

На правах рукописи



Дмитриев Олег Владимирович

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО ОБОСНОВАННЫХ ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГNETУШАЩИХ
ПОРОШКОВЫХ СОСТАВОВ**

2.6.18. Охрана труда, пожарная и промышленная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иваново – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Попов Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

Вогман Леонид Петрович
доктор технических наук, старший
научный сотрудник,
ФГБУ ВНИИПО,
главный научный сотрудник

Корольченко Дмитрий Александрович
доктор технических наук, доцент
НИУ МГСУ,
заведующий кафедрой «Комплексная
безопасность в строительстве»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
университет ГПС МЧС России»

Защита диссертации состоится 22 декабря 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета на базе Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России по адресу: 153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33, ауд. 1101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России: <https://www.edufire37.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
04.2.005.01,
кандидат технических наук, доцент

Колбашов Михаил Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С каждым годом область применения огнетушащих порошков расширяется. В настоящее время активное освоение получила Арктическая зона, в которой строятся промышленные и гражданские объекты. Так, государственной программой Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», утвержденной Правительством Российской Федерации в 2021 году, предусмотрено создание новых и модернизация действующих промышленных производств, разработка новых нефтегазовых провинций, месторождений твердых полезных ископаемых и трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья, глубокая переработка нефти, производство сжиженного природного газа и газохимической продукции.

Тушение пожаров на объектах Арктической зоны возможно, как правило, только огнетушащими порошками.

Огнетушащие порошки не в полной мере обладают универсальностью для тушения пожара и ликвидации аварии. Недостатками огнетушащих порошков являются:

- низкая огнетушащая способность тлеющих материалов;
- неспособность препятствовать повторному воспламенению потушенного горючего от нагретых элементов оборудования или строительных конструкций;
- низкая сорбционная способность к горючим жидкостям;
- склонность к слеживанию.

Решение указанной проблемы требует совершенствования огнетушащих веществ, разработки универсальных средств, обеспечивающих тушение пожара и ограничение развития аварий аппаратов с горючими жидкостями, а также разработки огнетушащих порошковых составов с улучшенными эксплуатационными свойствами и более низкой стоимостью.

Таким образом, актуальным является создание огнетушащих порошков:

- способных сорбировать пары, газы и жидкости при авариях на объектах нефтегазовой промышленности, при транспортных авариях;
- способных при тушении горючих веществ и материалов препятствовать повторному воспламенению потушенного горючего от нагретых элементов строительных конструкций или оборудования;
- способных тушить тлеющие материалы;
- с гидрофобизирующими добавками с высокими качественными характеристиками.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами создания новых эффективных средств порошкового пожаротушения, а также экспериментальными исследованиями по огнетушащей способности порошковых составов занимались отечественные и зарубежные ученые: Баратов А.Н., Вогман Л.П., Исавнин Н.В., Краснянский М.Е., Добриков В.В., Корольченко Д.А., Ewing C.T., Rosser W., Lee T.G., Бухтояров Д.В., Сабинин О.Ю., Кунин А.В., Лапшин Д.Н., Бобрышева С.Н. и др.

Цель диссертационного исследования заключается в создании научно-обоснованных подходов к повышению эффективности огнетушащих порошковых составов.

Задачи диссертационного исследования:

- на основе анализа научных работ обосновать перспективные направления повышения огнетушащей эффективности порошковых составов;
- разработать новые составы огнетушащих порошков двойного назначения и с повышенными эксплуатационными характеристиками;
- определить оптимальные концентрации веществ, применяемых в качестве добавок для совершенствования свойств огнетушащих порошков;
- разработать методику сравнительной оценки огнетушащей способности различных порошковых составов;
- провести сравнительную оценку огнетушащей способности промышленно выпускаемого порошка с разработанным нами порошковым составом в смеси с добавками микрокапсул с хладоном;
- провести сравнительную оценку огнетушащей способности разработанных нами порошковых составов двойного назначения (тушение горения и локализации аварии) с огнетушащей способностью промышленно выпускаемых порошков;

- провести оценку огнетушащей способности разработанных порошковых составов с гидрофобизирующим веществом на основе торфяного сырья.

Объект исследования – огнетушащие порошковые составы.

Предмет исследования – совершенствование эксплуатационных характеристик огнетушащих порошковых составов.

Научная новизна работы:

- разработана методика исследований порошковых составов, позволяющая оценить их огнетушащую способность при тушении горения жидкости и твердых горючих материалов;

- теоретически обоснован механизм повышения огнетушащей эффективности при применении добавок;

- научно обоснованы и экспериментально установлены оптимальные составы огнетушащих порошков с гидрофобизирующими, микрокапсулированными добавками и добавками сорбентов, повышающими эффективность порошковых составов;

- экспериментально установлена минимальная огнетушащая интенсивность подачи порошковых составов при тушении горения жидкости;

- обнаружен и теоретически обоснован эффект образования «огненной сферы» в момент подачи огнетушащего порошка в зону горения. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать диаметр «огненной сферы» и установить безопасное расстояние от очага пожара для пожарных подразделений и оборудования.

Новизна разработанных технических решений защищена патентом РФ на изобретение (№ 2605056, 23.11.2016).

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в следующем:

- подтвержден преобладающий эффект тушения – ингибирование реакции горения, происходящее в гомогенной фазе, что позволит создавать огнетушащие порошковые составы с повышенными эксплуатационными характеристиками;

- разработана модель эффекта образования «огненной сферы», позволяющая установить минимальные расстояния для обеспечения безопасности человека и оборудования от воздействия теплового излучения при тушении горения огнетушителями в момент подачи огнетушащего вещества в зону горения.

Практическая значимость работы:

- разработана методика проведения исследований огнетушащей способности, позволяющая осуществлять сравнительную оценку огнетушащей способности порошковых составов, определять минимальную огнетушащую интенсивность прекращения горения, проводить исследования по тушению порошками горючих жидкостей и твердых горючих материалов;

- предложены составы огнетушащих порошков, отличающихся от промышленно выпускаемых:

а) повышенной огнетушащей способностью (порошки с добавками микрокапсулированных хладонов). Добавки микрокапсул до 15 % увеличивают огнетушащую способность на 39 %;

б) обладающие сорбционными свойствами по отношению к легковоспламеняющимся и горючим жидкостям (порошковые составы двойного назначения);

в) с гидрофобизирующими веществами на основе торфяного сырья. Гидрофобизирующие вещества на основе торфяного сырья в 10...15 раз дешевле применяемых в настоящее время гидрофобизирующих веществ. Выпущена опытная партия порошка на оборудовании по производству порошка «Волгалит-АВС» без изменения технологии производства.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с п. 11 паспорта специальности 2.6.18. Охрана труда, пожарная и промышленная безопасность (технические науки).

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовался комплексный способ исследований, включающий экспериментальные и теоретические методы исследований: анализ современного состояния теории, практики и патентных материалов; проведение лабораторных исследований и промышленных испытаний огнетушащей способности порошковых составов. Результаты численных расчетов подтверждены результатами экспериментальных исследований с использованием современных поверенных приборов и оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование преобладающего эффекта тушения – ингибирование реакции горения, происходящее в гомогенной фазе.

2. Методика для сравнительной оценки огнетушащей способности огнетушащих порошковых составов.

3. Порошковые составы, обладающие повышенными эксплуатационными характеристиками.

4. Результаты лабораторных и промышленных испытаний огнетушащих порошковых составов с добавками.

5. Результаты теоретического обоснования и исследования образования эффекта «огненной сферы» в момент подачи огнетушащего порошка в зону горения.

Достоверность результатов исследования складывается из: методически обоснованного комплекса теоретических и эмпирических исследований; необходимого количества и диапазона испытаний с использованием сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования; статистической обработки эмпирических результатов с погрешностью не более 5 %; сопоставлением результатов, полученных разными методами, а также их сравнением с результатами, полученными другими авторами; удовлетворительной сходимости теоретических и эмпирических исследований.

Личный вклад автора состоит в непосредственном получении и обработке экспериментальных данных, анализе литературы, разработке составов огнетушащих порошков с повышенными эксплуатационными характеристиками, разработке методики для оценки огнетушащей способности огнетушащих порошковых составов. Обсуждение результатов проведено автором при участии соавторов публикаций и научного руководителя.

Апробация результатов исследования.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на:

- V, VI, VII, VIII, IX Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» (г. Иваново, ФГБОУ ВПО Ивановский институт ГПС МЧС России, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014);

- III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (г. Воронеж, ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России, 2012);

- Школе молодых ученых и специалистов МЧС России – 2012: «Интеллектуальный потенциал молодых ученых и специалистов МЧС России: комплексный подход к формированию научных кадров» (г. Подольск, ВНИИ ГОЧС МЧС России, 2012);

- Международном научном семинаре «Проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов хозяйствования» (г. Кокшетау, Республики Казахстан ГУ «Кокшетауский технический институт МЧС РК», 2014);

- V Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (г. Воронеж, ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России, 2014);

- Региональном инновационном конвенте молодых ученых «Интеграция», в рамках областного фестиваля «Молодая наука – Ивановской области (г. Иваново, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет», 2014);

- III Ивановском инновационном конвенте «Образование. Наука. Инновации» по направлению «Современные материалы и технологии их создания (химия)» (г. Иваново, ФГБОУ ВПО Ивановский институт ГПС МЧС России, 2014);

- 10-ом Международном салоне средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность - 2017» (г. Ногинск, Ногинский спасательный центр МЧС России, 2017);

- 24-ом Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед» (г. Москва, КВЦ «Сокольники», 2019);

- IX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов», посвященной 90-летию образования гражданской обороны (г. Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 1 патент на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертационная работа изложена на 214 страницах машинописного текста и включает введение, четыре главы, выводы и приложения. Работа содержит 70 рисунков и 17 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, которые выносятся на защиту.

В первой главе «Первичные средства пожаротушения и ликвидации аварий разлива нефтепродуктов» приведен анализ специальной литературы, диссертационных работ по вопросам порошкового пожаротушения.

Недостатками огнетушащих порошков являются:

- низкая огнетушащая способность тлеющих материалов;
- неспособность препятствовать повторному воспламенению уже потушенного горючего от нагретых элементов оборудования или строительных конструкций;
- склонность к слеживанию.

Тушение пожара можно обеспечить:

- охлаждением очага горения ниже определенных температур;
- изоляцией очага горения от воздуха или снижением содержания кислорода в результате разбавления воздуха инертными газами;
- механическим срывом пламени сильными струями газа или воды;
- созданием условий огнепреграждения, т.е. таких, при которых пламя, проходя через узкие каналы, теряет значительную часть тепловой энергии на стенках каналов;
- интенсивным торможением скорости химических реакций в пламени (ингибированием горения).

Преобладающим эффектом, от которого в большей степени зависит огнетушащий эффект, многие ученые считают ингибирование реакции окисления при горении. Огнетушащая эффективность порошковых составов во многом зависит от средств и способа их подачи в очаг пожара.

Устранение указанных недостатков и повышение огнетушащей эффективности применяемых порошковых составов с использованием огнетушителей может быть достигнуто следующими путями:

- разработкой новых видов огнетушащих порошков;
- введением добавок в огнетушащие порошки, повышающие огнетушащую способность;
- введением добавок в огнетушащие порошки для придания им новых свойств, способствующих эффективности тушения горения и локализации аварии;
- разработкой составов огнетушащих порошков, улучшающих эксплуатационные свойства и снижающие стоимость.

Проанализированы существующие методы лабораторных исследований и показано, что ряд лабораторных установок имеют значительные погрешности в определении огнетушащей эффективности порошкового состава для тушения модельного очага пожара. Ряд установок не позволяет контролировать постоянство параметров проведения экспериментов.

Во второй главе «Методика проведения исследования по определению огнетушащей способности порошковых составов» предложена методика сравнительной оценки огнетушащей способности порошков с добавками, позволяющая оценить сравнительную огнетушащую эффективность порошковых составов с применением добавок в сравнении с промышленным порошком, а также определять минимальную огнетушащую интенсивность подачи порошка.

Разработана лабораторная установка (рисунок 1), отличающаяся от существующих установок возможностью с более высокой точностью проводить сравнительную оценку огнетушащей способности различных порошковых составов в сравнении с порошками, выпускаемыми промышленностью. Лабораторная установка позволяет оценить критическое значение интенсивности подачи порошков в зону горения, минимальное количество порошка необходимого для тушения.

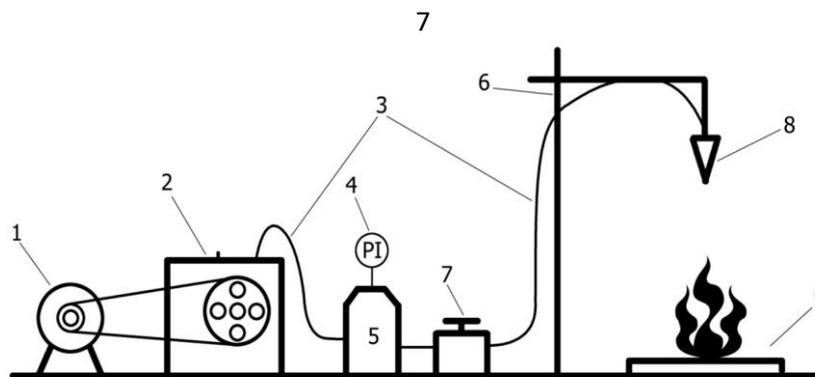


Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторной установки для исследования огнетушащей способности порошковых составов

1 – электродвигатель, 2 – компрессор, 3 – шланги высокого давления, 4 – манометр, 5 – промежуточная ёмкость, 6 – штатив, 7 – электромагнитный клапан, 8 – устройство для подачи порошка, 9 – модельный очаг

В третьей главе «Исследования огнетушащей способности огнетушащих порошков» приведены результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний.

Сравнительная оценка огнетушащего эффекта разработанных порошковых составов в сравнении с промышленно выпускаемыми проведена в лабораторных условиях.

Исследовались подготовленные порошковые составы:

- огнетушащий порошок с микрокапсулами хладона, который оказывает ингибирующее воздействие (гомогенное ингибирование) на зону реакции горения;
- огнетушащие порошки двойного назначения (с добавками окисленного графита марки EG-350, шунгита, оксида кремния), обладающие сорбционными свойствами к ГЖ и ЛВЖ;
- огнетушащий порошок с микрокапсулами хладона и сорбентом в соотношении 1:1.

Концентрация добавок в огнетушащем порошке составляла 5%, 10%, 15%, 20%. Проводилось тушение модельных очагов пожара древесины (класс А) и легковоспламеняющейся жидкости (класс В).

На рисунках 2, 3 представлены зависимости огнетушащей способности порошка от процентного содержания добавок.

Исследования выявили, что при тушении модельных очагов пожара (класс А и В) порошком с добавками расход порошка, требуемый для тушения, снижался от 2,5% до 39% в зависимости от вида добавки.

При тушении модельного очага пожара класса А - наибольший огнетушащий эффект наблюдался при 15 % концентрации микрокапсулированных добавок. При этом порошковой смеси потребовалось на 39 % меньше, чем при тушении порошком «Волгалит-АВС», рисунок 2(а).

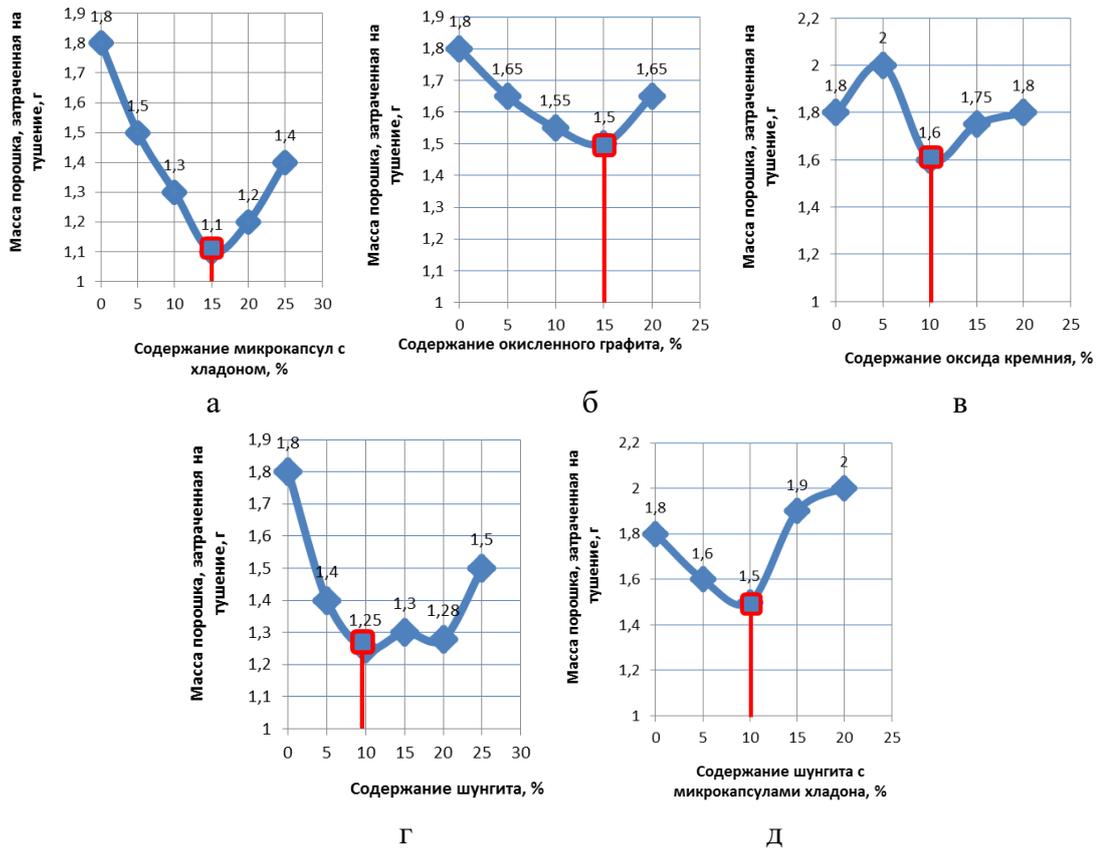


Рисунок 2 – Изменение огнетушащей способности порошка Волгалит-АВС от процентного содержания в смеси добавки (а) микрокапсулированного хладона, (б) окисленного графита, (в) оксида кремния, (г) шунгита, (д) шунгита с микрокапсулами хладона на модельном очаге с ТГМ (древесина)

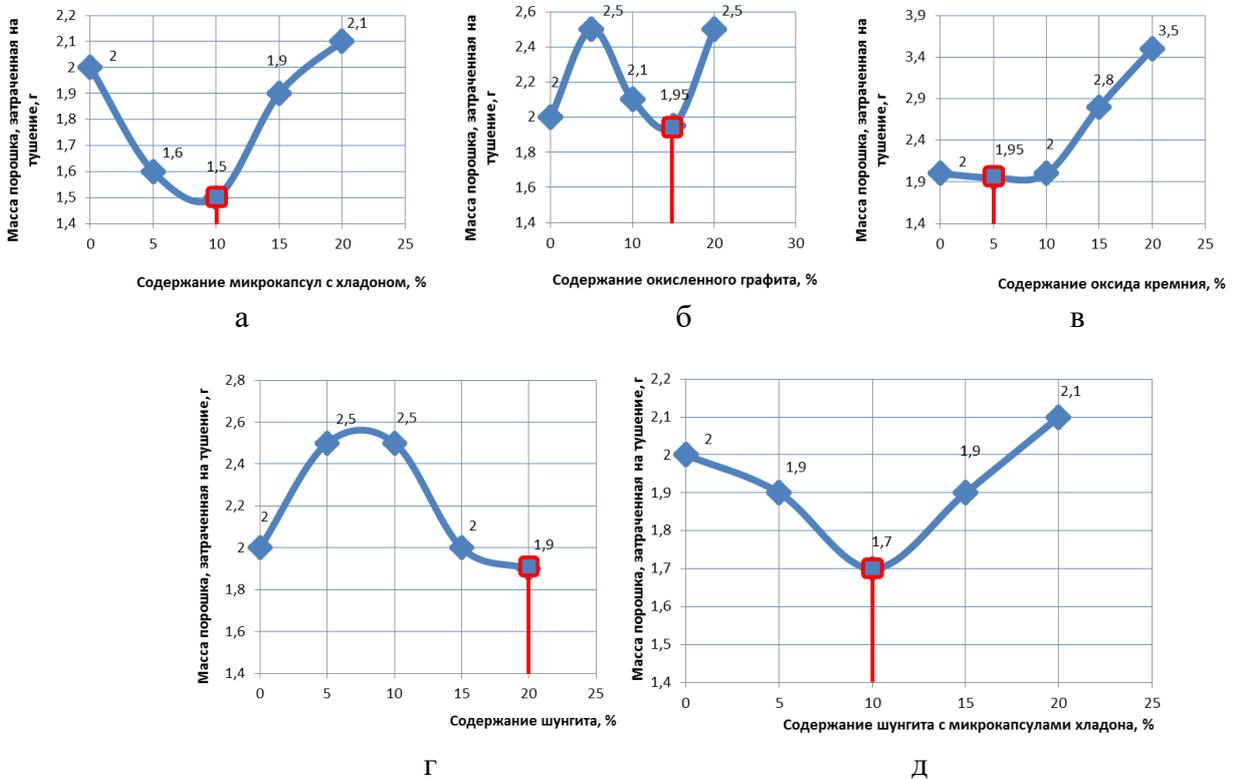


Рисунок 3 – Изменение огнетушащей способности порошка Волгалит-АВС от процентного содержания в смеси добавки (а) микрокапсулированного хладона, (б) окисленного графита, (в) оксида кремния, (г) шунгита, (д) шунгита с микрокапсулами хладона на модельном очаге с ЛВЖ (бензин АИ-92)

Установлено, что при тушении модельного очага пожара класса В – наибольший огнетушащий эффект наблюдался при 10 % концентрации микрокапсулированных добавок. При этом порошковой смеси потребовалось на 25 % меньше, чем при тушении порошком «Волгалит-АВС», рисунок 3 (а). При последующем увеличении процентного содержания микрокапсулированного хладона в огнетушащем порошке наблюдалось ухудшение огнетушащего эффекта (увеличение затраченной массы порошкового состава на тушение модельного очага). Это можно объяснить следующим:

- повышение огнетушащего эффекта происходит из-за применения микрокапсулированного хладона, который высвобождается при температуре 120 °С и оказывает ингибирующее воздействие (гомогенное ингибирование) на зону реакции горения, частицы огнетушащего порошка разлагаются и оказывают ингибирующее воздействие на зону реакции с задержкой, так как температура разложения порошка составляет 200...300°С;

- ухудшение огнетушащего эффекта при последующем увеличении процентного содержания микрокапсулированного хладона в огнетушащем порошке происходит из-за уменьшения массы более дисперсного огнетушащего порошка (снижение массы частиц порошка), которое отрицательно влияет на огнепреграждающий эффект. С разрушением микрокапсул происходит увеличение зазора между частицами порошка, которое приводит к снижению эффекта огнепреграждения.

При проведении исследований по определению сравнительной огнетушащей эффективности порошкового состава с добавками сорбентов рисунок 2 (б, в, г) и рисунок 3 (б, в, г) установлено, что наибольший огнетушащий эффект наблюдался при определенной процентной концентрации добавок сорбентов. При последующем увеличении процентного содержания сорбентов в огнетушащем порошке наблюдалось ухудшение огнетушащего эффекта (увеличение затраченной массы порошкового состава на тушение модельного очага).

На наш взгляд причиной данного явления служит:

- усиление огнетушащего эффекта происходит из-за применения сорбентов, которые обладают адсорбционными свойствами, что приводит к снижению концентрации горючих паров (газов) и оказывает влияние на эффект прекращения горения. Поскольку воздействие температуры на сорбенты не приводит к их частичному испарению, происходит усиление эффекта огнепреграждения, достигаемое при прохождении пламени через узкие каналы, по аналогии с сетчатыми, гравийными и подобными огнепреградителями. На примере окисленного графита при его терморасширении дополнительно происходит выделение газов отрицательно влияющих на процесс горения;

- ухудшение огнетушащего эффекта при последующем увеличении процентного содержания сорбентов в огнетушащем порошке происходит из-за уменьшения массы огнетушащего порошка как основного компонента процесса тушения.

С целью улучшения антислеживающих свойств в состав порошка в качестве гидрофобизатора введена гидрофобизирующая добавка ГМД на основе торфа.

При совместном измельчении компонентов огнетушащего порошка и антислеживающей добавки на основе торфа происходит протекание процесса механохимического нанесения битумных пленок на его поверхность, улучшающего водоотталкивающие свойства. Подтверждением служат данные рентгенофазового анализа (рисунок 4) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (рисунок 5).

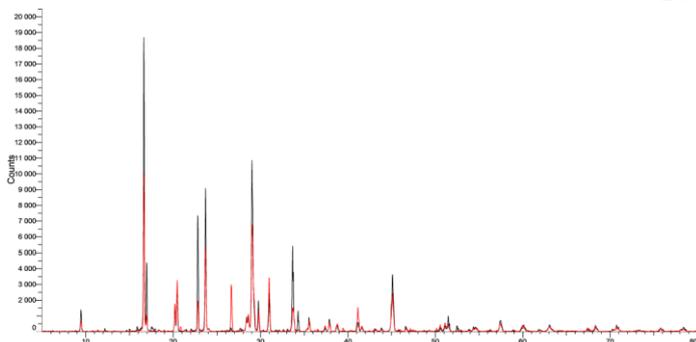


Рисунок 4 – Результаты рентгенофазового анализа огнетушащего порошка «Волгалит-ABC» (черный) и огнетушащего порошка «Волгалит-ABC» с гидрофобно-модифицирующей добавкой марки «ГМД-20NT» (красный)



Рисунок 5 – Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии огнетушащего порошка «Волгалит-ABC» с гидрофобно-модифицирующей добавкой марки «ГМД-20NT»

Как видно из рисунка 4, положения пиков данных порошковых составов совпадают частично. Образование нового вещества не наблюдается. При анализе образцов установлено, что гидрофобно-модифицирующая добавка «ГМД-20NT» представляет собой скопления частиц органических соединений. Гидрофобно-модифицирующая добавка находится на поверхности частиц огнетушащего порошка. Причем на рисунке 5 прослеживается фазовый контакт модифицирующей добавки с минеральной частицей огнетушащего порошка. На этом же рисунке голубым цветом показано распределение добавки ГМД на поверхности частиц порошкового состава. В процессе помолы происходит создание дискретных пленочных образований на модифицируемых частицах огнетушащего порошка, которые позволяют достаточно эффективно изолировать их от воздействия капельножидкой и парообразной влаги.

На полигоне АО «В.В.П.» проведены промышленные испытания по определению огнетушащей способности произведенной опытной партии огнетушащего порошка «Волгалит-ABC» с гидрофобизирующей добавкой на основе торфяного сырья с концентрацией 1,5 % (по массе). Результаты испытаний приведены на рис. 6, 7.

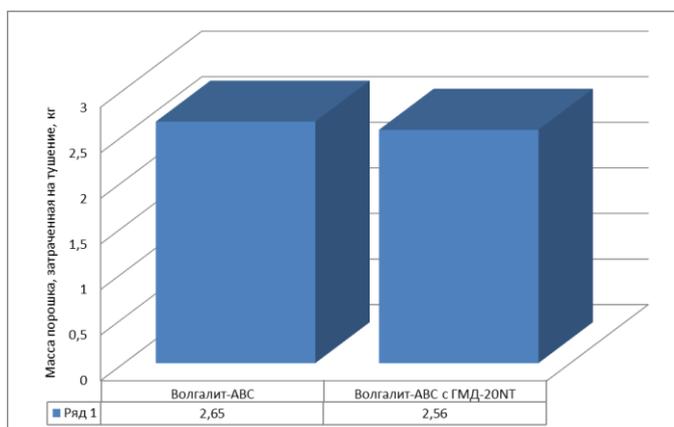


Рисунок 6 – Количество порошка, затраченное на тушение модельного очага пожара класса А1 огнетушащим порошком «Волгалит-ABC» и «Волгалит-ABC» с гидрофобизирующей добавкой ГМД-20NT (1,5 % по массе)

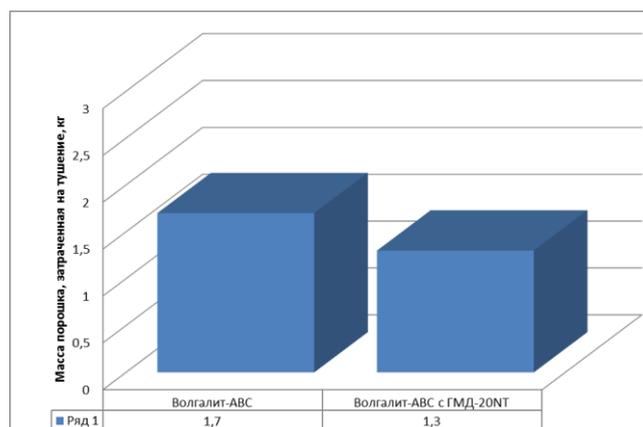


Рисунок 7 – Количество порошка, затраченное на тушение модельного очага пожара класса 55В огнетушащим порошком «Волгалит-ABC» с гидрофобизирующей добавкой ГМД-20NT (1,5 % по массе)

Результаты проведенных промышленных испытаний по определению огнетушащей способности опытной партии огнетушащего порошка «Волгалит-ABC» с гидрофобизирующей добавкой на основе торфяного сырья с концентрацией 1,5 % (по массе) подтверждают возможность использования указанного гидрофобизирующего вещества в огнетушащем порошке. Количество порошка с ГМД-20NT для тушения модельного очага класса А1 при испытаниях потребовалось на

3,4% меньше, а для тушения модельного очага класса В55 потребовалось на 23,5% меньше по сравнению с выпускаемым порошком, и при этом параметры порошка соответствуют требуемым эксплуатационным параметрам государственного стандарта ГОСТ Р 53280.4-2009.

Огнетушательная способность порошка с добавкой обусловлена ускорением процесса термического разложения компонентов порошка (рис. 8) за счет экзотермического разложения торфяной добавки.

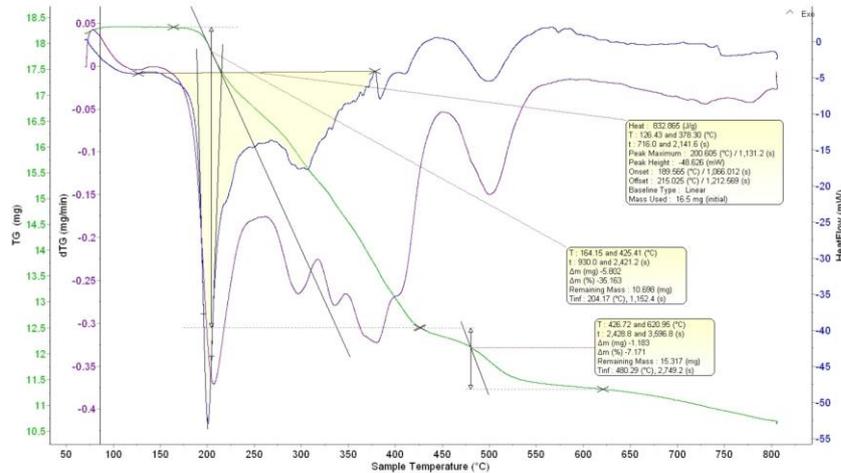


Рисунок 8 – Кривые ТГА и ДСК для огнетушащего порошка «Волгалит-АВС» с гидрофобно-модифицирующей добавкой марки «ГМД-20NT» в азотно-кислородной среде (содержание кислорода – 21%)

С целью оценки влияния на эффективность тушения массы порошка и процентного соотношения добавок проведен регрессионный анализ результатов экспериментов. Полученные регрессионные уравнения подтвердили значимость влияния таких факторов, как масса порошка и процентное содержание добавок на огнетушательную способность. Регрессионные уравнения для различных видов добавок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Уравнения регрессии для различных видов добавок

Эксперимент	Регрессионное уравнение	Оптимум функции
Волгалит АВС в смеси с микрокапсулированной добавкой с хладонном на модельном очаге с ТГВ (древесина)	$Y = -21,1067 + 28,9091\sqrt{X_1} - 10,6569X_1 + 1,5772\sqrt{X_2}$	Масса: 1,84 % содержание: 9
Волгалит АВС в смеси с добавкой – окисленный графит марки EG-350 на модельном очаге с ТГВ (древесина)	$Y = -1,0278891 + 1,09253731X_1$	Масса: 1,51 % содержание: 14
Волгалит АВС в смеси с добавкой – оксид кремния на модельном очаге с ТГВ (древесина)	$Y = -16,3812 + 9,2350\sqrt{X_1} - 0,3739X_1 + 2,7486\sqrt{X_2}$	Масса: 1,75 % содержание: 14
Волгалит АВС в смеси с добавкой – шунгит на модельном очаге с ТГВ (древесина)	$Y = -40,5933 + 65,0515\sqrt{X_1} - 25,5739X_1$	Масса: 1,28 % содержание: 9
Волгалит АВС в смеси с добавкой – микрокапсулы хладона в смеси с шунгитом на модельном очаге с ТГВ (древесина)	$Y = -2,78949 + 1,89108X_1 + 0,00197 X_1^2$	Масса: 1,54 % содержание: 18,5
Волгалит АВС в смеси с добавкой – окисленный графит на модельном	$Y = -7,53818 + 2,80087\sqrt{X_1} - 0,33345X_2 + 2,42194\sqrt{X_2}$	Масса: 2,1 % содержание: 14,2

Эксперимент	Регрессионное уравнение	Оптимум функции
очаге с легковоспламеняющейся жидкостью		
Волгалит ABC в смеси с добавкой – шунгит на модельном очаге с легковоспламеняющейся жидкостью	$Y = -22,7221 + 25,9468\sqrt{X_1} - 7,655X_1 - 0,1247X_2$	Масса: 2,05 % содержание: 18,9

Для оценки влияния добавок сорбентов на интенсивность испарения при ликвидации разлива ЛВЖ в лабораторных условиях проведены исследования при покрытии поверхности слоем огнетушащих составов с различными видами добавок и с различной концентрацией их в огнетушащем порошке по разработанной методике.

Результаты исследований приведены на рис. 9, 10. На рис. 9 приведены данные при толщине слоя порошковых составов 6,0 мм, на рис. 10 – 15 мм.

Лабораторные исследования показали, что наиболее эффективно покрытие огнетушащими составами поверхности испарения ЛВЖ в начальное время. Показано, что слой огнетушащего порошка с добавкой графита (15 %) толщиной 15 мм снижает интенсивность испарения на 45 %, следовательно, при разлившейся жидкости эффективным способом предотвращения воспламенения может быть покрытие ЛВЖ огнетушащим порошком с добавкой сорбентов.

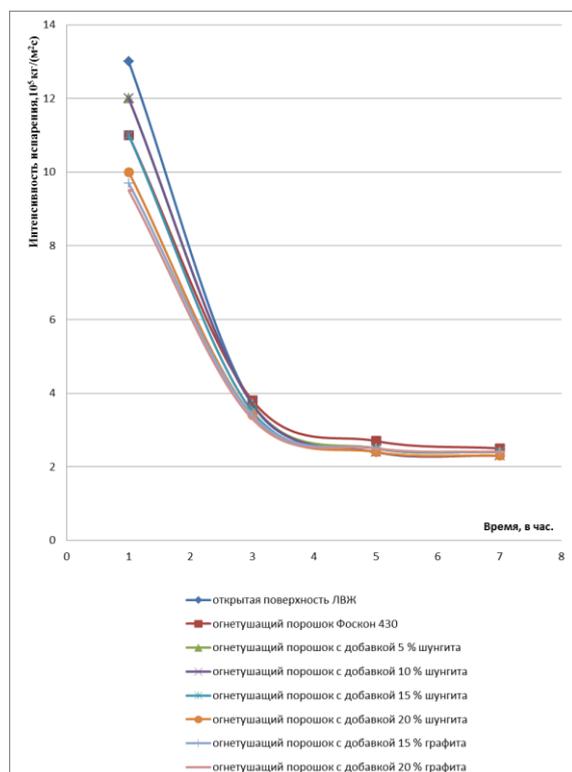


Рисунок 9 – Изменение интенсивности испарения ЛВЖ во времени при толщине слоя порошковых составов 6 мм

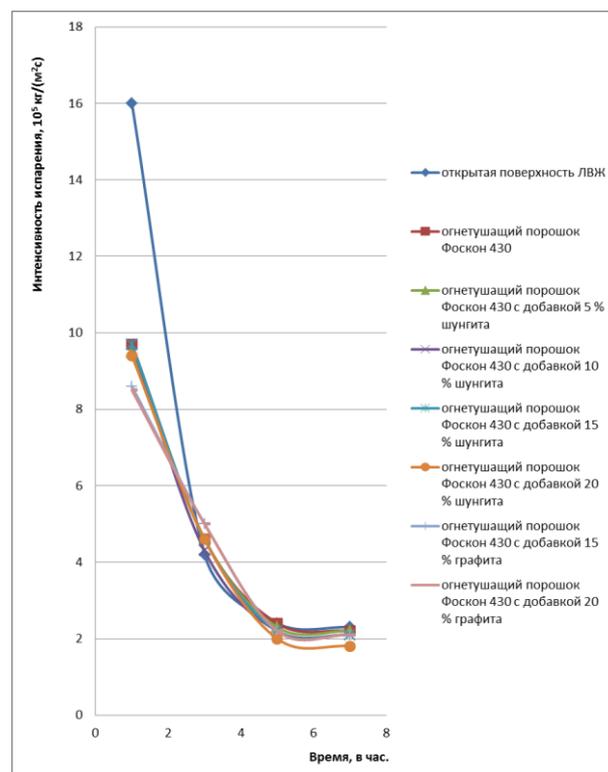


Рисунок 10 – Изменение интенсивности испарения ЛВЖ во времени при толщине слоя порошковых составов 15 мм

Исследования показали, что общие тенденции изменения огнетушащей способности порошковых составов при лабораторных и промышленных испытаниях совпадают. Это позволяет с достаточной мерой достоверности заменить промышленные испытания исследованиями на лабораторной установке, что позволит сократить временные и финансовые затраты на проведение исследований.

Оценку изменения количества порошка, необходимого для тушения модельного очага огнетушителем ОП-3, на основе лабораторных исследований можно оценить по следующей зависимости:

$$N = K \cdot N_{\text{л}} , \quad (1)$$

где N – изменение количества порошка при сравнительной оценке при тушении модельного очага огнетушителем ОП-3, в %;

K – коэффициент, учитывающий масштабность и подачу порошка при тушении огнетушителем ОП-3;

$N_{\text{л}}$ - изменение количества порошка при сравнительной оценке при тушении модельного очага на лабораторной установке, в %.

Для промышленного испытания изменения огнетушащей способности порошков с добавками шунгита коэффициент $K = 0,63$.

Значения коэффициента K для огнетушащих порошков с исследуемыми добавками (окисленный графит, микрокапсулы с хладоном, шунгит) находятся в пределах 0,63 – 0,68 в зависимости от типа добавки.

В четвертой главе «Исследование эффекта «огненной сферы» при тушении порошками» описан эффект, наблюдаемый в ходе проведения исследований, предложено его теоретическое обоснование и разработана его математическая модель.

В процессе тушения модельных очагов пожара в первые секунды наблюдалось резкое увеличение интенсивности горения, которое происходило из-за попадания частиц порошка в зону горения в смеси с кислородом воздуха, увлекаемым порошковой струей. В виду того, что пламя в момент подачи порошка в зону горения приобретало характерную округлую форму данный эффект получил название «огненной сферы».

Эффект «огненной сферы» происходит при тушении легковоспламеняющейся жидкости (бензин) и при тушении твердых горючих материалов (древесины). На рис. 11 представлены моменты подачи огнетушащего порошка в зону горения и образование «огненной сферы» при лабораторных исследованиях и рис. 12 на промышленных испытаниях.



а



б

Рисунок 11 – Образование «огненной сферы» при подаче огнетушащего порошка в зону горения (исследования на лабораторной установке):

а – тушение жидкости; б – тушение древесины



Рисунок 12 – Образование «огненной сферы» при подаче огнетушащего порошка в зону горения (промышленные испытания)

Диаметр образующейся «огненной сферы» D можно определить по соотношению:

$$D = D_{гор} \left(1 + \frac{CSv}{2\pi g^2 \theta (0,235 \left(\frac{\Theta_{пож}}{1000} \right)^{2/5} - 2,04r)^2 v_{пл}} \right) \cdot K_{гор}, \quad (2)$$

где $D_{гор}$ – диаметр горячей поверхности жидкости или ТГМ, м;

θ – половинный угол раскрытия струи;

$\Theta_{пож}$ – тепловая мощность в очаге горения, Вт;

$K_{гор}$ – коэффициент, зависящий от вида горючего материала, составляет 1,2...1,5;

C – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы порошка;

S – площадь, занимаемая частицами порошка, м²;

v – скорость струи порошка при входе в зону горения, м/с.

Адекватность и работоспособность предложенной модели доказана на практике и проведенными теоретическими расчетами.

Незначительное расхождение полученных результатов с реальным диаметром сферы, измеренным по фотографии, объясняется условностью границы сферы на фотографии, определенной по видимой части пламени.

«Огненная сфера» образуется при тушении жидкости и при тушении древесины. Указанный эффект следует учитывать при тушении пожара – начало тушения необходимо начинать с расстояния обеспечивающего безопасность при тепловом излучении от «огненной сферы».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика для проведения исследований огнетушащей способности, позволяющая проводить сравнительную оценку огнетушащей способности порошков, определять минимальную огнетушащую интенсивность прекращения горения, проводить исследования по тушению порошками горючих жидкостей и твердых горючих материалов.

2. Разработаны составы огнетушащих порошков с увеличенной от 17 до 39 % огнетушащей способностью и повышенными эксплуатационными характеристиками (с гидрофобизирующим веществом на основе торфяного сырья).

3. На основе лабораторных и промышленных испытаний огнетушащих порошковых составов двойного назначения определены оптимальные концентрации сорбирующих веществ.

4. Показано, что процесс тушения огнетушащими порошками имеет комплексный характер, включающий тушение в гетерогенной и гомогенной фазе. Преобладающий эффект прекращения горения порошками происходит в гомогенной фазе за счет ингибирования реакции горения.

5. По результатам полигонных и лабораторных испытаний показано сходство между выборками полученных данных и определен коэффициент масштабирования, принимающий значение $K = 0,63 - 0,68$ в зависимости от типа добавки.

6. Обнаружен и теоретически обоснован эффект образования «огненной сферы» в момент подачи порошка в зону горения. Предложен метод расчета диаметра образования «огненной сферы» для обеспечения безопасности человека и оборудования от воздействия теплового излучения при проведении работ по тушению горения твердых горючих материалов или легковоспламеняющейся жидкости.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

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

1. **Дмитриев, О.В.** Исследование свойств огнетушащих порошковых составов, модифицированных гидрофобными добавками на основе торфяного сырья / **О.В. Дмитриев, О.С. Мисников, В.И. Попов** // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 5 (22). – С. 81-86.

2. **Дмитриев, О.В.** Способ получения гидрофобно-модифицированных порошков и методика определения их огнетушащей способности / **О.В. Дмитриев, О.С. Мисников, В.И. Попов** // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – № 4 (23). – С. 65-70.

3. **Misnikov, O.S., Dmitriev O.V., Popov V.I., and Chertkova E.Yu.** The Use of Peat Based Water Repellants to Modify Fire Extinguishing Powders / O.S. Misnikov, **O.V. Dmitriev**, V.I. Popov // Polymer Science. Series D. – 2016. – № 1 (9). – P. 133-139.

4. **Дмитриев, О.В.** Эксплуатационные свойства огнетушащих порошков, модифицированных торфяными гидрофобными добавками / **О.В. Дмитриев** // Современные проблемы гражданской защиты. – 2022. – № 1 (42). – С. 32-37.

5. **Дмитриев, О.В.** Применение микрокапсул в тушении пожаров / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов, М.В. Пуганов // Современные проблемы гражданской защиты. – 2022. – № 2 (43). – С. 59-65.

6. **Дмитриев, О. В.** Патент на изобретение RU 2605056 С1, 20.12.2016. Заявка № 2015125928/12 от 29.06.2015. Огнетушащий порошок многоцелевого назначения / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов, О.С. Мисников, И. А.Малый, И.Ю. Шарабанова.

Публикации в иных научных изданиях:

7. **Дмитриев, О.В.** Лабораторные исследования огнетушащей способности порошковых составов / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // Сборник материалов межвузовского научно-практического семинара «Молодая наука–пожарной безопасности XXI века». – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2010. – С. 18-24.

8. **Дмитриев, О.В.** Полигонные и промышленные испытания огнетушащих порошковых составов / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // Сборник материалов межвузовского научно-практического семинара «Молодая наука–пожарной безопасности XXI века». – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2010. – С. 24-29.

9. **Дмитриев, О.В.** История создания и развития средств порошкового тушения пожаров / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // Сборник статей, посвященный Дню российской науки и 45-летию Ивановского института ГПС МЧС России. «Научные исследования в области пожарной безопасности: история и современность». – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2011. – С. 31-36.

10. **Дмитриев, О.В.** Лабораторные методы исследования огнетушащей способности порошковых составов / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // Сборник материалов V Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность». – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2010. – Ч.1.– С. 154-164.

11. **Дмитриев, О.В.** Порошковые огнетушители и автоматические системы пожаротушения: исторические аспекты / **О.В. Дмитриев** // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» посвященной 45-летию Ивановского института ГПС МЧС России. – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2011. – Ч.2. – С. 22-25.

12. **Дмитриев, О.В.** Совершенствование огнетушащей способности порошковых составов / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» посвященной 45-летию Ивановского института ГПС МЧС России. – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2011. – Ч.1. – С. 35-39.

13. **Попов, В.И.** Установка для лабораторных исследований огнетушащих порошков / В.И. Попов, **О.В. Дмитриев**, С.В. Тимофеева // Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». – Воронеж: Воронежский институт ГПС МЧС России. – 2012. – Ч.1. – С. 177-179.

14. **Дмитриев, О.В.** О механизмах подавления пламени огнетушащими порошками / **О.В. Дмитриев** // Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность». – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2012. – С. 37-38.

15. **Дмитриев, О.В.** О влиянии интенсивности подачи порошкового состава / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность». – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2012. – С. 39-41.

16. **Дмитриев, О.В.** Лабораторная установка и исследования огнетушащей способности порошковых составов / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // Горение и плазмохимия. – 2012. – № 3 (10). – С. 203-207.

17. **Дмитриев, О.В.** Модифицирование огнетушащего порошка гидрофобной добавкой на основе торфяного сырья / **О.В. Дмитриев**, О.С. Мисников, В.И. Попов, С.В. Левичев // *Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность»* – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2013. – С. 25-27.
18. **Дмитриев, О.В.** Прекращение горения огнетушащими порошковыми составами / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // *Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность»* – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2013. – С. 28-31.
19. **Мисников, О.С.** Исследование свойств огнетушащих порошков, модифицированных торфяными гидрофобными добавками / О.С. Мисников, **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // *Труды Инсторфа: научный журнал*. – Тверь: Тверской государственный технический университет. – 2013. – № 8 (61). – С. 23-32.
20. **Дмитриев, О.В.** Огнетушащая способность порошка с гидрофобизирующей добавкой на основе торфяного сырья / **О.В. Дмитриев**, О.С. Мисников, В.И. Попов // *Материалы Международного научного семинара «Проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов хозяйствования»* – г. Кокшетау, Республики Казахстан: ГУ «Кокшетауский технический институт МЧС РК». – 2014. – С. 40-43.
21. **Дмитриев, О.В.** Универсальные огнетушащие порошковые составы для тушения пожара и ликвидации аварии на автозаправочных комплексах / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов, Р.А. Коробченко, Е.С. Прохоров // *Материалы IX Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность»* – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2014. – С. 37-40.
22. **Попов, В.И.** Огнетушащие порошки двойного применения / В.И. Попов, **О.В. Дмитриев**, Р.А. Коробченко, Е.С. Прохоров // *Материалы IX Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность»* – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России. – 2014. – С. 95-97.
23. **Дмитриев, О.В.** Исследования огнетушащей способности порошка Волгалит-АВС с гидрофобизирующей добавкой на основе торфяного сырья / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // *Материалы V Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы»*. – г. Воронеж: Воронежский институт ГПС МЧС России. – 2014. – Ч.1. – С. 324-329.
24. **Мисников, О.С.** Применение продуктов глубокой переработки торфа для получения огнетушащих порошков / О.С. Мисников, **О.В. Дмитриев** // *Тверской государственный технический университет – опорный региональный ВУЗ в подготовке инженерных кадров. Сборник тезисов докладов внутривузовской научно-практической конференции*. – г. Тверь: Тверской государственный технический университет. – 2015. – С. 103-105.
25. **Мисников, О.С.** Использование гидрофобизаторов на основе торфа для модификации огнетушащих порошков / О.С. Мисников, **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов, Е.Ю. Черткова // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2015. – № 7. – С. 20-29.
26. **Мисников, О.С.** Перспективы использования торфяных модифицирующих добавок для гидрофобизации огнетушащих порошков / О.С. Мисников, **О.В. Дмитриев**, Иванов В.А. // *Болота и биосфера. Материалы IX Всероссийской с международным участием научной школы*. – г. Иваново: ПресСто. – 2015. – С. 113-122.
27. **Дмитриев, О.В.** Расчет параметров образования «Огненного шара» при тушении порошками / **О.В. Дмитриев**, В.И. Попов // *Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов», посвященной 90-летию образования гражданской обороны*. – г. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – 2022. – С. 96-101.