

УДК 614.842.612

DOI 10.48612/ntp/tu2h-gma7-b66h

СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И УНИВЕРСАЛЬНЫХ ОГнетушащих Веществ НА ОСНОВЕ СОЛЕЙ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

В. В. СЕРОВ^{1,2}, А. Л. НИКИФОРОВ¹, К. А. НОВОЖИЛОВА¹

¹ Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

² Главное управление МЧС России по Ивановской области,
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: wws37@rambler.ru, anikiforoff@list.ru, novozhilovax@yandex.ru

Статья представляет систематический аналитический обзор современных научных исследований (2009–2024) в области разработки многофункциональных огнетушащих веществ (ОТВ) на основе солей и их водных дисперсий. Рассмотрены пять основных направлений: 1 — химическое ингибирование цепных реакций горения аэрозолями и температурно-активированной водой с солями калия; 2 — структурная модификация водной среды гидрогелями и полимерными стабилизаторами пен; 3 — плёнкообразующие фторированные и фторсвободные пенообразователи; 4 — порошковые составы с кристаллогидратами солей; 5 — адаптация систем к воде повышенной жёсткости и солёности. Проведена критическая оценка степени универсальности каждого класса ОТВ в разрезе классов пожаров А, В, С, Е. Выявлены системные ограничения: термическая деградация ингибиторов, антагонизм многофункциональных добавок, экологические ограничения PFAS и дефицит валидированных моделей для гетерогенных сценариев пожара. Сформулированы ключевые научно-методические пробелы, обосновывающие необходимость разработки комплексной методологии проектирования универсальных рецептур ОТВ.

Ключевые слова: огнетушащее вещество, ингибирование горения, температурно-активированная вода, соли калия, пенообразователь, кристаллогидраты, универсальность ОТВ, PFAS, фторсвободная пена, аэрозольное пожаротушение.

MODERN SCIENTIFIC APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF MULTIFUNCTIONAL AND UNIVERSAL SALT-BASED FIRE EXTINGUISHING AGENTS: AN ANALYTICAL REVIEW

V. V. SEROV^{1,2}, A. L. NIKIFOROV¹, K. A. NOVOZHILOVA²

¹ Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

² The Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Ivanovo region,
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: anikiforoff@list.ru

This paper presents a systematic analytical review of contemporary research (2009–2024) on multifunctional fire extinguishing agents (FEAs) based on salts and their aqueous dispersions. Five principal research clusters are examined: 1 — radical chain-reaction inhibition via aerosols and thermally-activated water (TAW) with potassium salts; 2 — rheological modification through hydrogels and polymer foam stabilisers; 3 — film-forming fluorinated and fluorine-free foam concentrates; 4 — dry-powder compositions with salt crystal hydrates; 5 — adaptation of FEA systems to hard and saline water. A critical evaluation of the universality of each FEA class across fire classes A, B, C, E is performed. Systemic limitations are identified: thermal degradation of inhibitors, antagonism among multifunctional additives, PFAS environmental restrictions, and a deficit of validated models for heterogeneous fire scenarios. Key research gaps are formulated, substantiating the need for a comprehensive design methodology for universal FEA formulations.

Keywords: fire extinguishing agent, combustion inhibition, thermally activated water, potassium salts, foam concentrate, crystal hydrates, universal FEA, PFAS, fluorine-free foam, aerosol fire suppression

Традиционная практика пожаротушения базируется на применении специализированных огнетушащих веществ (ОТВ), эффективных преимущественно для ограниченного класса пожаров: вода и растворы смачивателей (класс А), пены (класс В), порошки (классы А, В, С, Е), газовые составы и аэрозоли (классы В, С, Е). Вместе с тем усложнение технологических объектов, дефицит времени на идентификацию класса пожарной нагрузки в условиях оперативного реагирования, а также жёсткие логистические и экологические ограничения, накладываемые на узкоспециализированные средства, создают устойчивый запрос на разработку универсального ОТВ, способного комбинированно воздействовать на физические и химические аспекты горения нескольких классов пожаров одновременно.

Особую актуальность проблема приобрела в связи с ужесточением международных экологических норм в отношении перфторалкильных и полифторалкильных соединений (PFAS), которые являются активными компонентами плёнообразующих пенообразователей типа AFFF, доминирующих при тушении горючих жидкостей (класс В) [1]. Параллельно возрастает интерес к солевым системам – водным растворам и аэрозолям на основе калийных, аммонийных и алюминиевых солей. Данные составы показывают высокую ингибирующую активность при значительно меньшем экологическом вреде.

Целью статьи являются систематизация и критический анализ современных исследований по модификации водных, дисперсных, пенных и аэрозольных огнетушащих сред химическими ингибиторами, структурообразующими добавками и поверхностно-активными веществами; оценка степени раскрытия проблемы многофункциональности ОТВ; выявление научно-методических пробелов, определяющих актуальность дальнейших исследований. Обзор охватывает публикации 2009–2024 годов, включая работы из баз данных РИНЦ, Web of Science и Scopus.

Химическое ингибирование: аэрозоли и температурно-активированная вода

Значительная часть современных работ посвящена доставке водорастворимых ингибиторов радикальных цепных реакций в зону пламени посредством аэрозолей и температурно-активированной воды (далее – ТАВ). В исследованиях Шмакова А. Г., Коробейничева О. П. [1, 15] экспериментально подтверждена высокая

эффективность аэрозолей растворов калийных солей ($K_3[Fe(CN)_6]$, $K_4[Fe(CN)_6]$) с медианным размером частиц 1–20 мкм. Натурные испытания модельных очагов класса А и низовых лесных пожаров продемонстрировали сокращение расхода жидкости в 30 раз по сравнению с водой, что обусловлено прямым блокированием носителей цепных реакций. Развитие данного подхода представлено в работах В. В. Роевко, Р. В. Халикова и А. Н. Кудрина [2, 12], где доказано, что полидисперсная капельная фаза ТАВ (0,01–10 мкм) при дозировании 10%-ного раствора $K_4[Fe(CN)_6]$ сокращает время подавления пламени в 1,65 раза. Эксперименты проводились в помещении с ограждающими конструкциями из негорючих материалов. Объём помещения – 300 м³ с суммарным параметром негерметичности для группы помещений 0,012 м⁻¹. Для создания струй ТАВ с ингибирующими свойствами было выбрано устройство дозирования, позволяющее создавать струи ТАВ с массовой концентрацией ингибирующих солей до 18 %. В первой серии экспериментов тушение производилось ТАВ без добавления ингибирующих солей. Во второй серии экспериментов для тушения были использованы струи ТАВ при температуре недогретой до вскипания 140 °С и 10-процентной концентрации гексацианоферрата (II) калия для достижения ингибирующего эффекта.

Однако лабораторно-химический анализ [3] выявил критическое ограничение: при температурном режиме подачи 160–190 °С происходит разрушение комплексного аниона $[Fe(CN)_6]^{4-}$, что снижает фактическую концентрацию ингибитора на 56–68 %. Установлена эмпирическая зависимость: $y = 80,884 \cdot x^{-0,557}$ ($R^2 = 0,993$), позволяющая корректировать дозировку. При этом исследования Т. И. Чистякова [13] подтверждают, что дозирование ингибиторов в недогретую воду не оказывает существенного влияния на электропроводимость струй (изменение сопротивления $\leq 2-3\%$), что допускает безопасное тушение электроустановок до 0,4 кВ.

В зарубежных исследованиях [2] для шести видов солей щелочных металлов (K_2CO_3 , Na_2CO_3 , $K_2C_2O_4$, CH_3COOK , KCl , $KHCO_3$) показано, что при подаче в виде мелкодисперсного тумана наилучшие результаты по минимальной огнетушащей концентрации демонстрируют смеси карбоната и бикарбоната калия в соотношении 3:1 для газовых диффузионных пламен (H_2 + природный газ), что

открывает перспективы применения ОТВ для класса пожаров С.

Математическое моделирование процесса объёмного пожаротушения ТАВ с ингибиторами в машинных залах газокompрессорных станций (ГКС) с использованием комплекса PyroSim показало, что применение чистой ТАВ не позволяет полностью потушить пожар турбинного масла в нормативное время, установленное СП 485.1311500.2020 «Системы противопожарной защиты. Установки автоматического пожаротушения. Нормы и правила проектирования». Введение ингибирующих солей снижает время тушения не менее чем в 1,5 раза, а эффективность охлаждения зоны горения повышается в 1,6 раза [4]. Расхождение между расчётной и экспериментальной моделями не превышает 15 %.

Отдельного внимания заслуживает применение аэрозольных систем для тушения легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) на открытом пространстве. В работе В. М. Баланюка [21] экспериментально доказано, что аэрозольные генераторы (заряд 200 г) обеспечивают тушение очага 34В за 6–12 с при интенсивности подачи всего 8 г/(с·м²), что в 20–125 раз ниже, чем у порошковых аналогов. Комбинированное действие достигается за счёт ингибирования, флегматизации и динамического срыва пламени высокоскоростной струей (~20 м/с на расстоянии 6 м). При этом непрерывная генерация аэрозоля в течение 25–45 с после ликвидации открытого пламени предотвращает повторное воспламенение за счёт длительного поддержания флегматизирующей концентрации в приповерхностном слое.

Структурная модификация воды: гидрогели, термовспенивающиеся системы и стабилизаторы пен

Альтернативный путь повышения универсальности ОТВ связан с изменением реологических и термических свойств водной среды посредством введения полимерных структурообразователей. Ивченко О. А. и Панкин К. Е. [5] показали, что алюмогель в дозировке 3,5–8,4 г/кг воды формирует на поверхности древесины тугоплавкую стеклообразную плёнку, снижая расход ОТВ в 3 раза и подавляя тление. Механизм действия реализуется через два последовательных процесса: во-первых, гидрогель за счёт высокого водоудержания (до 95–99 % масс.) обеспечивает пролонгированное охлаждение горячей поверхности; во-вторых, при испарении воды оксид алюминия образует тонкую инертную барьерную плёнку, блокирующую диффузию кислорода к углизированному слою.

Кокшаров А. В. [6, 7] показал, что добавка Na-KMЦ (карбоксиметилцеллюлоза натрия) в концентрации 0,25–2,0 % мас. в 4 раза

снижает скорость синерезиса пены низкой кратности и в 5 раз повышает её термическую устойчивость. На этой базе разработан термовспенивающийся состав (ПАВ + (NH₄)₂CO₃ + Na-KMЦ), вспенивающийся непосредственно в зоне горения без применения традиционных пеногенераторов. Данное решение позволяет сократить расход ОТВ в 1,6 раза и обеспечить тушение электрооборудования до 0,4 кВ. Независимо Любимов В. Н. и соавт. [22] установили, что сополимер N-винилимидазола с натриевой солью метакриловой кислоты (ВИМ-Na-МАК) повышает устойчивость пены в 2,4–2,5 раза и время полного её разрушения – в 3,5–3,8 раза.

Актуальным направлением является адаптация гидрогелей к специфике тушения пожаров литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Согласно последним зарубежным обзорам [26, 27], биополимерные гидрогели на основе целлюлозы и альгината натрия обладают комплексом свойств, критически важных для этого применения: высоким водоудержанием, быстрым плёнообразованием, поглощением тепла и изоляцией от кислорода. Задача термического разгона ЛИА при высоких мощностях (> 60 кВтч в автомобильных батарейных пакетах) остаётся открытой, поскольку лабораторные испытания на малых образцах не позволяют валидировать результаты для реальных масштабов [27].

Плёнообразующие пенообразователи: фторированные системы и экологически безопасные альтернативы

Для тушения нефтепродуктов ключевую роль играют фторированные ПАВ. И. Ю. Иванов и соавт. [19] установили, что амфотерные фторированные ПАВ (типа «Амфотерное 4–5») при концентрации 0,20–0,30 г/дм³ снижают поверхностное натяжение до 15,2–16,5 мН/м, обеспечивая образование изолирующей плёнки на н-гептане ($\sigma < 18,0$ мН/м). Использование растворителя 2-бутоксизанола снижает ККМ и не повышает поверхностное натяжение.

Власов Н. А. и Ерёмкина Т. Ю. [20] исследовали влияние хлорида аммония на эффективность пены фторированного пенообразователя. Установлено, что рост концентрации NH₄Cl улучшает морозоустойчивость (снижение температуры замерзания раствора), однако одновременно уменьшает коэффициент растекания плёнки по гептану: минимальный удельный расход раствора возрастает более чем в 2 раза, а оптимальная интенсивность подачи – в 1,5 раза. Данное исследование наглядно демонстрирует классический компромисс между эксплуатационной устойчивостью и огнетушащей эффективностью, который необходимо учитывать при конструировании универсальных рецептур.

Порошковые системы с кристаллогидратами солей

В направлении сухих ОТВ Вальцифер И. В. и соавт. [8] предложили использовать струвит ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ гексагидрат магний-аммоний фосфата) как газогенерирующий и охлаждающий компонент огнетушащего порошкового состава (ОПС). Эндотермическое разложение струвита ($\Delta H \approx -1400$ Дж/г, $T_{a^p} \approx 120$ °С) сопровождается выделением 44 % химически связанной воды и аммиака. Введение высокодисперсного струвита (< 20 мкм, 35 %) в смесь с моноаммонийфосфатом (65 %) обеспечивает удельную эффективность тушения 0,30 кг/м² по классу В, что на 30–60 % выше промышленных аналогов. Гидрофобная модификация нанокремнезёмом устраняет характерную проблему слеживания гигроскопичных кристаллогидратных порошков.

Зарубежные работы 2024 года [29] демонстрируют аналогичный подход: сухая вода (dry water, DW) с ядром бикарбоната натрия и гидрофобной оболочкой из нанокремнезёма на 25,6–30,6 % превышает скорость тушения стандартных АВС-порошков при рабочем давлении подачи порошка из огнетушителя 0,4 МПа. Более того, модификация DW солями калия обеспечивает высокотемпературное высвобождение K^+ -радикалов, что принципиально меняет механизм действия: с чисто физического (охлаждение, разбавление) на химически-ингибирующий, характерный для аэрозольных систем.

Адаптация пенных систем к воде повышенной жёсткости и солёности

Тайсумовым Х. А. [23, 24] разработана бинарная система термостойкой пены на базе основного хлорида алюминия (ОХА) и алкилсульфата натрия с добавками сульфата

аммония и уксусной кислоты. Ключевой результат: наличие хлорида натрия в морской воде позволяет снизить концентрацию ПАВ в рабочем растворе в 4,4–17 раз относительно пресноводного варианта при сохранении устойчивости пены (время полураспада > 180–300 мин). Это снижает экологическую нагрузку на гидросферу и повышает экономическую эффективность тушения пожаров классов А и В.

Попытки создания комплексных универсальных составов

Наиболее близко к заявленной теме многофункциональности находятся работы Гуцева Н. Д., Гаравина В. Ю. и соавт. [11, 18], где разработаны экспериментальные образцы, сочетающие смачивающие, пенообразующие и антипиренные свойства для защиты лесных горючих материалов (ЛГМ). Удерживающая способность состава на зелёном мху достигает 97–99 % при дозировке 2–3 л/м², а рабочие концентрации огнетушащего состава в водном рабочем растворе не превышают 0,4–0,5 % масс. Тем не менее жидкие рецептуры требовали доработки антипиренных свойств, а гранулированные – увеличения скорости растворения. Патентный поиск авторов подтвердил: на рынке отсутствуют составы, одновременно удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 50588-2012, ГОСТ Р 51057-2001 по всем классам пожарной опасности без компромиссных ограничений.

Критическая оценка:

системные ограничения и перспективы

Несмотря на значительный объём экспериментальных и расчётных данных, анализ литературы выявляет ряд системных ограничений, препятствующих созданию истинно универсального ОТВ. Таблица систематизирует эти ограничения в разрезе механизмов действия.

Таблица. Сравнительный анализ подходов к созданию универсальных ОТВ: механизмы, ограничения и перспективы

Механизм / тип ОТВ	Классы пожаров	Ключевые ограничения	Требуемое решение	Потенциал универсальности
1	2	3	4	5
Химическое ингибирование (аэрозоли и ТАВ с добавками солей калия)*	А, В, Е	Термическая деградация >160 °С; узкая дисперсионная оптимизация; ТАВ без добавок – физический механизм	Термостабильная матрица ингибитора	Высокая
Структурная изоляция (гели, Na-КМЦ, полимеры)	А	Высокая вязкость; неприменимы для ЛВЖ (класс В) ввиду низкой рас-	Адаптивная реология состава	Средняя

Механизм / тип ОТВ	Классы пожаров	Ключевые ограничения	Требуемое решение	Потенциал универсальности
1	2	3	4	5
		текаемости; активация >70 °С		
Плёнкообразование (фторПАВ, AFFF)	В, С	Ограничения PFAS; чувствительность к жёсткости воды; антагонизм с солями	Экологически безопасные аналоги	Высокая
Газогенерация + охлаждение (кристаллогидраты)	В, С	Гигроскопичность; остаточные отложения; при попытке охватить класс А – недостаточное охлаждение твёрдых материалов	Стабилизация текучести и дисперсности	Средняя
Аэрозольные системы (открытое пространство)	В	Зависимость от метеоусловий; ограниченная дальность	Гибридная подача с резервированием	Средняя
Пены на морской/жёсткой воде (ОХА-системы)	А, В	Риск коррозии оборудования; точное дозирование ОХА	Ингибиторы коррозии в составе	Высокая
Порошки с кристаллогидратами (струвит, DW)	А, В, С	Слэживание; недостаточное охлаждение и отсутствие проникающей способности в толщу твёрдых горючих материалов (класс А)**	Гидрофобная модификация нанокремнезёмом	Средняя
Фторсвободные пены (силикон + АОС + гидроталькит)	А, В	Недостаточная эффективность на ЛВЖ; высокий расход ПАВ	Комплексный подбор синергистов	Низкая
* ТАВ без добавок реализует физический механизм тушения (испарительное охлаждение, вытеснение окислителя паром); химическое ингибирование активируется только при введении ингибирующих солей ($K_4[Fe(CN)_6]$ и аналогов). ** Применительно к сухим порошкообразным ОТВ применяется термин: недостаточное охлаждение и отсутствие проникающей способности в толщу твёрдых горючих материалов класса А.				

Отсутствие единой методологии оптимизации

В каждом исследовании концентрация модификатора подбирается эмпирически под конкретный способ подачи и тип пожара. Отсутствует расчётная модель, учитывающая одновременно термическую деградацию ингибитора, кинетику диспергирования, межфазные взаимодействия и влияние жёсткости воды в реальном времени. Следствием этого является

невоспроизводимость результатов при изменении условий подачи даже в пределах одного класса пожаров.

Антагонизм многофункциональных добавок

Азот-фосфорсодержащие антипирены химически конфликтуют с ПАВ, снижая смачивающую способность. Введение солей для морозоустойчивости (NH_4Cl) ухудшает растекаемость плёнки по ЛВЖ [20], хотя в бинарных

системах с ОХА этот эффект частично компенсируется синергией компонентов [23, 24]. Конфликт растворимости калийных солей при высоких концентрациях ПАВ также не имеет общего решения.

Модельно-экспериментальный разрыв

Моделирование в PyroSim демонстрирует снижение времени тушения на 50 % при введении ингибиторов [4], однако реальные сценарии с переменной вентиляцией, сложной геометрией помещений и неоднородной пожарной нагрузкой требуют валидации на полунатурных стендах. Согласно данным зарубежных исследований по ЛИА, лабораторные результаты не получаются одинаковыми с реальными.

Электробезопасность многофазных ОТВ

Безопасность ТАВ с ингибиторами для установок до 0,4 кВ подтверждена [13], однако поведение комбинированных пенно-гелевых систем и полимерных стабилизаторов при тушении высоковольтного оборудования (> 1 кВ) остаётся фактически неизученным. Это существенно ограничивает применение перспективных мультифункциональных рецептур на объектах энергетики.

Эколого-эксплуатационные аспекты

Вопрос токсичности продуктов разложения (цианидов, аммиака, фторсодержащих соединений) и коррозионной активности растворов рассматривается фрагментарно. Не проведена сравнительная оценка стоимости, сроков хранения, совместимости с пожарным оборудованием и утилизации остатков.

Научные пробелы и обоснование направлений исследований

На основании проведённого анализа сформулированы следующие ключевые научно-методические пробелы, определяющие направления дальнейших исследований в области универсальных ОТВ, а именно:

1. Отсутствие комплексной методики разработки универсального ОТВ с учётом термодинамических условий подачи, качества

воды (жёсткость, солёность) и класса пожарной нагрузки.

2. Дефицит экспериментально верифицированных моделей эффективности по классам А, В, Е с учётом требований электробезопасности, экологических ограничений и нормативных сроков тушения.

3. Отсутствие интегрального критерия «универсальности» ОТВ, совмещающего нормативные требования ГОСТ Р 50588, ГОСТ Р 51057 для классов А, В, С, Е.

Устранение перечисленных пробелов требует разработки научно обоснованной рецептуры универсального ОТВ, базирующейся на термодинамическом моделировании межфазных процессов, экспериментальной оптимизации концентрации активных компонентов и многоклассовой валидации эффективности. Это позволит перейти от эмпирического комбинирования добавок к целенаправленному проектированию составов с гарантированными характеристиками для сложных сценариев возгорания.

Заключение

Проведённый систематический обзор показывает, что проблема создания многофункционального ОТВ раскрыта преимущественно на уровне частичных технологических решений и экспериментальных прототипов. Каждый из рассмотренных классов составов обладает выраженными преимуществами в ограниченном диапазоне условий, однако ни один из них не обеспечивает полного охвата классов А–Е без компромиссных ограничений.

Наиболее перспективными с точки зрения универсальности представляются: 1 — термостабилизированные солевые ингибиторы в водной/аэрозольной матрице; 2 — бифункциональные составы ПАВ + кристаллогидраты с полимерным стабилизатором; 3 — фторсвободные пенообразователи с гидроталькитовыми ингибиторами. Синтез указанных направлений в рамках научно-обоснованной рецептуры представляет собой перспективное и научно-актуальное направление.

Список литературы

1. Эффективная технология тушения пожаров с помощью аэрозолей растворов солей / А. Г. Шмаков, О. П. Коробейничев, А. А. Чернов [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2009. № 3. С. 92–101.

2. Роечко В. В., Халиков Р. В., Кудрин А. Н. Исследование объёмного пожаротушения температурно-активированной водой при введении ингибирующих солей // Пожары и ЧС. 2022. № 1. С. 5–11.

3. Халиков Р. В., Роечко В. В., Дегтярев С. В. Эффективные концентрации ингибирующих солей в ТАВ, используемой для пожаротушения // Пожары и ЧС. 2021. № 1. С. 40–47.

4. Халиков Р. В., Халиков В. Г. Моделирование пожаротушения машинного зала газомоторной станции температурно-активированной водой // Пожары и ЧС. 2023. № 1. С. 70–77.

5. Ивченко О. А., Панкин К. Е. Тушение лесных горючих материалов гидрогелями

на основе гидроксида алюминия // Лесотехнический журнал. 2019. № 1. С. 76–84.

6. Стабилизация пены низкой кратности натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы / А. В. Кокшаров, В. Ф. Марков, Д. Ю. Бучельников [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 10. С. 79–83.

7. Изучение возможности получения термовспенивающихся ОС на основе натриевой соли / А. В. Кокшаров, Е. В. Гайнуллина, М. Л. Кондратьева [и др.] // Техносферная безопасность. 2021. № 1 (30). С. 101–106.

8. Влияние кристаллогидратов солей в огнетушащем порошковом составе на его удельную эффективность тушения ЛВЖ / И. В. Вальцифер, А. Ш. Шамсутдинов, В. А. Вальцифер [и др.] // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 5–11.

9. Левшенков А. И., Левшенкова Л. Е. Горение смесей ониевых солей 5,5'-азотетразола с окислителями // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17. № 3. С. 331–338.

10. Грицков С. Н. Влияние концентрации и вида соли на эффективность поглощения торфом при тушении пожаров. 2017.

11. Разработка универсального огнетушащего состава со смачивающими, пенообразующими и антипиренными свойствами / Н. Д. Гуцев, В. Ю. Гаравин, Н. В. Михайлова [и др.] // Труды СПбНИИЛХ. 2015. № 4. С. 64–78.

12. Роечко В. В., Халиков Р. В. Пожаровзрывобезопасность замкнутых пространств объектов газокomppressorных станций // Пожары и ЧС. 2020. № 1. С. 30–35.

13. Чистяков Т. И. Применение температурно-активированной воды при тушении электроустановок под напряжением: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. 277 с.

14. Кокшаров А. В., Марков В. Ф. Повышение устойчивости пены к обезвоживанию производными полисахаридов // Техносферная безопасность. 2014. № 3 (4). С. 31–34.

15. Применение аэрозольной технологии и эффективных нелетучих пламегасителей / О. П. Коробейничев, А. Г. Шмаков, А. А. Чернов [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. № 3. С. 92–101.

16. Оценка электропроводимости струй ТАВ с дозированием ингибирующей соли / Т. И. Чистяков, В. В. Роечко, Д. В. Тараканов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30, № 1. С. 64–74.

17. Кокшаров А. В., Филиппов А. В. Способ получения пены в первичных средствах пожаротушения // Техносферная безопасность. 2013. № 1. С. 26–29.

18. Аprobация новых огнетушащих химических составов: отчёт о НИР / Н. Д. Гуцев, Е. С. Арцыбашев, Н. В. Михайлова [и др.]. СПб.: СПбНИИЛХ, 2014. 254 с.

19. Исследование фторированных ПАВ для разработки плёнкообразующего огнетушащего состава / И. Ю. Иванов, О. Д. Навроцкий, Я. А. Кондакова [и др.] // Вестник УГЗ МЧС Беларуси. 2022. Т. 6. № 4. С. 415–427.

20. Власов Н. А., Ерёмин Т. Ю. Огнетушащая эффективность пены из концентрированных солевых растворов // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 12. С. 52–58.

21. Баланюк В. М. Определение эффективности тушения огнетушащими аэрозолями горючих жидкостей на открытом пространстве // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 5/10 (77). С. 4–11.

22. Повышение устойчивости противопожарных пен посредством добавок различной природы / В. Н. Любимов, А. И. Скушникова, Т. Г. Ермакова [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 4. С. 77–80.

23. Тайсумов Х. А., Тайсумов А. Х. Пенообразующий состав термостойкой пены для тушения пожаров с использованием морской воды // Евразийский союз учёных. 2015. № 4 (13). С. 56–58.

24. Тайсумов Х. А. Состав термостойкой пены для профилактики и тушения пожаров с использованием морской воды Красного моря // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 2. С. 49–52.

25. Condensed aerosol fire suppression [Электронный ресурс]. Wikipedia, 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Condensed_aerosol_fire_suppression (дата обращения: 15.04.2024).

26. You J. et al. Hydrogel use in burn therapy, thermal management, wastewater treatment and fire fighting: a review. Environmental Chemistry Letters, 2023, vol. 21, pp. 3273–3328.

27. Wang K. et al. Hydrogel-based fire extinguishing technology for lithium-ion battery fires: mechanisms, applications, and future perspectives. Journal of Polymer Research, 2025.

28. Li M. et al. Inhibitory effects of water mist containing alkali metal salts on hydrogen–natural gas diffusion flames. Process Safety and Environmental Protection. 2024, vol. 183.

29. Cao X. et al. Performance and fire suppression efficiency of potassium salt-modified dry water agents. Process Safety and Environmental Protection, 2024, vol. 185, pp. 602–613.

30. Zhao W. et al. Environmentally friendly fluorine-free fire extinguishing agent based on the synergistic effect of silicone, hydrocarbon surfactants and foam stabilizers. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024.

References

1. Ehfektivnaya tehnologiya tusheniya pozharov s pomoshch'yu aehrozolej rastvorov solej [Efficient Salt Solution Aerosol Fire Extinguishing Technology] / A. G. Shmakov, O. P. Korobejnichev, A. A. Chernov [et al.]. *Interehkspo Geo-Sibir'*, 2009, issue 3, pp. 92–101.
2. Roenko V. V., Halikov R. V., Kudrin A. N. Issledovanie ob`yomnogo pozharotusheniya temperaturno-aktivirovannoj vodoj pri vvedenii ingibiruyushchih solej [Research on volumetric fire extinguishing with temperature-activated water and the introduction of inhibitory salts]. *Pozhary i CHS*, 2022, issue 1, pp. 5–11.
3. Halikov R. V., Roenko V. V., Degtyarev S. V. Ehfektivnye koncentracii ingibiruyushchih solej v TAV, ispol'zuemoj dlya pozharotusheniya [Effective concentrations of inhibitory salts in the TAV used for fire extinguishing]. *Pozhary i CHS*, 2021, issue 1, pp. 40–47.
4. Halikov R. V., Halikov V. G. Modelirovanie pozharotusheniya mashinnogo zala gazokompressornoj stancii temperaturno-aktivirovannoj vodoj [Modeling of fire extinguishing in the engine room of a gas compressor station using temperature-activated water]. *Pozhary i CHS*, 2023, issue 1, pp. 70–77.
5. Ivchenko O. A., Pankin K. E. Tushenie lesnyh goryuchih materialov gidrogelyami na osnove gidroksida alyuminiya [Extinguishing forest combustible materials with aluminum hydroxide-based hydrogels]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, 2019, issue 1, pp. 76–84.
6. Stabilizaciya peny nizkoj kratnosti natrievoj sol'yu karboksimetilcellulozy [Stabilization of low-foaming systems with sodium carboxymethylcellulose] / A. V. Koksharov, B. F. Markov, D. Yu. Buchelnikov [et al.]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2014, vol. 23, issue 10, pp. 79–83.
7. Izuchenie vozmozhnosti polucheniya termovspenivayushchih OS na osnove natrievoj soli [Study of the feasibility of obtaining thermosetting extinguishing agents based on sodium salt.] / A. V. Koksharov, E. V. Gajnullina, M. L. Kondrat'eva [et al.]. *Tehnosfernaya bezopasnost'*, 2021, vol. 1 (30), pp. 101–106.
8. Vliyanie kristallogidratov solej v oagnetushashchem poroshkovom sostave na ego udel'nyu ehfektivnost' tusheniya LVZh [Influence of salt hydrates in fire-extinguishing powder composition on its specific efficiency in extinguishing HFLs] / I. V. Val'cifer, A. Sh. Shamsutdinov, V. A. Val'cifer [et al.]. *Tehnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti*, 2024, issue 5, pp. 5–11.
9. Levshenkov A. I., Levshenkova L. E. Gorenje smesej onievych solej 5,5'-azotetrazola s okislitelyami [Combustion of 5,5'-azotetrazole onium salt mixtures with oxidizers]. *Himicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2015, vol. 17, issue 3, pp. 331–338.
10. Grickov S. N. Vliyanie koncentracii i vida soli na ehfektivnost' pogloshcheniya torfom pri tushenii pozharov [The Influence of Salt Concentration and Type on the Effectiveness of Peat Absorption in Fire Suppression.] 2017.
11. Razrabotka universal'nogo oagnetushashchego sostava so smachivayushchimi, penoobrazuyushchimi i antipirennymi svojstvami [Development of a universal fire extinguishing agent with wetting, foaming, and flame-retardant properties] / N. D. Gucev, V. Yu. Garavin, N. V. Mihajlova [et al.]. *Trudy SPbNILH*, 2015, issue 4, pp. 64–78.
12. Roenko V. V., Halikov R. V. Pozharovzryvobezopasnost' zamknutyh prostranstv ob`ektov gazokompressornyh stancij [Fire and Explosion Safety of Confined Spaces at Gas Compressor Stations]. *Pozhary i CHS*, 2020, issue 1, pp. 30–35.
13. Chistyakov T. I. Primenenie temperaturno-aktivirovannoj vody pri tushenii ehlektrostanovok pod napryazheniem. Diss. kand. tekhn. nauk [Application of Temperature-Activated Water in Extinguishing Live Electrical Installations. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2020. 277 p.
14. Koksharov A. V., Markov V. F. Povyshenie ustojchivosti peny k obezvozhvaniyu proizvodnymi polisaharidov [Increasing the foam's resistance to dehydration by using polysaccharide derivatives]. *Tehnosfernaya bezopasnost'*, 2014, vol. 3 (4), pp. 31–34.
15. Korobejnichev O. P., Shmakov A. G. [et al.]. Primenenie aehrozol'noj tehnologii i ehfektivnyh neletuchih plamegasitelej [Application of aerosol technology and effective non-volatile flame retardants]. *Interehkspo Geo-Sibir'*, 2012, issue 3, pp. 92–101.
16. Ocenka ehlektroprovodimosti struj TAV s dozirovaniem ingibiruyushchej soli [Assessment of the electrical conductivity of surfactant jets with the dosing of an inhibiting salt] / T. I. Chistyakov, V. V. Roenko, D. V. Tarakanov [et al.]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2021, vol. 30, issue 1, pp. 64–74.
17. Koksharov A. V., Filippov A. V. Sposob polucheniya peny v pervichnyh sredstvakh pozharotusheniya [Method for generating foam in primary firefighting agents]. *Tehnosfernaya bezopasnost'*, 2013, issue 1, pp. 26–29.
18. Aprobaciya novyh oagnetushashchih himicheskikh sostavov: otchyot o NIR. [Testing of new extinguishing chemical compositions: R&D report.] / N. D. Gucev, E. S. Artsybashev, N. V. Mikhailova [et al.]. SPb.: SPbNILH, 2014. 254 p.
19. Issledovanie ftorirovannyh PAV dlya razrabotki plynkoobrazuyushchego oagnetusha-

shchego sostava [Investigation of fluorinated surfactants for the development of a film-forming extinguishing agent] / I. Yu. Ivanov, O. D. Navrockij, Ya. A. Kondakova [et al.]. Vestnik UGZ MCHS Belarusi, 2022, vol. 6, issue 4, pp. 415–427.

20. Vlasov N. A., Eryomina T. Yu. Ognetchashchaya ehffektivnost' peny iz koncentrirovannykh solevykh rastvorov [Fire extinguishing effectiveness of foam from concentrated salt solutions]. Pozharovzryvobezopasnost', 2017, vol. 26, issue 12, pp. 52–58.

21. Balanyuk V. M. Opredelenie ehffektivnosti tusheniya ognetchashchimi aehrozolyami goryuchih zhidkostej na otkrytom prostranstve [Determination of the extinguishing effectiveness of extinguishing aerosols on flammable liquids in open spaces]. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij, 2015, vol. 5/10(77), pp. 4–11.

22. Povyshenie ustojchivosti protivopozharnykh pen posredstvom dobavok razlichnoj prirody [Enhancement of fire-fighting foam stability through additives of various natures] / V. N. Lyubimov, A. I. Skushnikova, T. G. Ermakova [et al.]. Pozharovzryvobezopasnost', 2014, vol. 23, issue 4, pp. 77–80.

23. Tajsumov H. A., Tajsumov A. H. Pennoobrazuyushchij sostav termostojkoj peny dlya tusheniya pozharov s ispol'zovaniem morskoy vody [Foaming composition for heat-resistant foam for firefighting using seawater]. Evrazijskij soyuz uchonyh, 2015, vol. 4 (13), pp. 56–58.

24. Tajsumov H. A. Sostav termostojkoj peny dlya profilaktiki i tusheniya pozharov s ispol'zovaniem morskoy vody Krasnogo morya [Composition of heat-resistant foam for the prevention and extinguishing of fires using Red Sea seawater]. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij, 2018, issue 2, pp. 49–52.

25. Condensed aerosol fire suppression [Электронный ресурс]. Wikipedia, 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Condensed_aerosol_fire_suppression (дата обращения: 15.04.2024).

26. You J. et al. Hydrogel use in burn therapy, thermal management, wastewater treatment and fire fighting: a review. Environmental Chemistry Letters, 2023, vol. 21, pp. 3273–3328.

27. Wang K. et al. Hydrogel-based fire extinguishing technology for lithium-ion battery fires: mechanisms, applications, and future perspectives. Journal of Polymer Research, 2025.

28. Li M. et al. Inhibitory effects of water mist containing alkali metal salts on hydrogen–natural gas diffusion flames. Process Safety and Environmental Protection. 2024, vol. 183.

29. Cao X. et al. Performance and fire suppression efficiency of potassium salt-modified dry water agents. Process Safety and Environmental Protection, 2024, vol. 185, pp. 602–613.

30. Zhao W. et al. Environmentally friendly fluorine-free fire extinguishing agent based on the synergistic effect of silicone, hydrocarbon surfactants and foam stabilizers. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024.

Серов Владимир Вячеславович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

адъюнкт адъюнктуры

Главное управление МЧС России по Ивановской области,

Российская Федерация, г. Иваново

заместитель начальника управления – начальник отдела нормативно-технического управления надзорной деятельности и профилактической работы

E-mail: wws37@rambler.ru

Serov Vladimir Vyacheslavovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

adjunct of post-graduate courses

The Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Ivanovo region,

Russian Federation, Ivanovo

Deputy Head of the Department – Head of the Department of Regulatory and Technical Management of Supervision and preventive work

E-mail: wws37@rambler.ru

Никифоров Александр Леонидович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

доктор технических наук, старший научный сотрудник

E-mail: anikiforoff@list.ru

Nikiforov Alexander Leonidovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

Doctor of Technical Sciences, senior researcher

E-mail: anikiforoff@list.ru

Новожилова Ксения Александровна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

Старший преподаватель

E-mail: novozhilovax@yandex.ru

Novozhilova Kseniya Aleksandrovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

senior lecturer

E-mail: novozhilovax@yandex.ru