

На правах рукописи



Халиков Ринат Валерьевич

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

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

Научный руководитель: **Роевко Владимир Васильевич**
кандидат технических наук, профессор,

Официальные оппоненты: **Максименко Александр Фёдорович**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И.М. Губкина», проректор по международной
работе

Корольченко Дмитрий Александрович
доктор технических наук, доцент
НИУ МГСУ,
кафедра Комплексной безопасности в
строительстве, заведующий

Ведущая организация: ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Защита диссертации состоится «23» января 2024 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 04.2.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/ee6/uyewscuu33qga7ehrx3f5m3q8ejjbiln/Диссертация%20Халикова%20Р.В..pdf>

Автореферат разослан «24» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Соковнин А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 Железнодорожск 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. 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.), так и зарубежные (U. Warzyńska, W. Kollek, K. Kutrowski, N. Gasunie, H. Liu, F. Wang и др.). 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. Навценя, И.А. Болодьян и других были изучены процессы химического ингибирования и их применение для объемного пожаротушения, свойства температурно-активированной и тонкораспыленной воды.

Однако, несмотря 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 разветленно-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 разветленно-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 газокompрессорных 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 дозирочного 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 конференции «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 приложения. Содержание работы изложено на 134 страницах текста, включает в себя 8 таблиц, 51 рисунок, список литературы из 131 наименования, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования. Показаны научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту, и сведения о внедрении и апробации результатов работы.

В первой главе работы «Интегрированный подход к анализу пожаров энергетических объектов газокompрессорных станций» представлены результаты интегрированного анализа статистических данных по пожарам и

авариям, произошедшим на газокompрессорных станциях за период с 2012 по 2022 гг.

Сценарный подход к анализу пожаров позволил определить основные группы веществ, участвующих в пожарах замкнутых объемов газокompрессорных станций (далее – ГКС): горючие жидкости (турбинное, судовое и трансформаторное масло) 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.

Анализ основных огнетушащих составов, применяемых для объемного пожаротушения показал, что наиболее важны 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, тем самым повышая пожаровзрывобезопасность. Наиболее эффективными огнетушащими характеристиками физического воздействия на зону горения обладает температурно-активированная вода (далее – ТАВ).

На основе математического анализа реальных пожаров были определены и описаны сценарии развития пожаров замкнутых объемах ГКС (рисунок 1). Было установлено, что сценарии пожаров с участием термодинамически стабильных жидкостей являются самыми сложными с точки зрения пожаротушения. Основной причиной возникновения пожаров данного сценария является разгерметизация трубопровода масляной системы.

Группы сценариев пожаров с разгерметизацией масляных трубопроводов, могут происходить 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. Кроме того, при пожарах в замкнутых объемах ГКС происходит разрушение остекления, технологических конструкций, то есть происходит превышение нормативной негерметичности помещения, поэтому при сохранении расхода подаваемых огнетушащих веществ происходит снижение эффективности объемного пожаротушения.

Анализ статистических данных показывает, что отключение внешней линии электропередач не предотвращает возникновение опасности поражения электрическим током. Это связано с тем, что в 60 % случаев, автоматика управления воспринимает нарушение в электроснабжении ГКС во время пожара, как сигнал к включению дизельной электростанции (далее – ДЭС), поэтому создаются условия, когда необходимо производить тушение ЭУ, находящихся под напряжением.

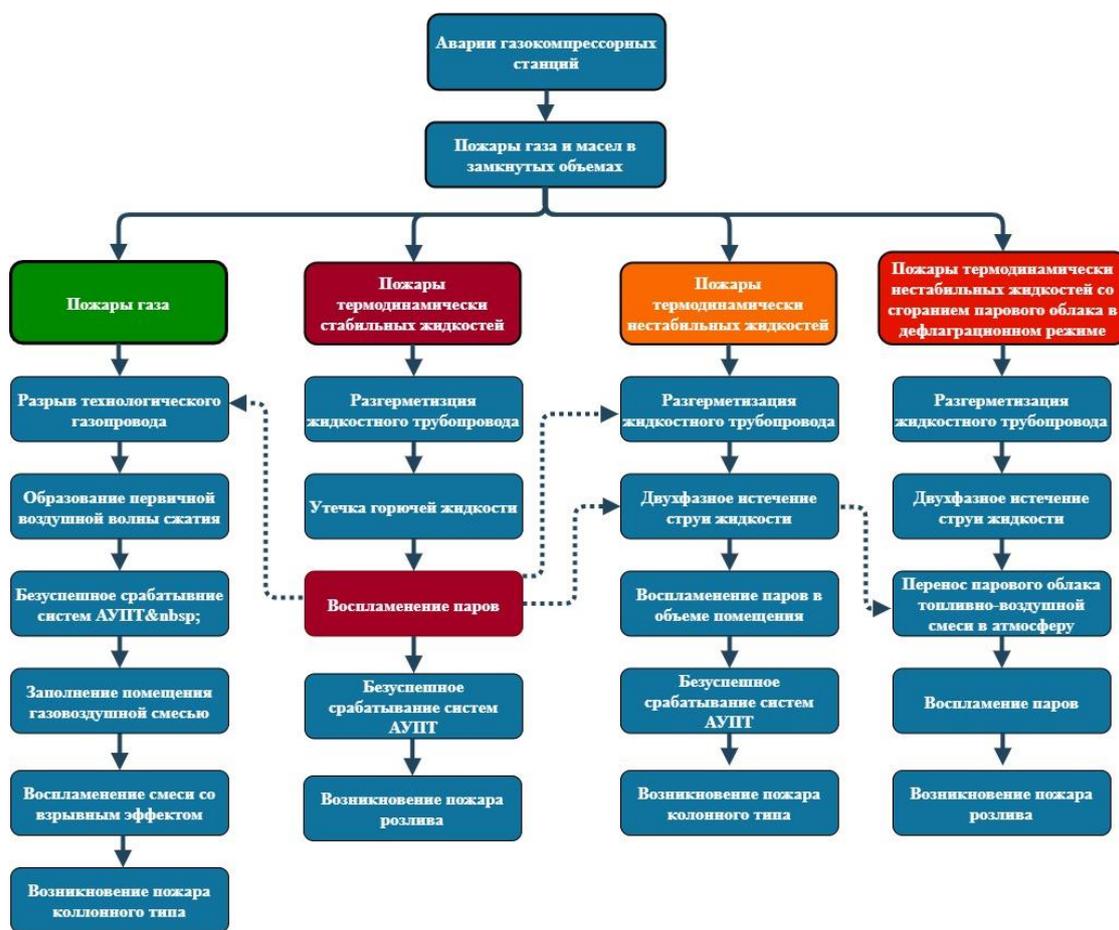


Рисунок 1 – Блок-схема групп сценариев пожаров и аварий в объемах помещений ГКС

Анализ пожаров и сценариев их развития показал, что горение масел происходит в газовой фазе, состоящих более чем на 95 % из предельных углеводородов. Анализ результатов исследований, выполненных в области обеспечения пожарной безопасности объектов ГКС, позволяет сделать вывод, что ввиду специфики объектов и возникающих при тушении пожаров особенностей, для эффективной борьбы с пожарами необходимо совершенствование объемного пожаротушения.

Во второй главе работы «Выбор метода и разработка способа объемного пожаротушения газокompрессорных станций температурно-активированной водой с ингибирующими свойствами» описаны тепловая и разветленно-цепная теории горения применительно к горению предельных углеводородов. Было выяснено, что при разветленно-цепном процессе горения (далее – РЦП) предельных углеводородов процессы деления атомов и радикалов сводятся к РЦП горения водорода, описанному академиком Н.Н. Семеновым. Разработана вероятностная модель разветленно-цепного процесса горения предельных углеводородов, позволяющая определить наиболее реактивно способные атомы и радикалы – носители цепи (далее – НЦ), возникающие при газофазном горении, благодаря тому, что в развитии цепи конечную роль играет РЦП горения водорода, выражение (1).

$$P(\text{РЦП}) = \frac{P\left(\frac{N_{\text{Цактив}}}{N_{\text{Цобщ}}}\right)P(N_{\text{Цобщ}})}{P(N_{\text{Цактив}})}, \quad (1)$$

где $P(\text{РЦП})$ – вероятность наступления теоретического РЦП горения; $P(N_{\text{Цактив}})$ – общее количество реакций НЦ с реагентами, приводящими к наступлению РЦП горения водорода; появления конкретного исхода среди остальных возможных; $P(N_{\text{Цобщ}})$ – общее количество возможных реакций НЦ и реагентов.

Для взаимосвязи реального наступления РЦП горения для конкретного НЦ с теоретическим, рассчитанным по модели принимаем допустимый интервал разветвления (рисунок 2), построенный в соответствии с энергетическими характеристиками НЦ.



Рисунок 2 – Интервальная схема разветвленно-цепного процесса горения предельных углеводородов

Анализ интервальной схемы вероятности разветвленно-цепного процесса горения предельных углеводородов в замкнутом объеме (см. рисунок 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 0,15 до 0,75 вероятности разветвления. С ее помощью был определен наиболее эффективный ингибитор при пожарах масел – $K_4[Fe(CN)_6]$ (гексацианоферрат(II) калия). В качестве средства доставки ингибирующего вещества в зону газофазного горения выбрана среда ТАВ. Среда ТАВ состоит из полидисперсной капельной фазы и монодисперсной паровой фазы, при этом соотношение фаз зависит от технического средства подачи и характеристик установки получения ТАВ. Охлаждающая способность струй ТАВ заключается в образовании площади теплообмена капельной фазой, которая может быть определена с помощью уравнения:

$$S_{\text{общ}} = 4\pi \left([R_{\text{сред}}]^2 e^{-\left(\frac{R_{\text{сред}}}{\sqrt{2} \cdot R_{\text{общ}}}\right)^2} \right), \quad (2)$$

где $S_{\text{общ}}$ – общая площадь боковой поверхности капель, м^2 ; $R_{\text{общ}}$ – дисперсия распределения капель, м ; R – математическое ожидание радиуса капли каждой из групп, м .

Полученное выражение (2) устанавливает зависимость между создаваемой площадью теплообмена струями ТАВ и средним радиусом капель. Однако общее представление среднего радиуса не применимо для рассматриваемой задачи, так как выражение для нахождения среднего значения при бимодальном распределении лишено физического смысла. Применительно к решению данной задачи целесообразно использовать метод нахождения среднего диаметра по Заутеру. Для выбора оптимальных параметров и средств подачи ТАВ было проведено математическое моделирование процесса тушения машинного зала ГКС в программно-аппаратном комплексе MATLAB (рисунки 3–4).

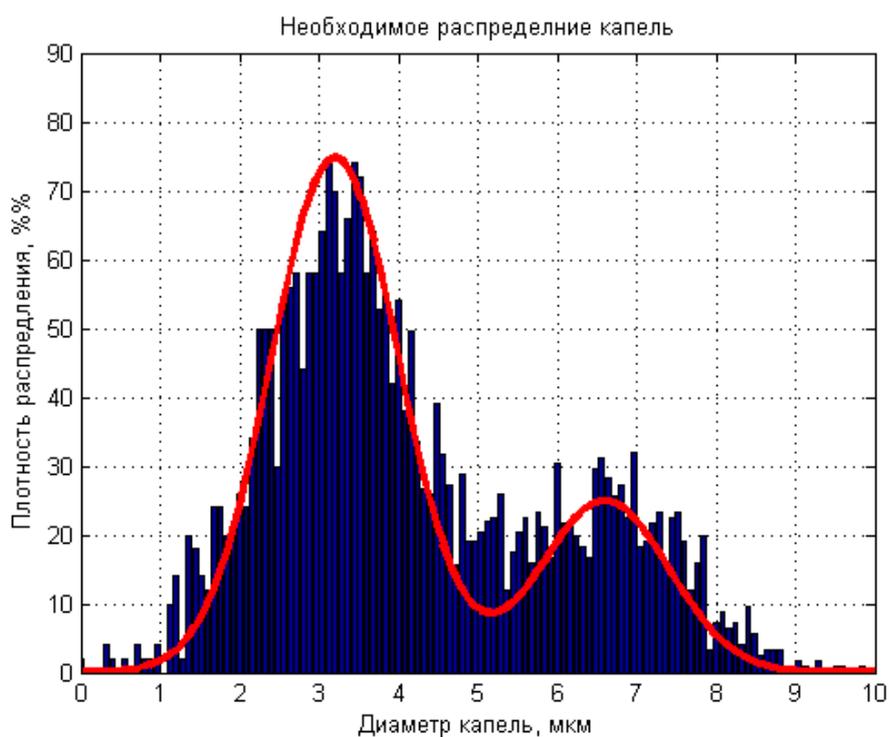


Рисунок 3 – Эффективное распределение капель в струе ТАВ

По результатам моделирования было установлено, что для повышения эффективности ингибирования РЦП горения необходимо использовать технические средства подачи струй ТАВ, позволяющих создавать капельную фазу, имеющую математическое ожидание диаметра капель близкую к диаметру 3,2 мкм. Например, стволы подачи ТАВ с насадком-распылителем вида «сопло Лавалья», который позволяет получить большую плотность распределения капель первой моды за счет их нуклеации и коагуляции в стволе.

Для исследования минимальной гасящей концентрации ингибирующей соли в высокодисперсных водных растворах была проведена серия экспериментальных исследований времени подавления пламенного горения предельных углеводородов в объеме помещения. По результатам экспериментов была определена минимальная гасящая концентрация (далее – МГК) ингибитора, время тушения и удельный расход.

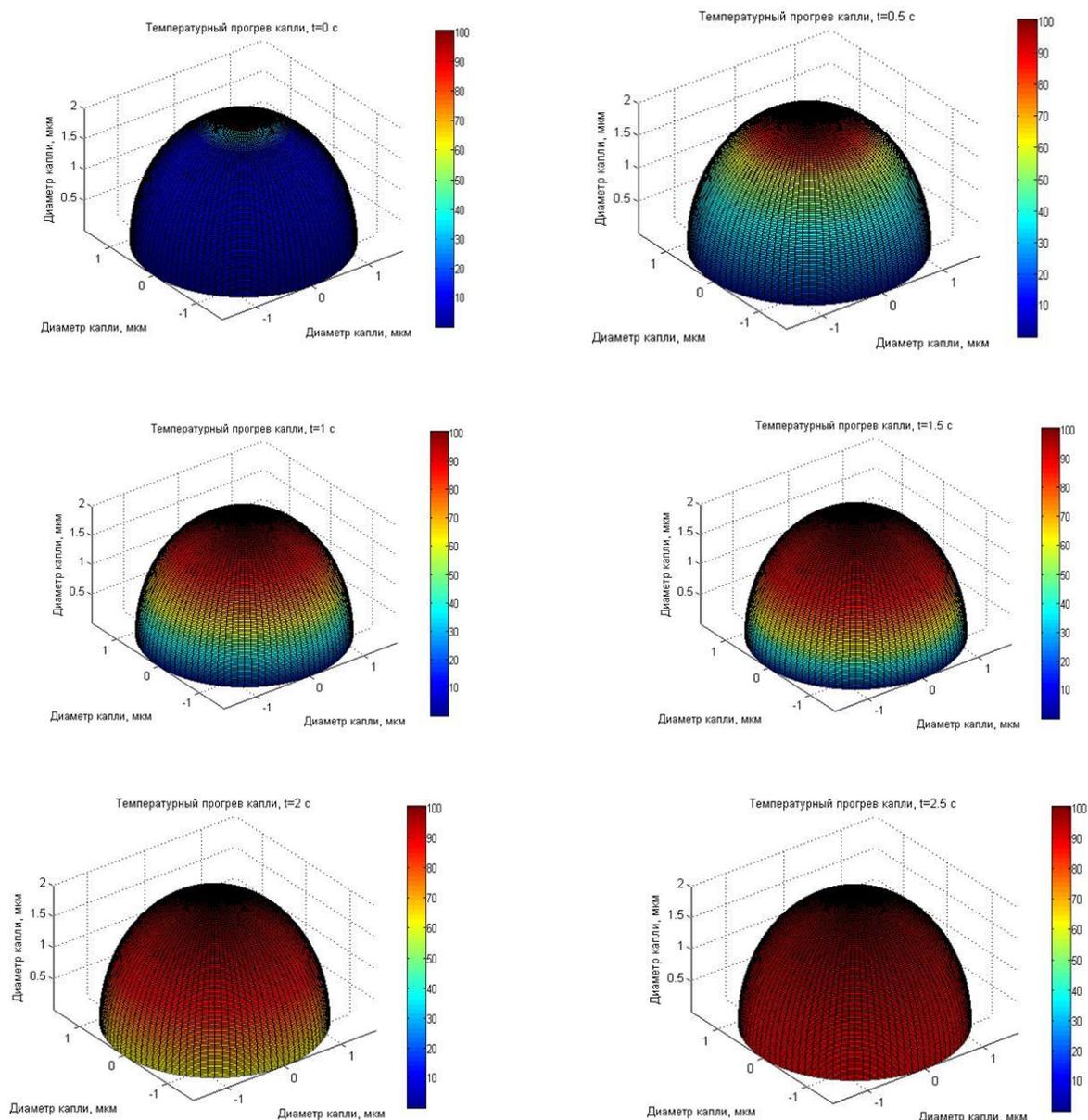


Рисунок 4 – Визуализация процесса прогрева капли диаметром 3,2 мкм в высокотемпературных тепловых потоках пожара

Расчетные значения МГК, времени тушения и удельного расхода от интенсивности подачи водного раствора ингибирующей соли были определены на основе уравнений гидродинамики (3–5), с учетом следующих допущений:

- 1) конвективная колонка имеет коническую форму;
- 2) границы конвективной колонки являются условно непроницаемыми;
- 3) пренебрегаем влиянием кривизны условной поверхности конвективной колонки;
- 4) принимаем границу пламенной зоны там, где смыкается концентрационный предел по кислороду;
- 5) для расчетов примем величину плотности воздуха при 20 °С равную $1,28 \text{ кг/м}^3$ и величину удельной среднюю скорость выгорания масел, равную $0,01 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$;

б) учитываем, что средняя высота производственных помещений объектов ГКС согласно технической документации варьируется от 1,8 до 2,8 м.

Интенсивность подачи ингибирующей соли струями огнетушащего состава определяют по следующему выражению (3):

$$J = \frac{m_{\text{огнетуш}} \varphi_k}{S_{\text{оч}} N_{\text{оч}}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{огнетуш}}$ – масса огнетушащего состава поданного в объем, кг; φ_k – массовая концентрация ингибирующей соли, поданной в объем, %.

Уравнение, устанавливающее взаимосвязь между высотой пламени и площадью зеркала горения, принимает вид:

$$x_{\text{п}} = 84 \left(\frac{U_{\text{п}}}{\rho_a S \sqrt{2g}} \right)^{0,61}, \quad (4)$$

где $x_{\text{п}}$ – высота пламени, м; S – площадь зеркала горения, м²; ρ_a – плотность воздуха вне зоны горения, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Уравнение для нахождения расчетного времени тушения очагов горения в замкнутом объеме:

$$t_p = -K_{\text{проем}} K_{\text{объем}} \frac{\rho h_0}{J_{\text{кр}}} \left[1 + \left(\frac{J}{J_{\text{кр}}} \right)^n \right] \ln \left(1 - \frac{J_{\text{кр}}}{J} \right), \quad (5)$$

где $K_{\text{проем}}$ – коэффициент, позволяющий учесть влияние параметров отношения площадей вытяжного и приточного проемов; $K_{\text{объем}}$ – коэффициент, учитывающий неравномерное распределения огнетушащей среды в объеме помещения; ρ – плотность огнетушащего слоя, кг/м³; h – толщина огнетушащего слоя над зеркалом горения, м; h_0 – толщина огнетушащего слоя в месте в конкретной точке, м; $J_{\text{кр}}$ – критическая интенсивность подачи ингибирующей соли (под критической интенсивностью подачи огнетушащего вещества понимают такую интенсивность при которой еще происходит тушение, кг/(с·м²)); n – темп нарастания огнетушащего слоя.

Таким образом, получим границы применения выражения (5) по площади зеркала горения: 20,3 от 42,2 м². 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. Верхний предел расхода определяется аналогичным образом с использованием верхней границы площади зеркала горения.

Предыдущие исследования 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 выражение 5 с учетом среднего времени прибытия пожарно-спасательных подразделений к месту тушения пожара на ГКС будет определено на отрезке расхода масла от 2,7 до 5,6 л/с.

Экспериментальное исследование было проведено в соответствии с разработанной методикой. Для проведения экспериментального исследования был использован условно герметичный объем. В ходе проведения экспериментов определению подлежали следующие показатели, характеризующие способность огнетушащего состава подавлять пламя при горении модельных очагов в условно герметичном объеме:

- удельный расход водного раствора с ингибирующей солью $q_{эи}$, кг/м²;
- интенсивность подачи ингибирующей соли J , кг/(м²·с);
- время тушения очагов водным раствором с ингибирующей соли $t_{эи}$, с;
- массовая концентрация ингибирующих солей в растворе воды для объемного подавления горения очагов (огнетушащая способность), %;
- надежность подавления горения без повторного возгорания.

Эксперименты проводили в помещениях с ограждающими конструкциями из негорючих материалов. Объем помещения 75 м³ с суммарным параметром негерметичности для группы помещений 0,012 м⁻¹. 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, размещались 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 ГЖ – бензином АИ-93 по ГОСТ 2084.

Максимальная процентная концентрация соли в воде в экспериментальном исследовании не превышала 25 %, поэтому предварительный нагрев растворителя (воды) в условиях проведения экспериментального исследования не требовался. Схема расположения очагов и устройство подачи раствора указано на рисунке 5.

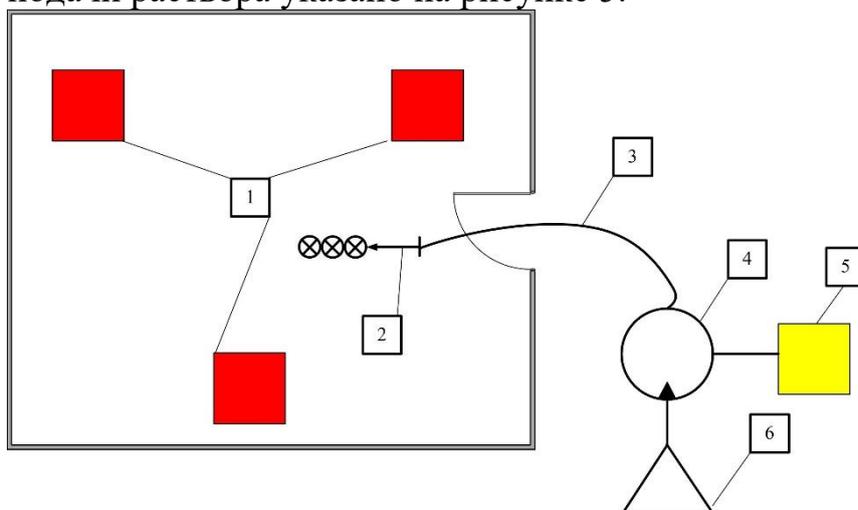


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки:

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

В первой серии экспериментов тушения производилось обычной водопроводной водой без добавления ингибирующих солей. Во второй серии

экспериментов для тушения были использованы растворы ингибитора различной концентрации. Подача огнетушащей среды в помещение в каждой серии экспериментов начиналась через 60 с после начала горения (рисунок 6).



a



б

Рисунок 6 – Очаг в момент начала тушения (*a*) и ствол для подачи огнетушащей среды (*б*)

Для создания высокодисперсной среды была использована установка высокого давления без подогрева воды HD 13/18 S Plus, с возможностью 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 (см. рисунок 6).

Согласно проведенным расчетам, уравнение (4) имеет погрешность 15 %, таким образом, рассчитываемые данные не должны отличаться от найденных экспериментальных более чем на 15 % (рисунки 7, 8).

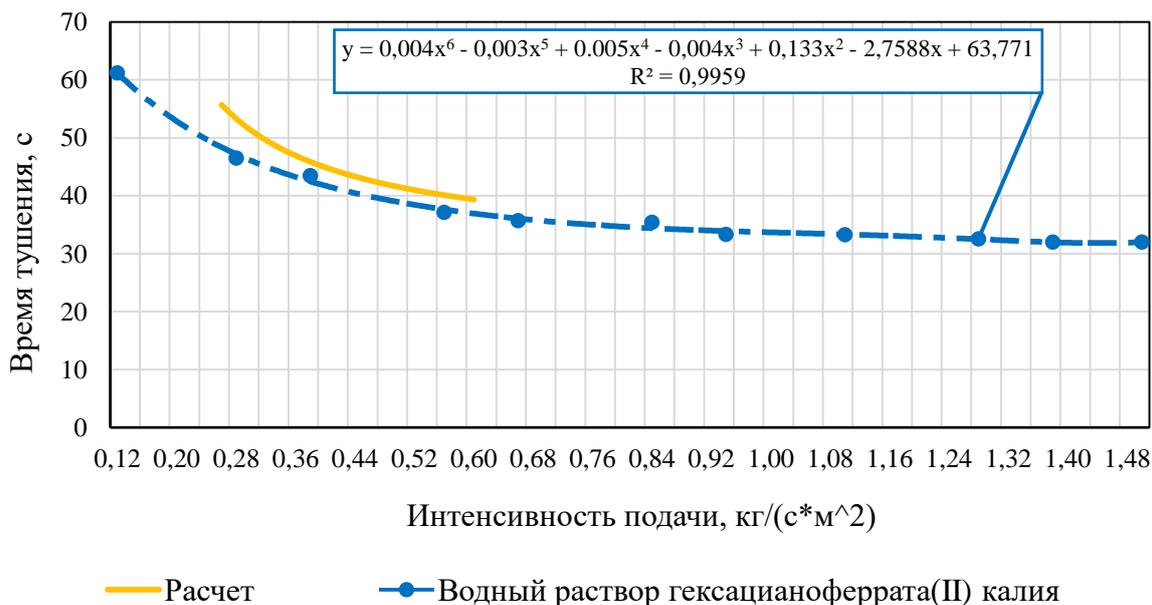


Рисунок 7 – График времени подавления газофазного горения модельных очагов в зависимости от интенсивности подачи ингибирующей соли

Эффективные интенсивности подачи ингибирующей соли в замкнутый объем для второй серии экспериментов были определены методом дифференциального анализа найденных уравнений функций (см. рисунок 7).

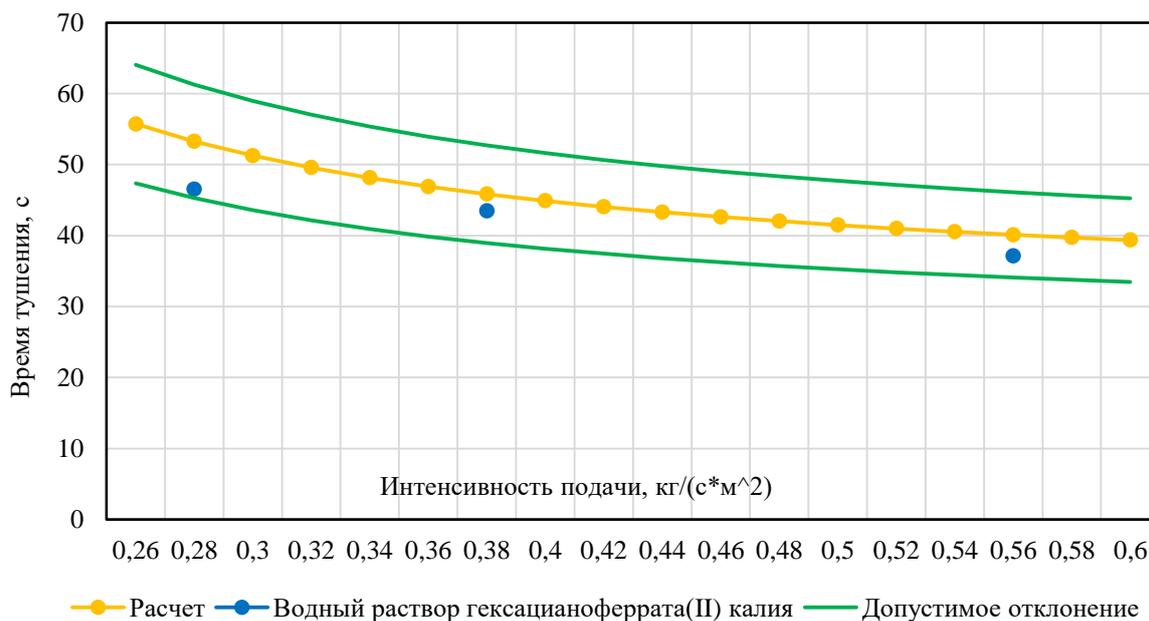


Рисунок 8 – График допустимого отклонения экспериментальных данных от расчетных

Проанализируем результаты экспериментов и их соответствие теоретическим основам. В первой серии экспериментов в условно герметичный объем была подана вода без растворенных солей ингибитора, среднее время подавления горения составило 61,31 с. Во второй серии экспериментального исследования были получены следующие результаты:

- 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/м³;

- 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 выше, это 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 может быть объяснено, найденная МГК реализуется при 14 % 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.

Основными критериями выбора дозирующего насоса являются:

1. Создаваемое давление на выходе из напорного патрубка должно быть не менее 2 МПа;
2. Номинальная величина массового расхода не менее 32 г/с, для создания МГК в соответствии найденным значениями;
3. Используемые материалы в конструкции дозатора, должны быть устойчивы к воздействию агрессивных сред (пример: раствор гексацианоферрат калия(II)).

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 $8 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Общий вид используемого дозатора и металлической рукавной линии, используемой для подключения дозатора к ней, представлены на рисунке 9.



а



б

Рисунок 9 – Образец выбранного дозатора (а) и смесителя (б)

Выбранный дозатор может применяться для создания ТАВ с ингибирующими свойствами в целях 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 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, что может создавать условия поражения личного состава подразделений пожарной охраны электрическим током при тушении пожаров. Проведенные исследования показали, что тушение установок под напряжение струями ТАВ

электробезопасно, однако дозирование ингибирующей соли в недогретую воду может привести к снижению комплексного сопротивления струй ТАВ.

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.

В третьей главе работы «Экспериментальное исследование способа объемного пожаротушения температурно-активированной водой с ингибирующими свойствами» проведены экспериментальные исследования эффективности тушения ТАВ с ингибирующими свойствами пожаров класса А и В, приведены результаты лабораторно-химического анализа раствора ТАВ, установлены эффективные параметры дозирования ингибиторов в недогретую воду, проведены исследования электробезопасности струй ТАВ с ингибирующими свойствами.

Экспериментальные исследования по определению эффективности применения ингибирующих солей в струе ТАВ были проведены для тушения модельных очагов класса А и класса В. При проведении экспериментальных исследований регистрировались следующие параметры:

- удельный расход недогретой воды q_T , г/(м²·с);
- интенсивность подачи недогретой воды I_T , г/(м²·с);
- процентная концентрация гексацианоферрата(II) калий в недогретой воде для подавления горения модельных очагов (огнетушащая способность), %;
- надежность подавления горения без повторного возгорания;
- время подавления горения модельных очагов $t_{шт}$, с.

Экспериментальное исследование проводилось в Учебном центре ФПС МЧС России (г. Вологодск). Для создания ТАВ был использован АПМ 3-2/100-1, 38/100-100(43118) мод. ПиРоЗ-МПЗ (далее – АПМ), укомплектованный переносным дозатором и устройством электромагнитной обработки для получения раствора недогретой воды и ингибирующего состава. Подача раствора ингибитора в этом автомобиле осуществлялась через гибкие шланги и вставки в напорный патрубок подачи воды из АПМ или перед стволами-распылителями ТАВ.

Экспериментальное исследование проводилось на открытой асфальтированной площадке. Исследования эффективных параметров дозирования ингибирующих солей и электромагнитной обработки ингибирующих солей в струе ТАВ были проведены:

- для твердых горючих материалов на модельных очагах класса 10 А;
- для легковоспламеняющихся жидкостей на модельных очагах класса 144В состоящий из 3 прямоугольных стальных противня диаметром 1000×1500 мм, высотой борта 200 мм и площадью 4,5 м², в каждый противень заливается 16 литров воды и 32 л бензина по ГОСТ Р 51105.

Средняя температура воздуха при проведении экспериментального исследования составляла 38°С. Схема расстановки оборудования при проведении экспериментального исследования указана на рисунке 10.

Для создания струй ТАВ с ингибирующими свойствами было использовано устройство дозирования, позволяющее создавать струи ТАВ с массовой концентрацией ингибирующих солей до 18 %. Раствор используемого ингибирующего вещества заданной концентрации готовился заранее в полипропиленовой емкости емкостью 200 л, предназначенной для работы с агрессивными средами. Для предотвращения попадания в рабочую камеру дозирующего устройства нерастворенных кристаллов солей было использовано фильтрующее устройство.

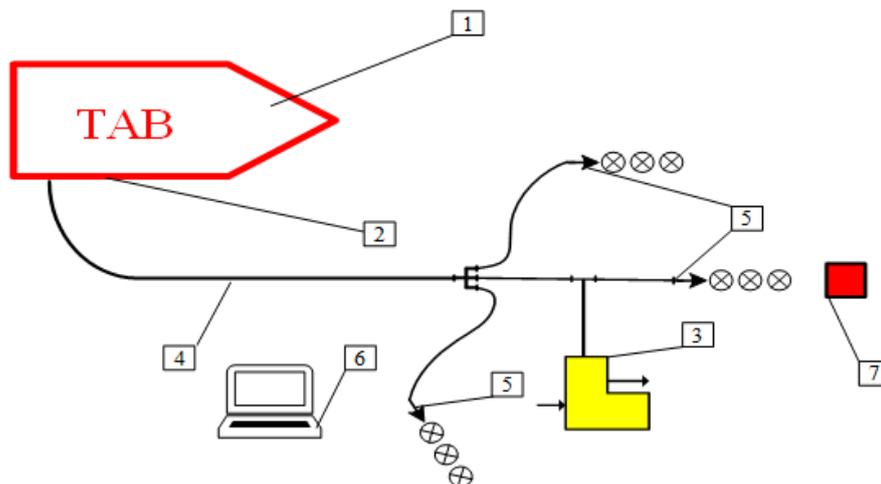


Рисунок 10 – Схема расположения очагов, ствола подачи ТАВ и дозирующего устройства:
 1 – установка получения ТАВ; 2 – устройства регистрации давления и температуры неогретой воды; 3 – устройство дозирования с емкостью для раствора ингибитора; 4 – рукав с неогретой водой; 5 – стволы подачи ТАВ и ТАВ с ингибитором; 6 – персональный компьютер для регистрации результатов; 7 – модельный очаг (класса А или В)

Оценкой времени тушения модельных очагов, было установлено, что дозирование гексацианоферрата(II) калия, с установленным МГК – 3,5 %, в неогретой воде не влияет огнетушащую способность струй ТАВ при поверхностном тушении очагов класса А и несущественно влияет на огнетушащую способность поверхностного тушения очагов класса В. Однако при повышении МГК до 5 % эффективность тушения повышалась.

Для определения причины расхождения МГК было отобрано пять образцов 5%-го раствора гексацианоферрата(II) калия, после взрывного вскипания при температуре от 120 до 190 °С.

Было установлено, что при повышении температурного режима на установке получения ТАВ происходит частичное разрушение ингибирующей соли. Использованием гравиметрического метода было установлена следующая зависимость концентрации гексацианоферрата(II) калия в растворе ТАВ после взрывного вскипания от температурного режима подачи ТАВ: $y = 80,884x^{-0,557}$ для температурной области 120 до 190 °С. Установленная зависимость позволяет рассчитать требуемую МГК гексацианоферрата(II) калия в ТАВ для эффективного подавления горения при тушении пожаров.

Для обеспечения электробезопасности участников тушения электрооборудования ГКС необходимо оценить, на сколько изменяется

электропроводимость струй ТАВ с дозирование ингибиторов и без них. Установлено, что при тушении ЭУ переменного тока частотой 50 Гц, функционирующей под напряжением, струя ТАВ, с протекающей по ней электрическим током, является перколяционной системой, в которой проводящие капли воды образуют трехмерную сетку в непроводящей среде пара. Таким образом, удельная эффективная электропроводимость струи ТАВ зависит от удельных электропроводимостей паровой и капельной фаз, а также объемной концентрации капельной фазы, нормированной к единице, выражение (6):

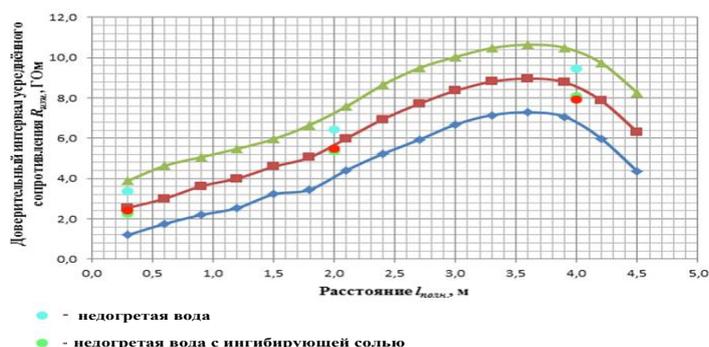
$$\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = \sigma_{\text{п}} \frac{\sigma_{\text{в}}(1+2C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))+2\sigma_{\text{п}}(1-C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))}{(1-C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\sigma_{\text{в}}+(2+C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\sigma_{\text{п}}}, \quad (6)$$

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

Токи утечки по струям ТАВ, подаваемым с помощью пожарных стволов АПМ, и предельно допустимые расстояния до ЭУ, были определены экспериментально-аналитическим методом. В экспериментально-аналитическом методе ключевое значение имеет объемная концентрация $C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})$ полидисперсной (капельной) фазы, которая была найдена косвенным путем по массиву значений сопротивлений $R(l_{\text{полн}})$, полученному с помощью опытно-экспериментального стенда. Полученные экспериментальные данные для струй ТАВ с дозированием гексацианоферрата калия(II) сравнивались с данными из предыдущих исследований для струй ТАВ без ингибирующих примесей. Результаты сравнения усредненных сопротивлений $R_{\text{изм}}$, измеренных на опытно-экспериментальном стенде, представлены на рисунке 11.



а



б

Рисунок 11 – Проведение измерений на опытно-экспериментальном стенде массива сопротивлений постоянному току при подаче струи температурно-активированной воды из дальнобойного пожарного ствола (а) и сравнение усредненных значений сопротивлений $R_{\text{изм}}$, полученных при испытаниях (б)

Теоретически и экспериментально доказано, что дозирование ингибирующих солей в недогретую воду, а также применение электромагнитной обработки, не оказывает существенного влияния на

электропроводимость струй ТАВ, при их получении из пожарных стволов АПМ, по сравнению со струями без ингибирующих примесей. На этом основании можно утверждать, что поверхностное тушение электрооборудования и ЭУ струями ТАВ с дозированием солевых ингибиторов, а также создание огнетушащей концентрации на энергетических узлах ГЭС с помощью стволов АПМ через отверстия в стенах и перекрытиях, электробезопасно для участников тушения.

Для определения эффективности объемного пожаротушения ГЭС струями ТАВ было проведено моделирование с помощью программно-аппаратного комплекса PyroSim на основе модели и натурный эксперимент. Результаты моделирования и натурального эксперимента представлены на рисунках 12-14. Оценка эффективности подавления пламенного горения оценивалась по критерию температура.

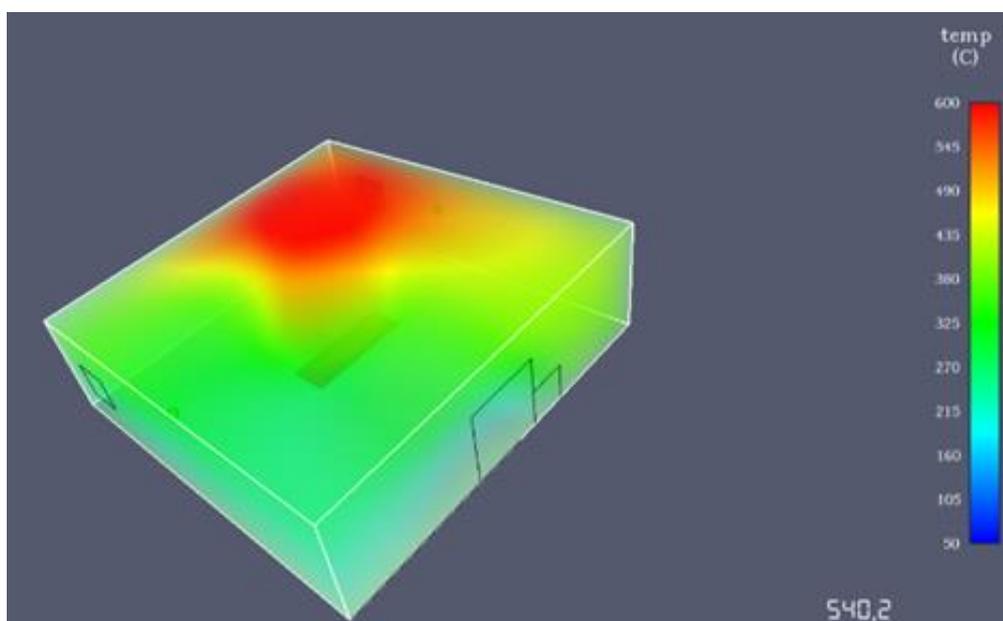
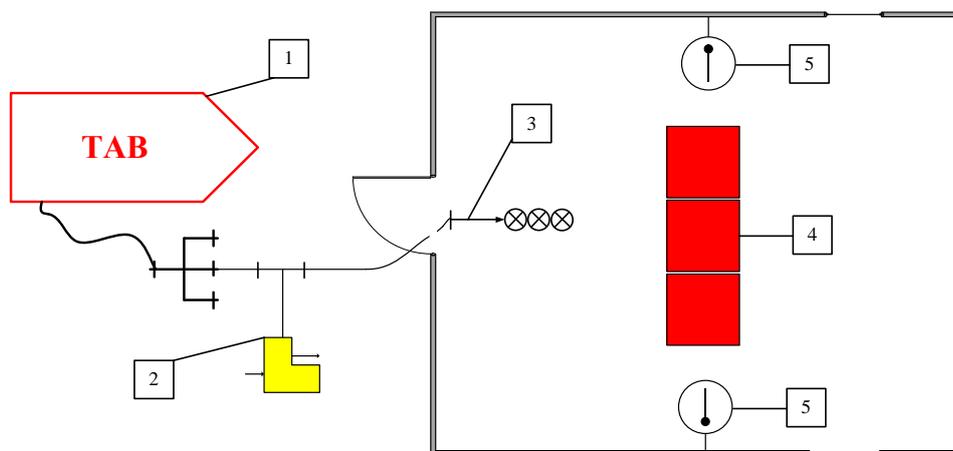


Рисунок 12 – Результаты моделирования



1 – АПМ; 2 - устройство дозирования; 3 – ствол ТАВ; 4 – очаг; 5 – термопары.

Рисунок 13 –Проведение натурального эксперимента:
1 – АПМ; 2 – устройство дозирования; 3 – ствол ТАВ; 4 – очаг; 5 – термопары

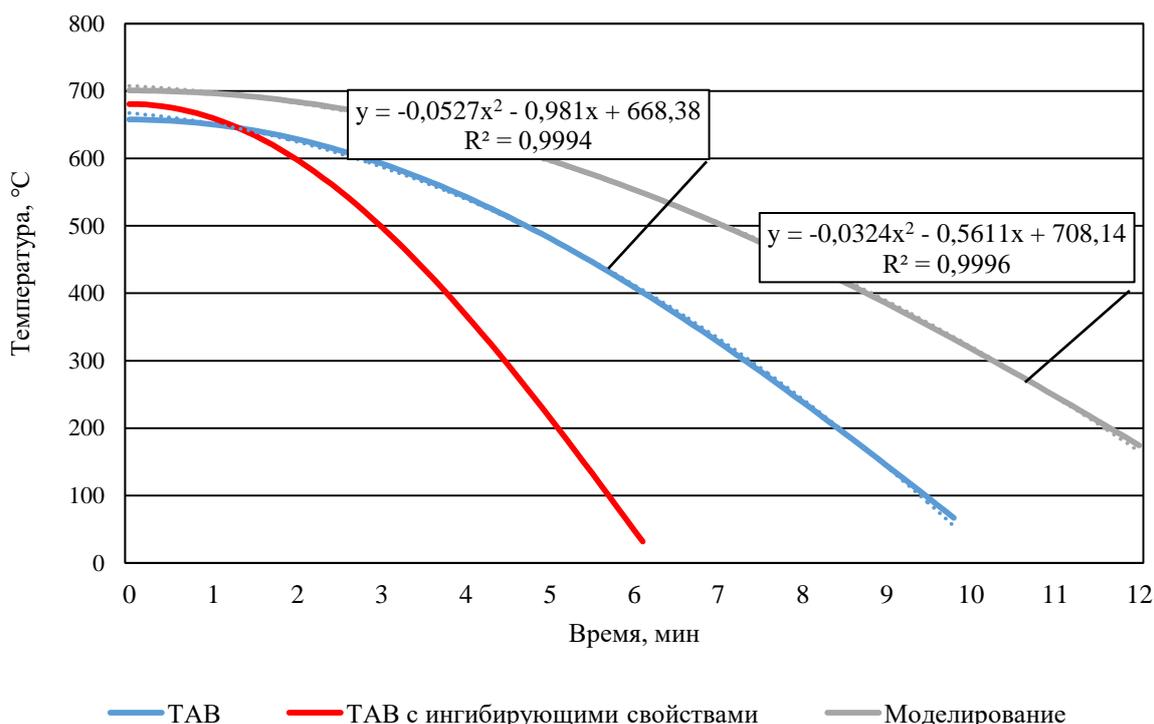


Рисунок 14 – График изменения среднеобъемной температуры в замкнутом объеме в зависимости от времени тушения

Температурные кривые расчетной и экспериментально установленной моделей имеют параболический характер, при этом отношение величины коэффициента при x^2 для экспериментальной модели тушек соответствующему значению расчетной зависимости равно 1,75 (см. рисунок 13). Это подтверждает то, что тушение струями ТАВ имеет накопительный эффект. То есть температура в замкнутом объеме стала меньше температуры воспламенения горючей нагрузки раньше, чем произошло подавление пламенного горения, благодаря объемному распределению ТАВ. Достижение среднеобъемной температуры 60 °C при дозировании ингибирующих веществ произошло в 1,64 раза быстрее, что практически соответствует выше установленному временному коэффициенту (1,65), однако времени на это потребовалось меньше.

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

Объектовые пожарно-спасательные части газокomppressorных станций комплектуются передвижной пожарной техникой, при этом 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. Для объемного тушения пожаров в замкнутых объемах газокomppressorных станций с использованием передвижной пожарной техники на данный момент применяются пены средней и высокой кратности. Таким образом, необходимо сравнить огнетушащую

эффективность пены средней кратности и ТАВ с ингибирующими свойствами и провести расчет экономического эффекта от замены пожарной автоцистерны на АПМ. Расчет экономической эффективности применения ТАВ с ингибирующими свойствами при тушении замкнутых объемов газокomppressorных станций был произведен двумя способами – расчетно-аналитическим с использованием статистики и расчетом стоимостных показателей огнетушащих веществ. Было установлено, что экономическая эффективность применения ТАВ с ингибирующими свойствами будет находиться в интервале от 1,6 до 3, то есть 3 – это максимальное теоретически возможное значение, а 1,6 – минимальное практически реализуемая эффективность тушения.

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 – $4,68 \text{ г/м}^3$.

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.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих ведущих периодических изданиях, включенных в список ВАК РФ

1. Халиков, Р.В. Пожаровзрывобезопасность замкнутых пространств объектов ГКС [Текст] / 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).

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666295 Программное средство для расчета вероятности разветвленно-цепного процесса горения углеводородов [Текст] / Р.В. Халиков – № 2020666295; заявл. 25.11.2020; опублик.: 08.12.2020.

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

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

5. 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.

6. 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.

7. Халиков, Р. В. Вероятностная модель разветвлённо-цепного горения предельных углеводородов в замкнутом объёме газокomppressorных станций [Электронный ресурс] / Р.В. Халиков // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – № 1(91). – С. 42-52. – DOI 10.25257/TTS.2021.1.91.42-52. – EDN QIINLB.

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. Моделирование пожаротушения машинного зала газокomppressorной станции температурно-активированной водой [Текст] / Р.В. Халиков, В.Г. Халиков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 1. – С. 70-77. – DOI 10.25257/FE.2023.1.70-77. – EDN RKPOQF.

Остальные публикации по теме диссертации

1. 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).

2. Халиков, Р.В. Способы подавления процессов ионного обмена при горении жидких углеводородов [Текст] / Р.В. Халиков // Двадцать восьмая Международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2019»: сб. материалов. – Москва, 2019. – С. 223–228.

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

4. Халиков, Р.В. Аналитические аспекты ингибирования пламени водяными средами в метастабильном фазовом состоянии [Текст] / Р.В. Халиков, В.В. Роечко // XXVII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»: сб. материалов. – Москва: МГУ им М.В. Ломоносова, 2020. – С. 501.

5. Халиков, Р.В. Роль реакционных цепей горения для процесса объемного пожаротушения ГКС [Текст] / Р.В. Халиков // IV Международная научно-практическая конференции молодых ученых по проблемам

техносферной безопасности: сб. материалов. – Москва: РХТУ им Д.И. Менделеева, 2020. – С. 39–42.

6. Халиков, Р.В. Термодинамический анализ газовой среды при пожаре в замкнутом объеме ГКС [Текст] / Р.В. Халиков, А.Ю. Самсонов // Всероссийский круглый стол «Актуальные вопросы пожаротушения»: сб. материалов. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС, 2020. – С. 150–154.

7. Халиков, Р.В. Применение ингибиторов горения для объемного пожаротушения ГКС [Текст] / Р.В. Халиков // I Международная научная конференция «Роль противопожарных служб в решении нетрадиционных угроз безопасности»: сб. материалов. – Вьетнам: Институт пожарной безопасности МОБ СРВ, 2020. – С. 1535–1540.

8. Халиков, Р.В. Разработка технических средств, реализующих объемное тушение водными средами с ингибирующими свойствами [Текст] / Р.В. Халиков, А.И. Соковнин // Международная научно-практическая конференция «Школа молодых ученых и специалистов МЧС России»: сб. материалов. – Санкт-Петербург: СПбГУ ГПС МЧС России, 2020. – С. 53–56.

9. Халиков, Р.В. Электромагнитная подготовка водяных растворов для ингибирования горения / Р.В. Халиков // XXXII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности»: сб. материалов. Балашиха, 2020. – С. 309–311.

10. Халиков, Р.В. Оптимизация состава растворов водной среды в метастабильном фазовом состоянии для тушения пожаров [Текст] / Р.В. Халиков // XVII Международная научно-практическая конференция «Пожарная и аварийная безопасность»: сб. материалов. Иваново: ИПСА МЧС России, 2022. – С. 529–532.

Подписано в печать 17.11.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 504.

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