от пожара в зависимости от времени тушения от 1 до 45 минут

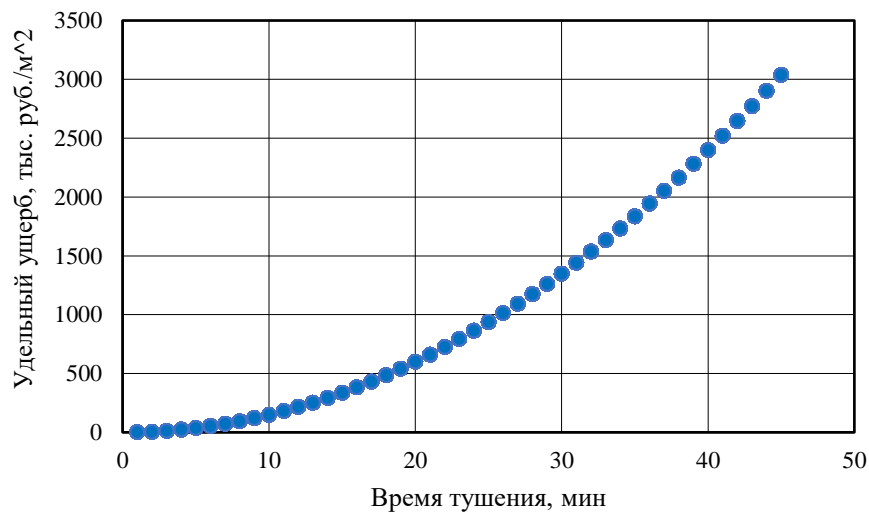


Рисунок 3.17 – Распределение величины удельного ущерба от пожара в зависимости от времени тушения от 1 до 45 мин

Зависимость удельного ущерба от времени тушения графически описывается экспоненциальной кривой (см. рисунок 3.17), поэтому, учитывая тот факт, что тушение пожаров струями ТАВ с ингибирующими свойствами происходит в 1,5 раза быстрее, чем при использовании пены средней кратности, экономическая эффективность от замены АЦ на АПМ повысится более в 1,6 раза.

Далее необходимо провести расчет экономической эффективности замены АЦ на АПМ на ГКС. В качестве пенообразователя на ГКС применяют пенообразователь ПО-6ТС марки А с 6%-й концентрацией. При расчете примем, что капитальные и текущие затраты для АЦ и АПМ одинаковы.

В рамках данной задачи экономическая эффективность применения ТАВ с ингибирующим свойствами будет определяться как отношение стоимостей необходимого количества для тушения условного пожара ингибирующего вещества и пенообразователя ПО-6ТС:

$$\mathcal{E} = \frac{C_{\text{по}}}{C_{\text{инг}}}, \quad (3.4)$$

где  $C_{\text{инг}}$ ,  $C_{\text{по}}$  – стоимостей необходимого количества для тушения условного пожара ингибирующего вещества и пенообразователя соответственно, руб.

Определяем стоимость необходимого количества для тушения ингибитора (гексацианоферрат(II) калия)  $C_{\text{инг}}$ , руб.:

$$C_{\text{инг}} = M_{\text{инг}} \Pi_{\text{инг}}, \quad (3.5)$$

где  $M_{\text{по}}$  – необходимое количество ингибитора, кг;  $\Pi_{\text{инг}}$  – цена ингибитора, руб./кг, принимаем 500 руб./кг, [131].

Определяем необходимое количество ингибитора для тушения условного пожара:

$$M_{\text{инг}} = \frac{S_{\text{п}}}{q_{\text{ств}}^{\text{ТАВ}}} I_{\text{тр}}^{\text{инг}} q_{\text{ств}}^{\text{инг}} t_{\text{туш}}^{\text{инг}}, \quad (3.6)$$

где  $S_{\text{п}}$  – площадь пожара на момент введения первого ствола, м<sup>2</sup>;  $q_{\text{ств}}^{\text{ТАВ}}$  – расход ствола ТАВ, л/с;  $I_{\text{тр}}^{\text{инг}}$  – требуемая интенсивность подачи струй ТАВ с ингибирующим веществом, л/(с · м<sup>2</sup>);  $q_{\text{ств}}^{\text{инг}}$  – расход ингибирующего вещества, кг/с, при этом концентрацию ингибирующего вещества в ТАВ примем равной 10%, [123, 131];  $t_{\text{туш}}^{\text{инг}}$  – нормативное время тушения пожара, мин, [56, 131].

Определяем стоимость необходимого количества для тушения пенообразователя ПО-6ТС  $C_{\text{по}}$ , руб.:

$$C_{\text{по}} = W_{\text{по}} \rho \Pi_{\text{по}}, \quad (3.7)$$

где  $W_{\text{по}}$  – необходимое количество пенообразователя, л;  $\rho$  – плотность пенообразователя, принимаем 0,0011 кг/л;  $C_{\text{по}}$  – цена пенообразователя ПО-6ТС, руб./т, принимаем 87 500 руб./т, [10–12].

Определяем необходимое количество пенообразователя для тушения условного пожара:

$$W_{\text{по}} = \frac{S_{\text{п}}}{q_{\text{ств}}^{\text{ГПС}}} I_{\text{тр}}^{\text{по}} q_{\text{ств}}^{\text{по}} t_{\text{туш}}^{\text{по}}, \quad (3.8)$$

где  $q_{\text{ств}}^{\text{ГПС}}$  – расход по раствору пенного ствола ГПС-600, л/с;  $I_{\text{тр}}^{\text{по}}$  – требуемая интенсивность подачи пены, л/(с · м<sup>2</sup>);  $q_{\text{ств}}^{\text{по}}$  – расход по пенообразователю пенного ствола ГПС-600, л/с;  $t_{\text{туш}}^{\text{по}}$  – нормативное время тушения пожара, мин, [121].

Таким образом, подставляя выражения (3.8)–(3.11) в формулу (3.7) получим, что экономическая эффективность от замены АЦ на АПМ для предотвращения пожаров на территории ГКС составит не менее 3 раз. Другими словами, при равных условиях при тушении пожара ТАВ с ингибирующими свойствами в 3 раза экономически выгоднее, чем пеной средней кратности. Следует отметить, что экономическая эффективность при втором расчете оказалась гораздо выше, это связано с тем, что при тушении реальных пожаров влияние оказывает не только эффективность огнетушащего вещества, но и тактика их применения. Таким образом конечный экономическая эффективность применения ТАВ с ингибирующими свойствами будет находиться в интервале от 1,6 до 3, т. е. 3 – это максимальное теоретически возможное значение, а 1,6 – минимальное практически реализуемая эффективность тушения.

### Выводы по третьей главе

1. Было проведено экспериментальное исследование эффективности тушения струями ТАВ модельных очагов различных классов пожаров. Оценка времени тушения модельных очагов позволила установить, что дозирование ингибирующих веществ в недогретой воде не влияет огнетушащую способность струй ТАВ при поверхностном тушении очагов класса А и несущественно влияет на огнетушащую способность поверхностного тушения очагов класса В. Было установлено, что МГК гексацианоферрата(II) калия при ее дозировании в недогретую воду не соответствует экспериментальному значению 3,5 %, установленному п. 2.2 настоящего диссертационного исследования.

2. При проведении лабораторных испытаний образцов огнетушащих составов ТАВ с ингибирующими свойствами, взятых при различной температуре, было установлено, что снижение огнетушащей эффективности ингибитора связано с его частичным разрушением при увлечении температуры подачи струй ТАВ. Была установлена зависимость снижения массовой концентрации ингибирующего вещества в растворе ТАВ от увеличения температуры в интервалах от 120 до 190 °С:  $\omega = 80,884t^{-0,557}$ .

3. Исследованиями на опытно-экспериментальном стенде установлено повышение электропроводности струй ТАВ при дозировании в них ингибирующих веществ не более чем на 4 % по сравнению с тем же показателем для струй ТАВ. Такое увеличение электропроводности струй ТАВ не влияет на электробезопасность струй ТАВ при тушении электроустановок под напряжением.

4. На основании экспериментально установленных данных и теоретических результатов можно считать, что эффективность применения ТАВ при дозировании ингибирующих солей соответствующих концентраций эффективность объемного тушения повышается не менее чем в 1,5 раза, а скорость охлаждения зоны горения – не менее чем в 1,6 раза. Экономическая

эффективность применения ТАВ с ингибирующими свойствами для объемного тушения пожаров на территории ГКС находится в интервале от 1,6 до 3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанной моделью было определено, что наибольшей эффективностью ингибирования горения масел замкнутых объемах ГКС обладает гексацианоферрат калия(II).

2. Экспериментально установлена зависимость разрушения ингибитора в ТАВ при повышении температуры  $M_{\text{инг}} = 83,9 - 11,3t$  и определена его необходимая МГК в водном растворе – 4,68 г/м<sup>3</sup>.

3. Экспериментальными исследованиями установлено, что тушение ЭУ струями ТАВ с дозированием солевых ингибиторов электробезопасно для участников тушения.

4. Экспериментальными исследованиями по тушению замкнутых объемов определено, что время подавления очагов ТАВ с ингибирующими свойствами уменьшается не менее чем в 1,5 раза.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Пожары и пожарная безопасность в 2015 – 2019 году [Текст]: Статистический сборник. Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. – М.: ВНИИПО, 2020. – 125 с.
2. Тагиев, Р.М. Принципы оптимизации систем пожарной безопасности объектов ОАО «ГАЗПРОМ» [Текст] / Р.М. Тагиев // Пожаровзрывобезопасность – 2006. – № 4. – С. 70–73.
3. Пачурин, Г.В. Взрывопожарная безопасность на объектах газотранспортных предприятий [Текст] / Г.В. Пачурин, С.М. Шевченко, А.Е. Дерябин // XXI век. техносферная безопасность – 2017. – № 4 (8). – С. 108–123.
4. Warzyńska, U. Modelling of pressure pulsation in gas compressor station. / U. Warzyńska, W. Kollek / International Conference engineering mechanics 2018 Svatka, Czech Republic, May 14 –17. – 2018. – 4 p.
5. Kutrowski, K. Common approach for assessing the safety of natural gas compressor stations / K. Kutrowski, N.A. Gasunie / 23rd World Gas Conference, Amsterdam. – 2006. – 5 p.
6. Liu, H. Research on N<sub>2</sub>-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coal mine goaf / H. Liu, F. Wang / PLoS ONE 14(9). – 2019. – 12 p.
7. Халиков, Р.В. Моделирование процесса объемного пожаротушения струями температурно-активированной воды [Текст] / Р.В. Халиков, В.В. Роечко, С.П. Храмцов, А.П. Кармес // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 3. – С. 21–29.
8. Халиков, Р.В. Исследование объемного пожаротушения температурно-активированной водой при введении ингибирующих солей / В.В. Роечко, Р.В. Халиков, А.Н. Кудрин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – № 1. – С. 5–11.

9. Халиков, Р.В. Оценка экономической эффективности применения инноваций в системе обеспечения пожарной безопасности газокompрессорных станций / Р.В. Халиков, А.А. Таныгина, Н.Л. Присяжнюк // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – 2022. – № 11. – С. 204–208.

10. Быков, А.И. Методика оценки массы природного газа, участвующего в образовании огненного факела при разрыве магистрального газопровода [Текст] / А.И. Быков // Пожаровзрывобезопасность – 2015. – Т. 24. – № 9. – С. 48-54.

11. Абдурагимов, И.М. Нерешенные проблемы пожаровзрывобезопасности энергоресурсов (СУГ и СПГ) как оборотная сторона успехов энергетической стратегии Российской Федерации [Текст] / И.М. Абдурагимов, Г.Н. Куприн // Пожаровзрывобезопасность – 2014. – Т. 23. – № 4. – С. 42–50.

12. Сафонов, В.С. Оценка показателей безопасности и риска перспективных газопроводов высокого давления [Текст] / В.С. Сафонов, С.А. Ковалев, С.В. Овчаров, А.В. Мельников // Вестник Российского университета дружбы народов. – 2007. – № 1. – С. 54–62.

13. Григорьянц, Р.Р. Особенности поведения жидкой фазы в высокооборотных компрессорах конверсионных газотурбинных установок и их влияние на характеристики и эффективность "влажного" сжатия [Электронный ресурс] / Р.Р. Григорьянц, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, П.П. Иванов, С.А. Мурахин, В.Л. Низовский // Теплоэнергетика. – 2007. – № 4. – 8 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9466917> (дата обращения 05.06.19).

14. Фаворский, О.Н. Пути повышения эффективности конверсионных ГТУ газопарового цикла малой мощности [Электронный ресурс] / О.Н. Фаворский, А.В. Бессмертных, Р.Р. Григорьянц, А.З. Жук, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, П.П. Иванов, В.И. Мирошниченко, С.А. Мурахин, М.А. Пикин, И.С. Шевченко, С.Б. Кузьмак // Теплоэнергетика. – 2005. – № 6. – 8 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9143179> (дата обращения 05.06.19).



15. Gligor, A.M. Considerations on determining the explosion risk and the areas with explosion hazard in a natural gas compressor station / A.M. Gligor, V. Petrescu / MATEC Web of Conferences 184, Annual Session of Scientific Papers IMT ORADEA. – 2018. – 11 p.

16. Домбровский, Л.А. Распыление перегретой воды: результаты экспериментальных исследований [Электронный ресурс] / Л.А. Домбровский, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, Д.В. Мариничев, В.Л. Низовский, А.А. Оксман, К.А. Ходаков // Теплоэнергетика. – 2009. – № 3. – 9 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12111091> (дата обращения 05.06.19).

17. Соковнин, А.И. Осаждение дыма на объектах энергетики температурно-активированной водой. [Электронный ресурс] / А.И. Соковнин, В.В. Роечко, А.Д. Ищенко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 1. – С. 54-59. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25673297> (дата обращения 01.06.19).

18. Решетников, А.В. Взрывное вскипание и полный развал струи перегретой воды [Электронный ресурс] / А.В. Решетников, В.В. Роечко, Н.А. Мажейко, В.П. Коверда, С.П. Храмцов, К.А. Бусов, А.В. Пряничников // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 5. – № 7. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19429860> (дата обращения 01.06.19).

19. Роечко, В.В. Объемный способ прекращения открытого горения в помещениях объектов энергетики [Электронный ресурс] / В.В. Роечко, А.Д. Ищенко, С.М. Краснов, С.П. Храмцов, А.И. Соковнин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 2. – С. 36-42. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26508527> (дата обращения 05.06.19).

20. Азатян, В.В. Роль реакционных цепей в критических условиях распространения пламени в разгах [Электронный ресурс] / В.В. Азатян, И.А. Болодьян., В.Ю., Навценья, Ю.Н. Шебеко., А.Ю. Шебеко // Горение и взрыв. – 2012. – Т.5. – № 5. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21796931> (дата обращения 01.06.19).

21. Роечко, В.В. Использование метастабильной парокапельной водной среды для обеспечения пожаровзрывобезопасности объектов с обращением сжиженных природных газов [Электронный ресурс] / В.В. Роечко, М.В. Алешков, И.Р. Бегишев, С.П. Храпцов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 3. – С. 51-58. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36263955> (дата обращения 21.01.2020).

22. Роечко, В.В. Применение температурно-активированной воды для тушения пожаров турбинных масел на объектах теплоэнергетики. [Электронный ресурс] / В.В. Роечко, А.В. Пряничников, Е.Б. Бондарев // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 4 (62). – С. 84-93. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25846407> (дата обращения 01.06.19).

23. Азатян, В.В. Особенности зависимости скорости газозафазных реакций горения от температуры и состава смеси [Текст] / В.В. Азатян, И.А. Болодьян, В.Ю. Навценя, Ю.Н. Шебеко, А.Ю. Шебеко // Пожарная безопасность. – 2012. – № 4. – С. 40–47.

24. Андреев, В.А. Пожаровзрывобезопасность производственных объектов и транспортных систем [Текст] / В.А. Андреев, В.Ю. Навценя, Д.М. Гордиенко и др. // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 65–78.

25. Шебеко А.Ю. Влияние фторированных углеводородов на концентрационные пределы распространения пламени в смесях  $H_2 - N_2O$  и  $CH_4 - N_2O$  [Текст] / А.Ю. Шебеко, Ю.Н. Шебеко, В.Ю. Навценя и др. // Химическая физика, 2014. Т. 33 – № 1. – С. 37–43.

26. Решетников, А.В. Взрывное вскипание струй перегретой жидкости при истечении через щелевой канал [Электронный ресурс] / А.В. Решетников, К.А. Бусов, В.В. Роечко, С.П. Храпцов, Н.А. Мажейко, В.П. Коверда // Труды шестой российской национальной конференции по теплообмену. – 2014. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25103811> (дата обращения 01.06.19).

27. Пряничников, А.В. Тушение проливов нефти и нефтепродуктов метастабильными парокапельными струями воды. [Электронный ресурс] / А.В. Пряничников, В.В. Роечко, Е.Б. Бондарев // Пожары и чрезвычайные

ситуации: предотвращение, ликвидация. 2015. – № 4. – С. 7-12. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25601367> (дата обращения 01.06.19).

28. Кармес, А.П. Тушение пожаров в высотных объектах температурно-активированной водой. [Электронный ресурс] / А.П. Кармес, А.В. Пряничников, В.В. Роечко // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2012. – № 1(3). – С. 22-25. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26564382> (дата обращения 01.06.19).

29. Роечко, В.В. Тушение пламени в протяженных замкнутых сооружениях энергообъектов. [Электронный ресурс] / В.В. Роечко, А.Д. Ищенко, С.М. Краснов, С.П. Храмцов, А.И. Соковнин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 3. – С. 44-48. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27114551> (дата обращения 01.06.19).

30. Роечко, В.В. Тушение маслonaполненных кабелей в зигзагообразном коллекторе. [Электронный ресурс] / В.В. Роечко, А.Д. Ищенко, С.М. Краснов, С.П. Храмцов, А.И. Соковнин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 4. – С. 38-42. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27524542> (дата обращения 01.06.19).

31. Роечко, В.В. Объемный способ пожаротушения кабельных сооружений температурно-активированной водой. [Электронный ресурс] / В.В. Роечко, С.П. Храмцов, М.Д. Сегаль, С.М. Краснов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2017. – № 3. – С. 40-50. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28399867> (дата обращения 01.06.19).

32. Роечко, В.В. Стратегия использования энергоэффективных многоцелевых мобильных модулей для обеспечения безопасности нефтегазовых комплексов в Арктике. [Электронный ресурс] / В.В. Роечко // Деловой журнал [neftegaz.ru](http://neftegaz.ru). – 2017. – № 11. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30541690> (дата обращения 01.06.19).

33. Ищенко, А.Д. Пожарная опасность и особенности тушения пожаров энергетических установок и помещений судов. [Электронный ресурс] /

А.Д. Ищенко, В.В. Роечко, И.Г. Малыгин // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 1-1(39). – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32717342> (дата обращения 01.06.19).

34. Чистяков, Т.И. Влияние электроперколяционных параметров струй температурно-активированной воды на их комплексное сопротивление при тушении пожаров класса Е [Электронный ресурс] / Т.И. Чистяков, В.В. Роечко, С.П. Храмцов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 1. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32880101> (дата обращения 01.06.19).

35. Лобов, А.А. Применение современных средств пожаротушения для объемного тушения пожаров различного класса [Электронный ресурс] / А.А. Лобов, Р.Ю. Поляков, С.Н. Хаустов // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 1(5). – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25655129> (дата обращения 01.10.19).

36. Овчинников, В.А. Комбинированное газопорошковое пожаротушение как перспективное направление автоматического пожаротушения [Электронный ресурс] / В.А. Овчинников, С.Н. Хаустов // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2012. – № 1(3). – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26564510> (дата обращения 01.10.19).

37. Ибатуллина, Л.А. Совершенствование обеспечения пожарной безопасности в насосных помещениях, перекачивающих нефтепродукты [Электронный ресурс] / Л.А. Ибатуллина, Р.М. Султанов // Пожарная и аварийная безопасность сборник материалов XII международной научно-практической конференции, посвященной году гражданской обороны. – 2017. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37006874> (дата обращения 01.10.19).

38. Семенов, Н. Н. Избранные труды: в 4 т. [Текст] / Н.Н. Семенов; Отв. ред. А.Е. Шилов, Г.Б. Сергеев.: О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. – М.: Наука, 2005. – 500 с.

39. Халиков, Р.В. Пожаровзрывобезопасность замкнутых пространств объектов ГКС. [Электронный ресурс] / Р.В. Халиков, В.В. Роечко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. – № 1. – С. 30–35. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42722653> (дата обращения 04.05.2020).

40. Халиков, Р.В. Роль реакционных цепей горения для процесса объемного пожаротушения ГКС [Текст] / Р.В. Халиков // Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых по проблемам техносферной безопасности. – М.: РХТУ им Д. И. Менделеева, 2020. – С. 39–42.

41. Чистяков, Т.И. Влияние геометрических параметров струй температурно-активированной воды на комплексное сопротивление при тушении пожаров класса Е [Текст] / Т.И. Чистяков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 2. – С. 12–21.

42. Серебренников, С.Ю. Решение проблемы защиты от объемных пожаров крупных компрессорных и насосных станций нефтегазового комплекса [Текст] / С.Ю. Серебренников, К.В. Прохоренко. // Экспозиция нефть газ – 2011. – № 1 (13). – С. 11–13.

43. Абдурагимов, И.М. О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения [Текст] / И.М. Абдурагимов // Пожаровзрывобезопасность – 2012. – № 4. – С. 60–82.

44. Халиков, Р.В. Ингибирование горения в замкнутых пространствах ГКС [Текст] / Р.В. Халиков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 4. – С. 27–34.

45. Халиков, Р.В. Оценка ущерба от пожара на основе многофакторного анализа сценариев развития пожаров ГКС [Текст] / Р.В. Халиков, А.А. Таныгина // Технологии техносферной безопасности. – 2020. – № 4 (90). – С. 74–84.

46. Базилевский, М.П. Аналитические зависимости между коэффициентами детерминации и соотношением дисперсий ошибок исследуемых признаков в модели регрессии Деминга [Текст] / М.П. Базилевский // Математическое моделирование и численные методы – 2016. – № 2 (10). – С. 104–116.

47. ГОСТ 9972-74. Масла нефтяные турбинные с присадками. Технические условия (с Изменениями N 1-9) [Текст]. – введ. 01.01.1975. – М.: Стандартинформ, 2011. – 8 с.

48. ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97). Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности (с Изменением N 1) [Текст]. – введ. 01.01.1997. – М.: Стандартинформ, 2006. – 8 с.

49. ГОСТ 4333-87. Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле (с Поправкой) [Текст]. – введ. 01.07.2016. – М.: Стандартинформ, 2008. – 8 с.

50. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (с Изменениями N 1, 2) [Текст]. – введ. 01.01.1977. – М.: Стандартинформ, 2007. – 5 с.

51. ГОСТ 2917-76. Масла и присадки. Метод определения коррозионного воздействия на металлы (с Изменениями N 1, 2) [Текст]. – введ. 01.01.1979. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 6 с.

52. ГОСТ 30319.1-2015. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Общие положения (Переиздание) [Текст]. – введ. 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2019. – 32 с.

53. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением № 1) [Текст]. – введ. 01.01.1989. – М.: Стандартинформ, 2008. – 50 с.

54. Чистяков, Т.И. Электробезопасность при тушении пожаров класса е энергетических установок и помещений судов (кораблей) [Текст] / Т.И. Чистяков, А.Д. Ищенко, И.Г. Малыгин, В.В. Вислогузов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 2. – С. 81–89.

55. Свидетельство на программу для ЭВМ № 2020666295. Программное средство для расчета вероятности разветвленно-цепного процесса горения

углеводородов [Текст] / Р.В. Халиков – № 2020666295; заявл. 25.11.2020; опубл.: 08.12.2020.

56. Повзик, Я.С. Справочник руководителя тушения пожара / Я.С. Повзик. – М.: Спецтехника, 2000. – 361 с.

57. Серебренников, С.Ю. Новые технологии тушения пожаров [Электронный ресурс] / С.Ю. Серебренников, А.В. Аликин, Н.В. Ганиев, Б.Е. Довбня, М.А. Селиванов // Рудник будущего. – 2011. – № 2 – 4 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17242465> (дата обращения 01.07.19).

58. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (с Изменением № 1) [Текст]. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – 100 с.

59. Черных, О.В. Пенообразователи для тушения пожаров методики испытаний в соответствии с ГОСТ Р 50588-2012 [Электронный ресурс] / О.В. Черных // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2013. – № 1(4) – 5 с. - Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26341698> (дата обращения 01.07.19).

60. Белорожев, О.Н. Эффективность применения компрессионных пен при тушении пожаров [Текст] / О.Н. Белорожев, И.В. Багажков // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы – 2016. – № 1(7). – С. 305–307.

61. Николаева, В.М. Углекислотные системы пожаротушения [Текст] / В.М. Николаева // Пожаровзрывобезопасность – 2012. – № 4. – С. 60–82.

62. Тербнев, В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений. – М.: Пожкнига, 2004. – 256 с.

63. Корольченко, А.Я. Газовое пожаротушение [Текст] / А.Я. Корольченко, Е.Н Шилина // Пожаровзрывобезопасность – 2016. – № 5. – С. 57–65.

64. ГОСТ Р 53280.3-2009. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 3. Газовые огнетушащие вещества. Методы испытаний (Переиздание) [Текст]. – введ. 01.05.2009. – М.: Стандартинформ, 2019. – 12 с.

65. Копылов, Н.П. Изучение закономерностей тушения тонкораспыленной водой модельных очагов пожара [Электронный ресурс] / Н.П. Копылов, А.Л. Чибисов, А.Л. Душкин, Е.А. Кудрявцев // Пожарная безопасность. – 2008. – № 4. – 19 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12157708> (дата обращения 10.06.19).

66. Дауэнгауэр, С.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы [Текст] / С.А. Дауэнгауэр // Пожаровзрывобезопасность. – № 6. – 2004. – С. 78–81.

67. ГОСТ Р 51057-2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний [Текст]. – введ. 01.07.2002. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 43 с.

68. Щербаков, И.С. Особенности взаимодействия переохлажденного водяного пара с открытым пламенем [Текст] / И.С. Щербаков, М.Г. Руденко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета – 2014. – № 7(117). – С. 106–109.

69. Роечко, В.В. Технология температурно-активированной воды: физическая сущность, история разработки, перспективы развития [Текст] / В.В. Роечко, А.П. Кармес // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация – 2008. – № 1. – С. 15–19.

70. Semenov, N.N. Die Oxydation des Phosphordampfes bei niedrigen Drucken / N. N. Semenov // Z. Phys. – 1927. – 109 p.

71. Семенов, Н.Н. Окисление паров фосфора при низких давлениях [Текст] / Н.Н. Семенов // ЖРФХО ч. физ. – 1928. – Т. 60. – № 4. – 271 с.

72. Семенов, Н.Н. Цепные реакции [Текст] / Н. Н. Семенов. – Ленинград: Госхимтехиздат, 1934. – 555 с.

73. Музычук, О.В. Использование бимодальных вероятностных распределений в задачах броуновской диффузии [Электронный ресурс] / О.В. Музычук // Известия высших учебных заведений. радиофизика – 2006. – Т 46. – №3. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9209026> (дата обращения: 13.02.2021).



74. Боровик, И.Н. Влияние дисперсности распыла капель форсунками на полноту сгорания топлива в жидкостном ракетном двигателе [Электронный ресурс] / И.Н. Боровик, Е.А. Строкач // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника – 2016. – № 1 (44). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-dispersnosti-raspyla-kaapel-forsunkami-na-polnotu-sgoraniya-topliva-v-zhidkostnom-raketnom-dvigatele> (дата обращения: 13.02.2021).

75. Халиков, Р.В. Объемное тушение пожаров твердых углеводородов [Электронный ресурс] / Р.В. Халиков // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2019. – № 3 (4). – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41579070> (дата обращения 10.01.2020).

76. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике [Текст] / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.; Наука, 1987. – 491 с.

77. Зельдович, Я.Б. Математическая теория горения [Текст] / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблат, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

78. Петрова, Л.Д. Об изотермическом самовоспламенении водорода на третьем пределе [Текст] / Л.Д. Петрова, В.В. Азатян, А.Н. Баратов, З.И. Каганова // Горение и взрыв. – 1977. – С. 526–528.

79. Азатян, В.В. Концентрационные пределы распространения пламени и химия горения смесей оксид углерода – кислород – азот [Текст] / В.В. Азатян, Н.В. Андреева, А.И. Эльнатанов // Химическая физика. – 1988. – Т. 7. – № 6. – С. 821–826.

80. Азатян, В.В. Доминирующая роль конкуренции разветвления и обрыва реакционных цепей в формировании концентрационных пределов распространения пламени [Текст] / В.В. Азатян, Ю.Н. Шебеко, И.А. Болодьян, В.Ю. Навценя // Журнал физической химии. – 2002. – Т. 76. – № 5. – С. 775–784.

81. Azatyan, V.V. Suppression of Detonations by Efficient Inhibitors. Gaseous and Heterogeneous Detonations / V.V. Azatyan, G.Gg. Wagner, G.K. Vedeshkin. -M.: ENAS Publishers, 1999. – p. 331– 336.

82. Азатян, В.В. Цепные реакции в процессах горения, взрыва и детонации газов [Текст]: монография – Российская академия наук, Объединенный институт высоких температур, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения. – Черноголовка, 2017. – 431 с.

83. Семенов, Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности [Текст] / Семенов Н.Н. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 639 с.

84. Зельдович, Я.Б. Математическая теория горения и взрыва [Текст] / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблат, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе – М.: Наука, 1980. – 478 с.

85. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике [Текст] / Д.А. Франк-Каменецкий – М.: Наука, 1987. – 491 с.

86. Соколик, А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах [Текст] / А.С. Соколик – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 360 с.

87. Льюис, Б. Горение, пламя и взрывы в газах [Текст] / Б. Льюис, Г. Эльбе – М.: Мир, 1968. – 220 с.

88. Вестбрук, С.К. Использование химической кинетики для расчета критических параметров газовой детонации [Текст] / С.К. Вестбрук, П.А. Уртьев // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 6 – С. 65–76.

89. Warnatz, J. Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation with 14 tables / J. Warnatz, U. Maas, R.W. Dibble // Einheitssacht: Technische Verbrennung. – Springer, 2018. – 389 p.

90. Фомин, П.А. Приведенная модель химической кинетики детонационного горения метана [Электронный ресурс] / П.А. Фомин, А.В. Троцюк, А.А. Васильев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 2 (4). – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26224125> (дата обращения 15.02.2020).

91. Николаев, Ю.А. Модель стационарной гетерогенной детонации в газочапельной среде / Ю.А. Николаев, П.А. Фомин // Физика горения и взрыва. – 1984. – Т. 20. – № 4. – С. 97-105.

92. Gavrilenko, T.P. Acceleration of solid particles by gaseous detonation products / T.P. Gavrilenko, V.V. Grigoriev, S.A. Zhdan [et al.] // *Combustion and Flame*. – 1986. – Vol. 66. – I. 2. – P. 121–128.

93. Ждан, С.А. Величина реактивного импульса от взрыва газовой смеси в полуограниченном пространстве [Текст] / С.А. Ждан, В.В. Митрофанов, А.И. Сычев // *Физика горения и взрыва*. – 1994. – Т. 30. – № 5. – С. 90–97.

94. Fomin, P.A. Effect of chemically inert particles on thermodynamic characteristics and detonation of a combustible gas / P.A. Fomin, J.-R. Chen // *Combustion Science and Technology*. – 2009. – Vol. 181. – No. 8. – P. 1038–1064.

95. Fomin, P.A. Modeling of detonation processes in chemically active bubble systems at normal and elevated initial pressures / P.A. Fomin, K.S. Mitropetros, H. Hieronymus // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2003. – Vol. 16. – No. 4. – P. 323–331.

96. Hinshelwood, C.N. The reaction between Hydrogen and Oxygen / C.N. Hinshelwood, Williamson A.T. – New York: Oxford University Press, 1934 – 610 p.

97. Халиков, Р.В. Вероятностная модель разветвленно-цепного горения предельных углеводородов в замкнутом объеме ГКС [Текст] / Р.В. Халиков // *Технологии техносферной безопасности*. – 2021. – №. 1 (91). – С. 42–52.

98. Шмаков, А.Г. Исследование фосфорорганических, фторорганических, металлсодержащих соединений и твердотопливных газогенерирующих составов с добавками фосфорсодержащих соединений в качестве эффективных пламегасителей. [Электронный ресурс] / А.Г. Шмаков, О.П. Коробейничев, В.М. Шварцберг, С.А. Якимов, Д.А. Князьков, В.Ф. Комаров, Г.В. Сакович // *Физика горения и взрыва*. – 2006. – № 6. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16757038> (дата обращения 04.10.2020).

99. Коробейничев, О.П. Применение аэрозольной технологии и эффективных нелетучих пламегасителей для тушения различных типов пожаров. [Электронный ресурс] / О.П. Коробейничев, А.Г. Шмаков, А.А. Чернов, В.М. Шварцберг, К.П. Куценогий, В.И. Марков //

Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – № 3. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17980207> (дата обращения 04.10.2020).

100. Халиков, Р.В. Применение теоремы Байеса для моделирования процесса объемного пожаротушения объектов ГКС [Текст] / Р.В. Халиков // Материалы XIV Международной научно-практической конференции молодых ученых «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» – Минск: УГЗ, г. Беларусь. – 2020. – С. 289–291.

101. Халиков, Р.В. Аналитические аспекты ингибирования пламени водяными средами в метастабильном фазовом состоянии [Текст] / Р.В. Халиков, В.В. Роечко // Материалы XXVII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»: – М.: МГУ им М. В. Ломоносова. – 2020. – С. 501.

102. Летников, Ф.А. Активированная вода [Текст] / Ф.А. Летников, Т.В. Кащеева, А.Ш. Минцис – Новосибирск: Наука, 1976. – 136 с.

103. Тетерин, И.М. Температурно-активированная вода – новая парадигма развития техники пожаротушения [Текст] / И.М. Тетерин // Средства спасения: журнал-каталог. – 2005. – С. 44.

104. Dlugogorski, B.Z. Water vapour as an inerting agent / B.Z. Dlugogorski, R.K. Aicheos, E.M Kennedy / Halon OPTiOnS Technical Workmg Conference 6-8 May. – 1997. – 12 p.

105. Щербино, А.В. Авторское свидетельство № 792645 СССР Способ тушения пожаров и устройство для его осуществления [Текст] / А.В. Щербино, Е.И. Бурштейн, И.И. Черкашин // Бюл. – 1979. – № 45. – С. 136.

106. Патент на изобретение № 2345807. Генератор для получения горячей или перегретой воды преимущественно для мобильных пожарных установок [Текст] / А.В. Роечко, В.В. Роечко, В.А. Пряничников, А.В. Пряничников. – № 2345807; заявл. 06.07.2007; опубл.: 02.10.2009.

107. Крешков, А.П. Основы аналитической химии. Книга 1. Теоретические основы. Качественный анализ. – М.: Химия, 1976. – 472 с.

108. Лурье, Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. – М.: Химия, 1989. – 448 с.

109. Методика оценки средств объемного пожаротушения [Текст]. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2013. – 20 с.

110. Высокоморная, О.В. Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе «Водяного снаряда» / О.В. Высокоморная, А.О. Марков, М.Н. Назаров, П.А. Стрижак, С.Р. Янов // Известия ТПУ. – 2013. – № 4. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-vliyaniya-usloviy-raspyleniya-vody-na-temperaturu-v-slede-vodyanogo-snaryada> (дата обращения: 08.03.2021).

111. Стрижак, П.А. Численный анализ диффузионно-конвективных процессов тепломассопереноса при движении капель воды через высокотемпературные продукты сгорания / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 7. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennyy-analiz-diffuzionno-konvektivnyh-protssesov-teplomassoperenosa-pri-dvizhenii-kapel-vody-cherez-vysokotemperaturnye> (дата обращения 08.03.2021).

112. Жданова, А.О. Влияние распределения капель воды в «водяном снаряде» на температуру в его следе / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 2. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredeleniya-kapel-vody-v-vodyanom-snaryade-na-temperaturu-v-ego-slede> (дата обращения 08.03.2021).

113. Корольченко, Д.А. Анализ типового соотношения для описания зависимости времени тушения горючих жидкостей и удельного расхода различных огнетушащих веществ от интенсивности их подачи. [Электронный ресурс] / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – № 3. – 11 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25779969> (дата обращения 04.10.2020).

114. Бородай, С.П. Экспериментальные исследования структуры пламени и его воздействия на ограждающие судовые конструкции [Электронный ресурс] /

С.П. Бородай, А.Н. Летин, С.В. Шедько // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. №2 (392). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-struktury-plameni-i-ego-vozdeystviya-na-ograzhdayuschie-sudovye-konstruktsii> (дата обращения: 26.01.2021).

115. Пузач, С.В. К определению высоты пламенной зоны при диффузионном горении жидкости [Электронный ресурс] / С.В. Пузач, Е.С. Абакумов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – № 2. – С. 31-34. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-vysoty-plamennoy-zony-pri-diffuzionnom-gorenii-zhidkosti-1> (дата обращения: 26.01.2021).

116. Daniel, T. Fire dynamic of spill fires Spill Fires. / T. Daniel, T. Joseph, W. Frederick // Halon Options Technical Working Conference. — 2000. — p. 1–36.

117. Методические рекомендации, утвержденными Заместителем Министра Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий О.В. Баженовым «19» декабря 2016 г. «Методика расчета среднего времени прибытия пожарно-спасательных подразделений к месту вызова (на чрезвычайные ситуации и (или) пожары) в городах и сельской местности».

118. Хафизов, Ф.Ш. Исследование разлива нефтепродуктов при авариях технологических трубопроводов [Электронный ресурс] / Ф.Ш. Хафизов, В.Д. Халиков, В.В. Кокорин, О.Д. Халикова // Электронный научный журнал нефтегазовое дело – 2014. – №3. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21820983> (дата обращения 26.01.2021).

119. Стоянович, И.О. Определение площади растекания жидкости при оценке пожаро-взрывоопасности производственных помещений [Электронный ресурс] / И.О. Стоянович, А.В. Симагин // Лакокрасочные материалы и их применение – 2006. – №8. – С. 40-46. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9220178> (дата обращения 26.01.2021).

120. Комаров, А.А. Определение параметров пролива при растекании пожароопасных жидкостей в результате аварии [Электронный ресурс] /

А.А. Комаров, В.Л. Малкин, В.А. Угорелов, Р.У. Загуменников // Пожарная безопасность – 2020. – №3. – С. 36-43. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43977868> (дата обращения 26.01.2021).

121. Ефимова, А.И. Общий физический практикум физического факультета МГУ. Погрешности эксперимента: учебно-методическое пособие [Текст] / А.И. Ефимова, А.В. Зотеев, А.А. Склянкин – М.: МГУ, 2012. – 39 с.

122. Клячин, А.А. Оценка погрешности вычисления площади при кусочно-полиномиальной аппроксимации [Текст] / А.А. Клячин, А.Г. Панченко // Математическая физика и компьютерное моделирование – 2020. – Т.23 – № 2. – С. 22–30.

123. Салихов, Р.М. Особенности применения химических реагентов в условиях высокой минерализации попутно добываемых вод [Текст] / Р.М. Салихов, Е.О. Чертовских, Б.Р. Гильмутдинов, И.П. Лебедева, И.И. Костюк, М.К. Парашенко, А.А. Уряднов, А.Р. Колесникова // Нефтяное хозяйство. – 2020. – С. 59–62.

124. Патент на изобретение № 2732232. Объемный насос [Текст] / А.П. Драгунов. – № 2019133275; заявл. 18.10.2019; опубл.: 14.09.2020.

125. Fleming, J.W. Fleming Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type / J.F. Fleming, B.A. Williams, R.S. Sheinson / Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section. – 2019. – 21 p.

126. Lazzarini, A.K. Extinction Conditions of Non-Premixed Flames with Fine Droplets of Water and Water/NaOH Solutions / A.K. Lazzarini, R.H Krauss, H.K. Chelliah // Proceedings of the Combustion Institute. – 2000. – Vol. 28. – P. 2939–2945.

127. Chuka, C. Experimental study of water mist suppression mechanisms in a forced flow boundary layer flame / C. Chuka, Ramagopal Ananth and Patricia A. // Halon Options Technical Working Conference. – 2001. – P. 440–446.

128. Халиков, Р.В. Эффективные концентрации ингибирующих солей в температурно-активированной воде, используемой для пожаротушения [Текст] / Р.В. Халиков, Роевко В.В., Дегтярев С.В. // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 1. – С. 40–47.

129. ГОСТ 30247.0-94 51057-2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. [Текст]. – введ. 25.10.2001. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 45 с.

130. Халиков, Р.В. Оценка электропроводимости струй температурно-активированной воды с дозированием ингибирующей соли для тушения электрооборудования ГКС [Текст] / Р.В. Халиков, В.В. Роечко, Т.И. Чистяков, Д.В. Тараканов // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т.30. – №1. – С. 64–74.

131. Халиков, Р.В. Особенности ингибирования газофазных процессов горения [Текст] / Р.В. Халиков // Материалы VII международной заочной научно-практической конференции «Проблемы экологии и экологической безопасности. Создание новых полимерных материалов». – Минск: УГЗ, 2020. – С. 211–213.



**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**(обязательное)**

**ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ  
РАЗВЕТВЛЕННО-ЦЕПНОГО ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020666295

Программное средство для расчета вероятности  
разветвленно-цепного процесса горения углеводов

Правообладатель: *Халиков Ринат Валерьевич (RU)*

Автор: *Халиков Ринат Валерьевич (RU)*

Заявка № 2020665383

Дата поступления 25 ноября 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 декабря 2020 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

**2020666295**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): <a href="#">2020666295</a>	Автор: <b>Халиков Ринат Валерьевич (RU)</b>
Дата регистрации: <b>08.12.2020</b>	Правообладатель: <b>Халиков Ринат Валерьевич (RU)</b>
Номер и дата поступления заявки: <b>2020665383 25.11.2020</b>	
Дата публикации: <a href="#">08.12.2020</a>	
Контактные реквизиты: <b>нет</b>	

Название программы для ЭВМ:

**Программное средство для расчета вероятности разветвленно-цепного процесса горения углеводородов**

**Реферат:**

Программа предназначена для расчета вероятности наступления разветвленно-цепного процесса горения в зависимости от радикала, образованного предельным углеводородом. Программа может использоваться для выбора наиболее эффективного химического ингибитора горения при тушении пожаров и составлении документов предварительного планирования подразделениями пожарной охраны, при оценке эффективности применения химического ингибитора для объекта защиты при проектировании систем автоматического пожаротушения. Функциональные возможности программы: программа позволяет установить радикалы, образующиеся при горении предельных углеводородов, которые с большей долей вероятности приводят к наступлению разветвлено-цепного процесса горения на основе сравнения найденной теоретической и реальной вероятности разветвления. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows 8.

**Язык программирования:** C#

**Объем программы для ЭВМ:** 35,1 КБ

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**(обязательное)**

**ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**  
**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**  
**ТЕМПЕРАТУРНО-АКТИВИРОВАННОЙ ВОДЫ**  
**С ИНГИБИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ**  
**НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**



Перв. примен.	<p>Утверждаю                  И.о. начальника ФАУ ДПО                  Волгодонский учебный центр ФПС                    Р.А. Черевиченко</p> 									
Справ. №	<p><b>Оценка эффективности использования                  водной среды в метастабильном фазовом состоянии                  с ингибирующими свойствами для тушения пожаров                  на объектах нефтегазовой отрасли</b></p>									
Подп. и дата	<p>Разработали:</p> <p>Заместитель начальника отдела –                  начальник отделения планирования,                  организации и координации научных исследований                  отдела организации научных исследований                  и научной информации Академии ГПС МЧС России</p>  <p style="text-align: right;">А.П. Кармес</p> <p>Преподаватель отделения специальных дисциплин                  ФАУ ДПО Волгодонский учебный центр ФПС</p>  <p style="text-align: right;">Т.И. Чистяков</p> <p>Адъюнкт ФПНПК Академии ГПС МЧС России</p>  <p style="text-align: right;">Р.В. Халиков</p> <p>Профессор кафедры пожарной тактики и службы                  УНК пожаротушения Академии ГПС МЧС России,                  кандидат технических наук</p>  <p style="text-align: right;">А.Д. Ищенко</p>									
Подп. и дата	<p><b>ТАВИ 00.00.000ПМ</b></p>									
Инв. № посл.	Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Оценка эффективности использования температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами для туше- ния пожаров на объектах нефтегазовой отрасли	Лит.	Лист 1	Листов	
Академия ГПС МЧС России Волгодонский учебный центр ФПС										

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая Программа экспериментальных исследований: «Оценка эффективности использования температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами для тушения пожаров на объектах нефтегазовой отрасли» (далее – Программа) распространяется на автомобили пожарные многоцелевые (далее – АПМ) с установкой для получения горячей, перегретой и температурно-активированной воды (далее – ТАВ), разработанные учеными Академии ГПС МЧС России совместно со специалистами ООО «Аква-ПиРо-Альянс» и изготовленные на ОАО «Мытищинский приборостроительный завод» на базе автомобиля и/или автомобильного прицепа.

Объем и методика проведения испытаний определяются настоящей Программой.

Программа предусматривает оценку эффективности использования ТАВ с ингибирующими свойствами для тушения пожаров, которые могут возникать на объектах газокompрессорных станций.

В Программе изложены последовательность и методика экспериментальных исследований по оценке эффективности использования ТАВ с ингибирующими свойствами для тушения пожаров на объектах газокompрессорных станций.

## 1 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Настоящая Программа разработана для АПМ, оборудованных транспортбельной автономной установкой получения температурно-активированной воды (далее – ТАВ) и оснащенных оборудованием для получения температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами (далее – ТАВИ).

Для испытаний используется: АПМ 3-2/100-1,38/100-100 (43118) мод. ПиРоЗ – МПЗ, укомплектованный переносным дозатором и устройством электромагнитной обработки для получения раствора недогретой воды и ингибирующего состава.

Подача раствора ингибитора в этом автомобиле осуществляется через гибкие шланги и вставки в напорный патрубок подачи воды из АПМ или перед стволами-распылителями ТАВ.

Технические характеристики АПМ приведены в Приложении 1.

Технические характеристики дозатора приведены в Приложении 2.

Технические характеристики устройства электромагнитной обработки приведены в Приложении 3.

При проведении испытаний используются дальнобойный ствол-распылитель ТАВИ;

Технические характеристики дальнобойного ствола-распылителя приведены в Приложении 4.

При испытаниях используется вода из водопроводной системы или из открытого водоема. Вода не подвергается предварительной подготовке, кроме фильтрации через фильтры с размером ячеек от 100 до 300 мкм, которые установлены на всасывающих патрубках АПМ.

## 2 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИСПЫТАНИЙ

Цель испытаний:

Испытания АПМ проводятся с целью оценки эффективности применения температурно-активированной воды с ингибирующими свойствами (далее – ТАВИ) на объектах газокompрессорных станций при возникновении пожаров, вызванных утечкой или проливом горючих материалов.

Задачи испытаний:

- определение параметров струй ТАВИ необходимых для тушения пожаров, вызванных утечкой или проливом горючих материалов;
- определение оптимальных схем подачи ТАВИ;
- определение оптимальных режимов работы АПМ для тушения пожаров газокompрессорных станций.



### 3 УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Место проведения испытаний – Учебный центр ФПС МЧС России (г. Волгодонск).

Места установки АПМ при проведении испытаний должны обеспечивать развертывания рукавных линий для подачи ТАВИ, а также дозаправки АПМ дизельным топливом, водой и раствором ингибитора.

Места установки АПМ в Учебный центр ФПС МЧС России (г. Волгодонск) приведены в Приложении 5.

Испытания проводят в нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150.

Огневые испытания проводятся по тушению модельных очагов пожара классов А и В.

#### *Модельный очаг пожара класса А*

Модельный очаг пожара представляет собой деревянный штабель в виде куба (рисунок 1).

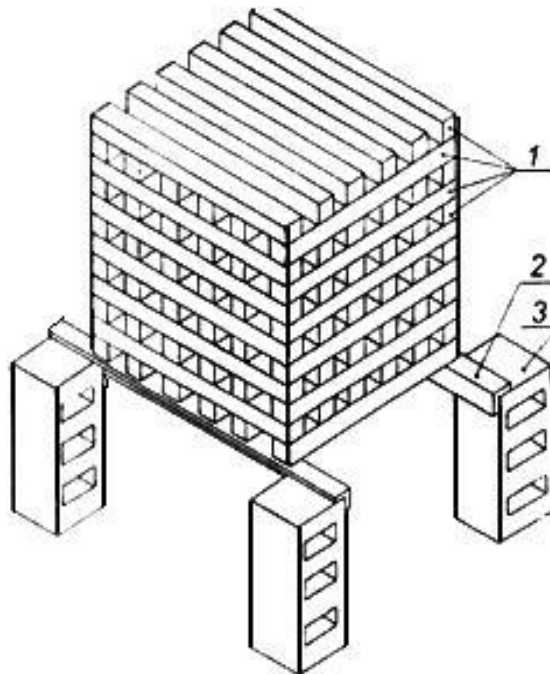


Рисунок 1 – Устройство деревянного штабеля (модельного очага пожара класса А) для проведения огневых испытаний:

1 - деревянные бруски; 2 - стальной уголок; 3 - бетонный (металлический) блок

Штабель размещают на твердой опоре, не мешающей притоку воздуха (например, на двух стальных уголках по ГОСТ 8510, установленных на бетонных блоках), или на специальной подставке таким образом, чтобы расстояние от основания штабеля до опорной поверхности (пол или земля) составляло  $(400\pm 10)$  мм. Размеры опоры определяют в соответствии с размерами модельного очага пожара, но не менее длины бруска, указанной в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры модельных очагов пожара класса А

Обозначение модельного очага пожара	Количество деревянных брусков в штабеле, шт.	Длина бруска, $\pm 10$ мм	Число брусков в слое, шт.	Число слоев	Площадь свободной поверхности модельного очага, м
1А	72	500	6	12	4,70
2А	112	635	7	16	9,36
3А	144	735	8	18	13,89
4А	180	800	9	20	18,66
6А	230	925	10	23	27,70
10А	324	1100	12	27	46,04
15А	450	1190	15	30	66,19
20А	561	1270	17	33	86,14

В качестве горючего материала используют бруски хвойных пород не ниже третьего сорта по ГОСТ 8486 сечением  $(40\pm 1)$  мм и длиной, указанной в таблице Б.1. Влажность пиломатериала должна составлять от 10 до 20 % по ГОСТ 16588.

Бруски, образующие наружные грани штабеля, допускается скреплять для прочности скобами или гвоздями. Штабель выкладывают таким образом, чтобы бруски каждого последующего слоя были перпендикулярны к брускам нижележащего слоя. При этом по всему объему должны образовываться воздушные каналы прямоугольного сечения.

Параметры металлического поддона для горючей жидкости, который помещают под штабель, должны соответствовать таблице 2.

Таблица 2 – Параметры поддона для разжигания модельного очага

Обозначение модельного очага пожара	Размеры поддона $L \times B \times H$ , мм *	Минимальный объем воды, дм	Количество бензина, дм
1А	400х400х100	5	1,1
2А	535х535х100	9	2,0
3А	635х635х100	12	2,8
4А	700х700х100	15	3,4
6А	825х825х100	20	4,8
10А	1000х1000х100	30	7,0
15А	1090х1090х100	35	7,6
20А	1170х1170х100	40	8,2

### ***Подготовка к испытаниям***

Выкладывают деревянный штабель (см. рисунок 1, таблицу 1). Заливают в поддон соответствующего размера (см. таблицу 2) воду. При этом должна образоваться сплошная поверхность жидкости, закрывающая все неровности днища поддона. На слой воды наливают автомобильный бензин, соответствующий требованиям ГОСТ Р 51105, в количестве, указанном в таблице 2.

Поддон помещают под штабель таким образом, чтобы центры штабеля и поддона совпали.

### ***Проведение испытаний***

Поджигают бензин в поддоне. Через 2 мин горения бензина поддон с бензином убирают из-под штабеля.

Через  $(7 \pm 1)$  мин с того момента, как противень был убран из-под штабеля, при условии, что штабель со всех сторон охвачен пламенем, приступают к тушению модельного очага пожара. Общее время горения бензина и деревянного штабеля должно составить  $(9 \pm 1)$  мин.

Тушение начинают с фасада модельного очага с удобного для оператора расстояния, зависящего от длины струи ОТВ. В процессе тушения оператор может произвольно изменять расстояние до очага горения, чтобы добиться более эффективного тушения.

Во время тушения струю ОТВ направляют вверх и вниз вдоль каждой из сторон штабеля (кроме одной из боковых сторон и нижней поверхности штабеля), обходя его вокруг. Для достижения более эффективного тушения допускается прерывать подачу ОТВ на очаг горения.

Максимальное время тушения модельного очага пожара не должно превышать 10 мин.

В процессе тушения фиксируют результат тушения.

После визуально наблюдаемого окончания тушения модельного очага фиксируют время до повторного воспламенения.

Модельный очаг пожара считают потушенным, если в течение 10 мин не произошло повторного воспламенения с последующим устойчивым горением штабеля.

Тушение проводят три раза. Считают, что испытание выдержано, если в двух попытках из трех модельный очаг пожара был потушен. Допускается не проводить третье тушение, если в первых двух результат был положительным.

### **Огневые испытания по тушению модельных очагов пожара класса В**

Модельный очаг представляет собой круглый противень, изготовленный из листовой стали, параметры и размеры которого приведены в таблице 3. В качестве горючего материала применяют автомобильный бензин, соответствующий требованиям ГОСТ Р 51105. Предпочтение следует отдавать бензину с более низким октановым числом.

#### ***Подготовка к испытаниям***

Противень, устанавливают горизонтально, таким образом, чтобы обеспечить беспрепятственный доступ к нему со всех сторон. Заливают в противень воду в количестве, соответствующем рангу модельного очага пожара (таблица 3). При этом необходимо обеспечить сплошную поверхность воды, закрывающую неровности дна противня. На слой воды наливают автомобильный бензин в количестве, указанном в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры модельных очагов пожара класса В

Ранг модельного очага пожара	Количество, дм		Размеры противня, мм				Ориентировочная площадь модельного очага, м
	воды	горючего	Внутренний диаметр		Высота борта $\pm 5$	Толщина стенки (не менее)	
			номинальное значение	допуск			
1В	0,3	0,7	200	$\pm 15$	100	1,0	0,03
2В	0,7	1,3	300				0,07
3В	1,0	2,0	350			1,5	0,10
5В	1,5	3,5	450				0,16
8В	3	5	600	$\pm 30$	150	2,0	0,26
13В	4	9	700				0,41
21В	7	14	900				0,66
34В	11	23	1200			2,5	1,07
55В	18	37	1500				1,73
70В	23	47	1700				2,20
89В	30	59	1900		200	2,80	
113В	38	75	2150			3,56	
144В	48	96	2400			4,52	
183В	61	122	2700			5,77	
233В	78	155	3000			7,07	

Примечание - Число перед буквой "В" в обозначении модельного очага пожара указывает на количество жидкости в противне ( - вода и - бензин), выраженное в дм .

Очаги устанавливают вплотную (борт к борту) вокруг базового очага под различными углами (в плане), которые указаны в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры сложных очагов пожара класса В

Ранг сложного очага пожара класса В	Количество очагов пожара ранга 233В, шт.	Очаг пожара ранга 21В	
		Количество, шт.	Углы в плане между очагами 21В
233В	1	-	-
233В-2	1	2	180°
233В-3	1	3	120°
233В-4	1	4	90°

### ***Проведение испытаний***

При помощи факела поджигают бензин в противне. Выдерживают время свободного горения бензина - 60 с, после чего приступают к тушению. Тушение начинают с расстояния, удобного для оператора и зависящего от ранга модельного очага и длины струи ОТВ. В процессе тушения оператор может

произвольно изменять расстояние до очага горения. В процессе тушения запрещается оператору заступать внутрь модельного очага. В процессе тушения фиксируют:

- время подачи огнетушащего вещества;
- результат тушения.

После окончания тушения фиксируют время до возможного повторного воспламенения. Очаг считают потушенным, если в течение 1 мин не произошло его самовоспламенение.

Тушение проводят три раза. Считают, что огнетушитель выдержал испытание, если в двух попытках из трех модельный очаг пожара был потушен. Допускается не проводить третье тушение, если в первых двух результат был положительным. После каждого испытания горючее выжигают, охлаждают противень до температуры ниже температуры самовоспламенения бензина и полностью обновляют его содержимое в соответствии с требованиями таблицы 3.

#### 4 ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ

##### *Оценка эффективности ТАВИ при тушении очагов пожаров классов А и В*

Тушение после поджига осуществлять струями ТАВИ, подаваемыми через дальнобойный ствол с минимальным расходом, при различных концентрациях ингибитора в недогретой воде и мощности электромагнитной обработки.

Фиксируется время тушения очага, расход, температура и давление недогретой воды в различных сочетаниях расхода раствора ингибитора и мощности электромагнитной обработки. Варианты подачи ТАВИ при экспериментах указаны в таблице 5.

Таблица 5 – Варианты подачи ТАВИ и ЛП

№ п/п	Температура и давление воды на выходе из АПМ	Вид и расход ТАВИ, ингибитора, степень электромагнитной обработки	Способ подачи ТАВ или ЛП	Место и направление подачи ТАВИ
1.	Температура воды - $170 \pm 5^\circ\text{C}$ ; Давление воды – $2,0 \pm 0,4$ МПа	Вид – ТАВИ Расход – $0,5 \pm 0,3$ л/с Расход раствора ингибитора – $0,1 \pm 0,005$ л/с (400 л/ч)	Дальнобойный ствол	С одной стороны (при отсутствии ветра)
2.	Температура воды - $170 \pm 5^\circ\text{C}$ ; Давление воды – $2,0 \pm 0,4$ МПа	Вид – ТАВИ Расход – $0,5 \pm 0,3$ л/с Расход раствора ингибитора – $0,05 \pm 0,005$ л/с (200 л/ч)	Дальнобойный ствол	С двух сторон сепаратора (при отсутствии ветра)
3.	Температура воды - $170 \pm 5^\circ\text{C}$ ; Давление воды – $2,0 \pm 0,4$ МПа	Вид – ТАВИ Расход – $0,5 \pm 0,3$ л/с Расход раствора ингибитора – $0,025 \pm 0,005$ л/с (100 л/ч)	Дальнобойный ствол	С одной стороны (при отсутствии ветра)
4.	Температура воды - $170 \pm 5^\circ\text{C}$ ; Давление воды – $2,0 \pm 0,4$ МПа	Вид – ТАВИ Расход – $0,5 \pm 0,3$ л/с Расход раствора ингибитора – $0,1 \pm 0,005$ л/с (400 л/ч) Мощность электромагнитной обработки 25 %	Дальнобойный ствол	С одной стороны (при отсутствии ветра)

Окончание таблицы 5

№ п/п	Температура и давление воды на выходе из АПМ	Вид и расход ТАВИ, ингибитора, степень электромагнитной обработки	Способ подачи ТАВ или ЛП	Место и направление подачи ТАВИ
5.	Температура воды - $170 \pm 5^\circ\text{C}$ ; Давление воды – $2,0 \pm 0,4$ МПа	Вид – ТАВИ Расход – $0,5 \pm 0,3$ л/с Расход раствора ингибитора – $0,1 \pm 0,005$ л/с (400 л/ч) Мощность электромагнитной обработки 75 %	Дальнобойный ствол	С одной стороны сепаратора по направлению ветра
6.	Температура воды - $170 \pm 5^\circ\text{C}$ ; Давление воды – $2,0 \pm 0,4$ МПа	Вид – ТАВИ Расход – $0,5 \pm 0,3$ л/с Расход раствора ингибитора – $0,1 \pm 0,005$ л/с (400 л/ч) Мощность электромагнитной обработки 100 %	Дальнобойный ствол	С двух сторон сепаратора (при отсутствии ветра)



## 5 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

5.1 При проведении испытаний участники обязаны знать и выполнять требования Правил по охране труда.

5.2 Руководитель испытаний обязан организовать инструктаж участников испытаний, направленных для выполнения работ, с разъяснением характера и последовательности работ.

5.3 В местах проведения испытаний должны быть установлены предупреждающие знаки «Осторожно! Прочие опасности» по ГОСТ 12.4.026 и поясняющая надпись «Идут испытания», а на рабочих местах испытателей - вывешены инструкции и правила безопасности.

5.4 К работам по эксплуатации АПМ допускаются лица, имеющие необходимую квалификацию и обученные «Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», утвержденным Госэнергонадзором в установленном порядке, а также «Правилам устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов» ПБ 10-574.

5.5 К работе с приборами и оборудованием АПМ допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности и мерам безопасной работы с этими приборами и оборудованием.

5.6 Участники испытаний все работы должны производить в боевой одежде и снаряжении.

5.7 Запрещается подавать температурно-активированную воду в незакрепленные рукавные линии до выхода ствольщиков на исходные позиции.

5.8 При наматывании рукавов на рукавную катушку, необходимо держаться за поручни барабана, не допуская повреждения рук, следить за надежной фиксацией рукавной катушки.

5.9 Не допускать попадания температурно-активированной воды на оголенные участки тела на расстоянии менее 0,6 м от ствола.

5.10 Все работы с использованием генератора, за исключением его просушки, необходимо выполнять при заземленном комплексе. Заземляющее устройство должно быть выполнено согласно «Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей» применительно к передвижным электроустановкам.

5.11 При работе с автомобилем, приборами и оборудованием необходимо соблюдать указания мер безопасности, изложенные в их эксплуатационной документации.

5.12 Запрещается производить работы в АПМ при работающем двигателе без включенного ручного тормоза автомобиля.

5.13 Запрещается производить работы с использованием неисправного автомобиля, инструмента и оборудования.

5.14 Во избежание поражения электрическим током при работе с электрифицированными приборами, инструментами и оборудованием (электроэнергетическая установка и др.) комплекса запрещается прикасаться к любым токоведущим проводам, клеммам, а также к внутренним узлам аппаратурных блоков.

5.15 Все ремонтные и профилактические работы с приборами, инструментами оборудованием и автомобилем АПМ должны проводиться при выключенном двигателе автомобиля.

## **6 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ**

Для проведения государственных испытаний используют изготовленный ООО «Аква-ПиРо-Альянс» измерительный комплекс, который обеспечивает измерение основных параметров установки получения ТАВ.

### ***Измерительный комплекс установки получения ТАВ***

Измерительный комплекс установки получения ТАВ предусматривается для измерения параметров рабочей среды, управления работой установки в заданных режимах, выведения необходимых параметров на щит оператора.

Для приема и обработки сигналов с датчиков давления (разрежения), термопреобразователей, расхода предусмотрены измерители-регуляторы Овен ТРМ 202, Овен ТРМ 201 и Овен ТРМ 138. Для приема и обработки сигналов с одноэлектродных датчиков уровня воды предусмотрены сигнализатор уровня жидкости трехканальный Овен САУ-М7Е.

Для измерения уровня воды в емкостях предусматривается поплавковый выключатель ПК1. Для визуального контроля оператором необходимых параметров предусмотрены контрольно-измерительные приборы на щите:

- 1-й ТРМ – давление воды на входе, МПа;
- 2-й ТРМ – давление воды рабочее, МПа;
- 3-й ТРМ – давление воды на выходе, МПа;
- 4-й ТРМ – температура воды на выходе °С;
- ТРМ 138 – дополнительные параметры воды;
- светодиод и САУ-М7Е – уровень воды в емкостях.

Настройка приборов ТРМ осуществляется при помощи компьютера, посредством подключения через преобразователь интерфейсов ОВЕН АС4 (USB/RS-485).

Питание на приборы измерительного комплекса и щита оператора предусмотрено от щита генератора.

Измерительный комплекс выполнен в двух модификациях:

1) для работы установки по получению ТАВ с одной линией давления до 4 МПа и температурой до 250 °С;

2) для работы установки по получению ТАВ с двумя линиями:

- до 4 МПа и температурой до 250 °С;
- до 12,5 МПа и температурой до 350 °С.

Щит оператора универсальный и рассчитан для обеих модификаций, при этом изменяются только приборы ТРМ:

- при модификации с двумя линиями ТРМ 202;
- при модификации с одной линией ТРМ 201.

Описание измерительного и управляющего оборудования 1-й модификации представлено в таблице 6.

Описание измерительного и управляющего оборудования 2-й модификации представлено в таблице 7.

Обозначения измеряемых параметров приведены на принципиальной гидравлической схеме АПМ (чертеж АПМ 00.00.000ГЗ – Приложение 1)

Таблица 6 – Описание основного измерительного и управляющего оборудования 1-й модификации

№ п/п	№ на схеме	Наименование	Назначение	Параметры среды					
				Давление, МПа		Температура, °С		Расход, л/с	
				мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
1.	T1	Термопреобразователь ТС194-Pt100.В3.60.1,5	Температура слива воды в емкость ЕП	0	1,0	0	200	0	6,0
2.	T2	Термопреобразователь ТС194-Pt100.В3.60/1,5	Температура воды на выходе 1	0	4,0	0	250	0	4
3.	T3	Термопреобразователь ТС194-Pt100.В3.60/5	Температура воды в емкости Е1	0	0,03	0	150	-	-
4.	T4	Термопреобразователь ТС194-Pt100.В3.60/2,5	Температура воды рабочая	0	12,5	0	350	0	4
5.	T5	Термопреобразователь ТПК075-0210.200/3	Температура отходящих газов	0		0	650		
6.	МН1	Датчик давления	Давление воды на выходе 1	0	4,0	0	250	0	4
7.	МН2	Датчик давления	Давление воды рабочее 1	0	4,0	0	250	0	4
8.	МН3	Манометр	Давление забора воды	0	1,0	0	60	0	40
9.	МН8	Датчик давления	Давление воды на входе в УПВ 1	0	4,0	0	80	0	6
10.	МН9	Датчик разрежения	Разрежение входе в насос Н3	0	- 0,1	0	80	0	6
11.	РХ	Расходомер	Расход воды	0	12,5	0	80	0,3	7
12.	УР	Одноэлектродные датчики уровня воды 3 шт.	Уровень воды в емкости Е1	0	0,03	0	80		
13.	КП1	Поплавковый выключатель МАС 3	Максимальный уровень воды в емкости Е1	0	0,03	0	80		

Таблица 7 – Описание основного измерительного и управляющего оборудования при 2-й модификации

№ п/п	№ на схеме	Наименование	Назначение	Параметры среды					
				Давление, МПа		Температура, °С		Расход, л/с	
				мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
1.	T1	Термопреобразователь ТС194-Pt100.В3.60/1,5	Температура слива воды в емкость ЕП	0	1,0	0	200	0	6,0
2.	T2	Термопреобразователь ТС194-Pt100.В3.60/1,5	Температура воды на выходе 1	0	4,0	0	250	0	4
3.	T3	Термопреобразователь ТС194-Pt100.В3.60/5	Температура воды в емкости Е1	0	0,03	0	150	-	-
4.	T4	Термопреобразователь ТС194-Pt100.В3.60/2,5	Температура воды рабочая	0	12,5	0	350	0	4
5.	T5	Термопреобразователь ТПК075-0210.200/3	Температура отходящих газов	0		0	650		
6.	T6	Термопреобразователь ТС194-Pt100.В3.60/1,5	Температура воды на выходе 2	0	12,5	0	350	0	4
7.	MН1	Датчик давления	Давление воды на выходе 1	0	4,0	0	250	0	4
8.	MН2	Датчик давления	Давление воды рабочее 1	0	4,0	0	250	0	4
9.	MН3	Манометр	Давление забора воды	0	1,0	0	60	0	40
10.	MН4	Датчик давления	Давление воды на выходе 2	0	12,5	0	350	0	4
11.	MН5	Датчик давления	Давление воды рабочее 2	0	12,5	0	350	0	4
12.	MН6	Датчик давления	Давление воды на входе в УПВ 1	0	12,5	0	80	0	6
13.	MН7	Датчик разрежения	Разрежение воды на входе в насос Н3	0	- 12,5	0	80	0	6
14.	MН8	Датчик давления	Давление воды на входе в УПВ 2	0	4,0	0	80	0	6
15.	MН9	Датчик разрежения	Разрежение воды на входе в насос Н1	0	-0,1	0	80	0	6

## Окончание таблицы 7

№ п/п	№ на схеме	Наименование	Назначение	Параметры среды					
				Давление, МПа		Температура, °С		Расход, л/с	
				мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
16.	РХ	Расходомер	Расход воды	0	12,5	0	80	0	6
17.	УР	Одноэлектродные датчики уровня воды 3 шт.	Уровень воды в емкости Е1	0	0,03	0	80		
18.	КП1	Поплавковый выключатель МАС 3	Максимальный уровень воды в емкости Е1	0	0,03	0	80		

## 7 МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Предел допустимой основной погрешности приборов, используемых для испытаний установки получения ТАВ принять:

- по температуре  $\pm 0,5$  %;
- по давлению  $\pm 0,5$  %;
- по расходу  $\pm 2$  %.

Порядок показаний измеряемых параметров

- температура 0,1 °С;
- давление 0,01 МПа;
- расход 0,01 л/с.

При измерительном контроле АПМ использовать метрологические аттестованные средства измерения, перечень и точность которых указаны в таблице 8.

Таблица 8 – Средства измерений

№ п/п	Наименование параметра	Назначение	Класс точности
1.	Линейки, штангенциркуль, м	Геометрические размеры	
2.	Расход газа	Счетчик газа	1,5
3.	Температура стенок	Пирометр излучения	1
4.	Давление сред	Манометр	1,5
5.	Состав продуктов сгорания: O <sub>2</sub> ; CO; CO <sub>2</sub> ; NO <sub>x</sub> ; $\alpha$ ; КПД; $t_{уг}$	Газоанализатор KM900 LOG QUINTOX или другие марки (зав.№54702022) (инв.№26). Св-во № 448/119305 от 09.12.05	
6.	Напряжение, сила тока	Вольтметр Амперметр	1,5 1,5
7.	Сопротивление изоляции, сопротивление защитного заземления	Омметр	1,5
8.	Освещенность	Люксметр	1,5

При измерительном контроле использовать метрологические аттестованные средства измерения, точность которых указаны в таблице 9.



Таблица 9 - Допустимая погрешность измерения параметров средствами измерений

№ п/п	Измеряемый параметр	Допустимая погрешность измерения параметров	
		Абсолютная	Относительная, %
1.	Линейный размер, мм: от 0 до 10 св. 10 " 102 " 103 " 104 " 104		
		0,1	-
		1	-
		-	1
		-	0,5
2.	Масса, г: от 0 до 1 св. 1 " 102 " 102 " 103 " 103 " 106 " 106		
		$1 \times 10^{-4}$	-
		0,2	-
		5	-
		-	0,5
		-	0,2
3.	Скорость: а) линейная, м/с: от 0 до 5 св. 5 б) частота вращения, об/мин		
		0,1	-
		-	1,5
		-	1
4.	Время, с: от 0 до 3х100 включ. св. 3х100 до 3,6х1000 включ. св. 3,6 х 1000		
		0,1	-
		-	0,2
		-	0,1
5.	Площадь, м <sup>2</sup>	-	1
6.	Сила, Н	-	3
7.	Угловые величины, °	1	-
8.	Объем, вместимость, м <sup>3</sup>	-	1,5
9.	Освещенность, лк	-	10
10.	Уровень виброскорости и виброускорения, м/с <sup>2</sup>	0,2	-
11.	Уровень шума, дБА	2	-
12.	Влажность (относительная), св. 30 % (t > 10 ° С)	-	10
13.	Температура, °С	0,5	-
14.	Размеры кабины, салона, мм	0,5	-
15.	Избыточное давление, МПа	0,08	0,5
16.	Расход, л/с	0,08	2

## **8 ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ**

Результаты испытаний оформляются актом и протоколом испытаний, в которые заносятся параметры (Приложение В), полученные в процессе испытания и измерений. Акт и протокол испытаний подписывается комиссией, утвержденной приказом департамента пожарно-спасательных сил, специальной пожарной охраны и сил гражданской обороны МЧС России.

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

**(обязательное)**

**АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель начальника Академии  
по учебной работе  
кандидат исторических наук, доцент

«07» Июль 2023  
В.С. Шнылко



### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук преподавателя кафедры пожарной техники в составе УНК ПАСТ Академии ГПС МЧС России старшего лейтенанта внутренней службы Халикова Рината Валерьевича

Комиссия в составе:

- начальника УНК ПАСТ, к.т.н., доцента, полковника внутренней службы Климовцова Василия Михайловича;
  - заместителя начальника УНК ПАСТ – начальника кафедры пожарной техники, к.т.н., доцента, подполковника внутренней службы Двоенко Олег Викторовича;
  - старшего преподавателя кафедры пожарной техники в составе УНК ПАСТ, к.т.н., майора внутренней службы Гаплаева Азиза Ахмед-Бешировича;
- составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Халикова Р.В. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.1. – Пожарная безопасность (технические науки) внедрены для проведения практических и лабораторных работ по дисциплине «Пожарная и аварийно-спасательная техника» для обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».

Начальник УНК ПАСТ  
к.т.н., доцент  
полковник внутренней службы

В.М. Климовцов

Заместитель начальника УНК ПАСТ –  
начальник кафедры пожарной техники  
к.т.н., доцент  
подполковник внутренней службы

О.В. Двоенко

Старший преподаватель кафедры пожарной  
техники в составе УНК ПАСТ  
к.т.н.  
майор внутренней службы

А.А.-Б. Гаплаев

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО «Норнат»



А.В. Паламарчук  
10 2021

**АКТ**

**на внедрения результатов исследований, полученных при выполнении  
диссертационной работы Халикова Рината Валерьевича**

Комиссия в составе:

- технического директора ООО «Норнат» Лактюхина И.А.,  
- начальника производства ООО «Норнат» Тимохина Д.С., составила  
настоящий акт о том, что при проектировании устройства дозирования: агрегата  
электронасосного дозировочного одноплунжерного типа НД мощностью до 2,5 кВт  
для модернизации конструкции модельного ряда многоцелевых пожарно-  
спасательных автомобилей с установкой пожаротушения температурно-  
активированной водой использовались параметры дозирования, определенные в  
диссертационной работе Халикова Р.В.

Комиссия:

Технический директор  
ООО «Норнат»

Начальник производства  
ООО «Норнат»

И.А. Лактюхин

Д.С. Тимохин



### АКТ

#### на внедрения результатов исследований, полученных при выполнении диссертационной работы Халикова Рината Валерьевича

Комиссия в составе:

- технического директора ООО «МПЗ» Блохина Игоря Викторовича,
- главного инженера ООО «МПЗ» Воронова Сергея Викторовича,
- начальника сборочного цеха ООО «МПЗ» Орлова Владимира Александровича,

составила настоящий акт о том, что при модернизации конструкции модельного ряда многоцелевых пожарно-спасательных автомобилей с установкой пожаротушения температурно-активированной водой устройствами дозирования химических компонентов, с целью повышения ингибирующей способности струй температурно-активированной воды при объемном пожаротушении использовалась программа эксперимента, разработанная Халиковым Р.В. в своей диссертационной работе.

По результатам экспериментального исследования составлен отчет о возможности применения устройств дозирования для повышения ингибирующей способности струй температурно-активированной воды при объемном пожаротушении, а также рекомендации по внесению конструктивных решений в модельный ряд многоцелевых пожарно-спасательных автомобилей с установкой пожаротушения температурно-активированной водой.

Комиссия:

Технический директор  
ООО «МПЗ»

Главный инженер

Начальник сборочного цеха  
ООО «МПЗ»



Блохин И.В.

Воронов С.В.

Орлов В.А.