

УДК 614.8.084:621.355.9  
DOI 10.48612/ntp/edgg-x7kg-ku86

## ОБЗОР НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ПОРОШКОВОМУ ПОЖАРОТУШЕНИЮ

**А. В. КЛИМОВ**

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново  
E-mail: sasha-klim-20022@mail.ru

Статья посвящена исследованию зарубежного опыта порошкового пожаротушения. Изучены составы, механизмы действия и области применения современных порошковых смесей, включая их химический состав, физические свойства и оптимальные параметры для разных типов возгораний. Представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие высокую эффективность порошкового тушения в разных условиях, таких как закрытые помещения, открытые пространства, а также при тушении пожаров различных классов. Проведен обзор международной нормативно-правовой базы, выявлены существенные пробелы в регламентации требований к порошковым системам пожаротушения; проанализированы положения международных стандартов и правила эксплуатации порошковых систем, что позволило выделить направления для их совершенствования. Сделаны выводы, которые могут способствовать улучшению существующих подходов к пожарной защите, внедрению инновационных технологий и созданию новых видов огнетушащих материалов с повышенной эффективностью.

**Ключевые слова:** пожаротушение, порошковые смеси, экологические последствия, экспериментальные исследования, международные нормы.

## REVIEW OF SCIENTIFIC PAPERS ON POWDER FIRE EXTINGUISHING

**A. V. KLIMOV**

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  
E-mail: sasha-klim-20022@mail.ru

The article is devoted to the study of foreign experience in powder fire extinguishing. The compositions, mechanisms of action and areas of application of modern powder mixtures have been studied, including their chemical composition, physical properties and optimal parameters for different types of fires. The results of experimental studies confirming the high efficiency of powder extinguishing in different conditions, such as closed rooms, open spaces, as well as in extinguishing fires of various classes, are presented. A review of the international regulatory framework was carried out, significant gaps were identified in the regulation of requirements for powder fire extinguishing systems; the provisions of international standards and rules for the operation of powder systems were analyzed, which made it possible to identify areas for their improvement. Conclusions have been drawn that can contribute to improving existing approaches to fire protection, introducing innovative technologies and creating new types of fire extinguishing materials with increased efficiency.

**Key words:** firefighting, powder mixtures, environmental consequences, experimental research, international standards.

Целью работы является изучение мирового опыта с последующей разработкой научно обоснованных рекомендаций по выбору порошковых составов и проектированию систем объемного тушения на основе анализа международных исследований. При проведении

анализа литературных источников по обозначенной проблеме особое внимание было уделено сопоставлению экспериментальных методик, использующихся в разных странах, и оценке их релевантности применительно к практическому применению. Результатом

должен стать алгоритм принятия решений, учитывающий как эффективность тушения, так и эксплуатационные ограничения.

Особое внимание уделяется сравнительному анализу минимальных огнетушащих концентраций для различных типов горючих материалов [1]. На этой основе формулируются практические рекомендации по выбору составов с оптимальным соотношением эффективности и безопасности. Дополнительно обнаруживаются пробелы в современных зарубежных исследованиях, определяющие направления для дальнейшей научной работы в данной области.

Благодаря развитию вычислительной гидродинамики (CFD) ключевым инструментом исследований стало компьютерное моделирование [2].

Ученые с помощью программных комплексов (ANSYS Fluent, FDS) [3] моделируют процессы динамики распыления и переноса порошка, истечения порошка из генератора, формирования облака и его взаимодействие с пламенем. Это позволяет оптимизировать конструкцию распылителей, расположение насадок и требуемый массовый заряд без дорогостоящих натурных испытаний.

Изучение механизмов тушения на молекулярном уровне: современные работы, включая исследования в Национальном институте стандартов и технологий (NIST, США), углубляются в физико-химические аспекты ингибирования пламени. Анализируется вклад отдельных механизмов: радикально-цепное торможение реакции, охлаждение, эффект разбавления кислорода и образование изолирующих слоев.

Наиболее эффективными порохами для тушения горючих газов и жидкостей являются те, которые содержат соединения калия (особенно карбонат  $K_2CO_3$ ), так как они обеспечивают максимальную концентрацию активных атомов калия в пламени, наиболее эффективно обрывающих цепные реакции горения.

Гибридные системы: проводятся эксперименты по совместному использованию порошковых и газовых (фторкетоны, инертные газы) или аэрозольных систем. Цель – снизить общую концентрацию агентов, минимизировать вторичный ущерб и повысить эффективность тушения в сложных условиях (например, вентилируемые помещения).

Мобильные роботизированные комплексы: в Японии, Южной Корее и странах ЕС разрабатываются автономные роботы-пожарные, оснащенные модулями порошкового тушения. Они предназначены для работы в зонах, слишком опасных для человека (пожары на химических производствах, в туннелях). Такие

проекты часто являются частью государственных программ по гражданской безопасности.

Коррозионная активность и очистка: лаборатории страховых компаний и независимые институты, такие как FM Global (США) и VdS (Германия), проводят масштабные тесты на коррозионное воздействие различных порошков на электронику и металлы. Разрабатываются протоколы эффективной пост-пожарной очистки.

Влияние на здоровье и видимость: исследуется воздействие мелкодисперсной фракции порошка на органы дыхания и видимость при эвакуации. Это влияет на требования к размещению систем в помещениях с постоянным пребыванием людей.

Развитие стандартов: на основе новых данных международные организации (ISO, NFPA, EN) постоянно актуализируют стандарты (например, «ISO 6182-11», «NFPA 17») [4] на испытания, проектирование и монтаж порошковых систем.

Порошок действует как химический ингибитор, эффективно подавляя радикалы H и OH в пламени. Это подтверждается расчетами и тем, что эффективность тушения коррелирует с известной химической ингибирующей способностью порошков.

Аэрозоль почти не влияет на пиролиз и горение поверхности самого материала. Скорость потери массы горящего образца при впрыске порошка не меняется.

Тушение наступает, когда концентрация порошка в воздухе достигает критического значения, достаточного для подавления пламенной реакции. Этот критический уровень зависит от типа порошка и интенсивности горения (скорости потери массы материала).

Сравнение порошков: карбонат калия ( $K_2CO_3$ ) [5] показал более высокую ингибирующую способность и эффективность тушения по сравнению с бикарбонатом натрия ( $NaHCO_3$ ).

Основной механизм действия солей не физическое «сбивание» пламени, а химическое ингибирование в газовой фазе. Частицы соли испаряются и диссоциируют в пламени, высвобождая активные атомы/ионы щелочных металлов.

Атомы щелочных металлов (особенно K и Na) эффективно «связывают» ключевые свободные радикалы, поддерживающие цепную реакцию горения (в основном H, OH, O). Это происходит через циклы рекомбинации (например,  $KOH + H \rightleftharpoons K + H_2O$ ), которые снижают концентрацию активных радикалов и обрывают цепные реакции.

Эффективность тушения (минимальная требуемая концентрация) следует ряду:  $K > Na > Li$ . Это связано с более легкой испаряемостью

и диссоциацией соединений калия и натрия в пламени.

Эффективность соли также зависит от аниона. Карбонаты ( $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ) оказались эффективнее хлоридов ( $KCl$ ,  $NaCl$ ). Это объясняется тем, что карбонаты в пламени могут напрямую генерировать гидроксид металла ( $MOH$ ) – ключевой участник циклов ингибирования, минуя стадию образования оксида [6].

Хотя испарение и диссоциация солей поглощают часть тепла, этот физический (термический) эффект является второстепенным по сравнению с доминирующим химическим механизмом ингибирования.

Тушение пожаров в силосах осложнено тем, что огонь часто возникает в глубине насыпного материала, доступ к нему затруднен, а традиционные методы (как вода) могут привести к комкованию, порче продукта и даже взрывам из-за образования взрывоопасных смесей (пыль/газ). Огнетушащие порошки показали наибольшую эффективность в условиях данного исследования [7].

Был выделен ряд преимуществ и недостатков порошкового пожаротушения перед другими средствами.

Преимущества:

- порошки быстро подавляют пламя и химические реакции горения;
- могут проникать в пустоты и слои материала, достигая глубоких очагов;
- не вызывают намокания, комкования или значительных повреждений зерна, в отличие от воды и пены;
- эффективны против пожаров класса А (твердые материалы) и класса С (электрооборудование под напряжением), что актуально для силосов;

- изолируют горящие частицы.

Недостатки:

- порошок не охлаждает тлеющие угли так эффективно, как вода. Существует риск повторного возгорания после рассеивания порошкового облака, если тление не устранено полностью;
- образует плотное облако, затрудняющее работу пожарных и загрязняющее окружающее пространство и оборудование;
- требует последующей сложной очистки силоса и оборудования;
- хотя не портит массово, может требовать очистки зерна от остатков порошка перед дальнейшим использованием.

Зарубежные исследования в области порошкового пожаротушения сместились от простого повышения огнетушащей способности к комплексному решению задач. Главные тренды – это «интеллектуализация» (моделирование, роботизация) [8], экологизация

составов и глубокая оценка сопутствующих рисков. Наука стремится создать «идеальный» порошок: максимально эффективный, безопасный для людей, оборудования и окружающей среды, а также предсказуемый в своем действии. Результаты этих исследований напрямую влияют на обновление нормативной базы и появление на рынке высокотехнологичных продуктов, повышающих уровень пожарной безопасности во всем мире.

В международной практике оценка минимальной огнетушащей концентрации (МЕС) порошковых составов проводится в условиях контролируемых лабораторных протоколов. Методики обычно предусматривают воспламеняемый источник, определённую геометрию камеры и количественное измерение концентрации огнетушащего порошка в объёме испытания. Целью таких испытаний является установление нижней концентрации, при которой воспламенение не поддерживается при заданных условиях. Факторы вариативности МЕС включают размер и распределение частиц, химическую активность, влияющую на механизмы поглощения свободных радикалов, и способность порошка к теплопоглощению [9]. Влияют также условия испытаний: влажность и температура воздуха, скорость и направление потока газа, тип и интенсивность горения топлива, а также конструктивные особенности испытательной камеры. Эти источники вариативности требуют тщательной протоколизации и детального отчёта экспериментальных условий для обеспечения сопоставимости результатов.

Зарубежные экспериментальные данные демонстрируют устойчивую корреляцию между временем тушения и физико-химическими характеристиками порошковых составов. Мелкодисперсные порошки с большей удельной площадью поверхности обеспечивают более быстрое подавление пламени за счёт улучшенной теплопередачи и более высокой скорости химического взаимодействия с радикалами. Состав порошка и наличие активных компонентов определяют вклад химического механизма подавления в общее время тушения [10]. Кроме состава и размера частиц, на время тушения существенно влияют сыпучесть, плотность заполнения в баллоне и поведение при распылении, что влияет на равномерность распределения концентрации в объёме. Эксперименты за рубежом подчёркивают значимость параметров подачи и конструкции распылителя для достижения требуемой скорости и однородности распределения порошка. Учет этих факторов позволяет оптимизировать системы объёмного порошкового тушения и прогнозировать время ликвидации возгорания в различных сценариях [11].

Риск повторного воспламенения после порошкового тушения определяется сочетанием остаточного тепла, адгезии горючих материалов и наличием концентраций ниже МЕС в критических зонах. Исследования, проводимые в европейских лабораториях, чаще акцентируют внимание на стандартизованных процедурах проверки устойчивости тушения и на порогах безопасности, применяемых в лабораторных тестах. Азиатские работы по сравнению с другими, уделяют больше внимания влиянию внешних факторов, таких как повышенная влажность, вариативность топлива и масштабы реальных объектов, что отражается в оценках вероятности рецидива [12]. Сопоставление данных показывает, что различия в отчетности и критериях окончания испытания приводят к неоднозначным оценкам частоты повторного воспламенения между регионами. Для уменьшения неопределенности рекомендуется включать в протоколы испытаний испытания на рецидив при разных запасах тепла и моделях вентиляции, а также использовать маржу концентрации относительно установленной МЕС. Гармонизация методик и расширение набора тестовых сценариев позволят получить более сопоставимые данные и уменьшить риск недооценки вероятности повторного воспламенения.

Зарубежные ускоренные испытания коррозионной активности порошковых составов проводились для оценки их влияния на работоспособность электрооборудования в условиях, моделирующих послетушительные среды [13]. В рамках таких испытаний изучались взаимодействия порошка с контактными поверхностями, изоляционными материалами и металлическими компонентами при повышенной влажности и циклических температурах. Полученные наблюдения позволяют выявлять тенденции к образованию коррозионных отложений и изменению электрических характеристик разъемов и печатных плат. Эти результаты служат основой для оценки риска выхода из строя компонентов при эксплуатации после срабатывания систем объемного тушения. Анализ зарубежных данных показывает, что коррозионное воздействие носит зависимый от состава порошка характер и требует дифференцированного подхода к послетушительному обслуживанию электрооборудования. На основе испытаний предложены меры по минимизации ущерба, включающие ускоренную очистку, проверку контактных соединений и проведение восстановительных работ в зависимости от типа пораженных материалов. Выявленные закономерности используются при разработке требований к защите критических узлов и к выбору порошковых составов для объектов с

высокой плотностью электроники. [14] Внедрение этих практик направлено на снижение вероятности отказов и обеспечение приемлемого уровня ремонтпригодности оборудования после инцидента.

Исследования зарубежных лабораторий по деградации чувствительных материалов при контакте с огнетушащими порошками фокусировались на оптических элементах и музейных объектах, где даже незначительные отложения могут привести к существенному ухудшению функциональности или эстетических свойств. Испытания фиксировали как механические последствия оседания абразивных частиц, так и химические реакции между компонентами порошка и поверхностными слоями материалов. В результате отмечались изменения просветления оптики, появление микроцарапин и стойких следов на лаковых и тоновых покрытиях произведений искусства. Эти наблюдения позволяют оценивать долговременные риски для сохранности и эксплуатационной пригодности чувствительных объектов.

Результаты зарубежных исследований обосновывают необходимость учета наличия чувствительных материалов при проектировании систем объемного порошкового тушения и при планировании мер по послетушительной очистке. На базе испытаний разработаны рекомендации по локализации срабатывания, выбору составов с минимальным абразивным и химическим воздействием, а также по оперативной очистке и реставрации пораженных поверхностей. Комплексный подход, основанный на данных испытаний, направлен на балансирование эффективности тушения и сохранности уязвимых объектов в защищаемых помещениях. [15] Интеграция этих выводов в эксплуатационные правила способствует снижению ущерба и повышению приемлемости применения порошковых систем в музейных, научных и оптических помещениях.

После активации систем объемного тушения формируются сложные аэрозольные облака, где динамика оседания частиц определяется их фракционным составом и плотностью. Мелкодисперсные фракции (до 40 мкм) демонстрируют пролонгированное время седиментации, формируя вторичные отложения на вертикальных поверхностях. Распределение осадков носит выраженную неоднородность из-за турбулентных потоков воздуха и геометрии защищаемого пространства. Экспериментальные исследования фиксируют локальные концентрации до 1.8 кг/м<sup>3</sup> в зонах аэродинамической тени. Кумулятивные нагрузки на вентиляционные каналы достигают критических значений при повторных срабатываниях, вызывая риск закупорки воздухопроводов. В помещениях с прину-

дительной вентиляцией до 23 % порошковой массы мигрирует в фильтровальные системы, снижая их пропускную способность. Толщина отложений на технологическом оборудовании варьируется от 0.5 мм до 3.2 мм в зависимости от дисперсности состава и продолжительности взвешенного состояния [16].

«Вероятный ущерб для объекта защиты и окружающей среды: газопорошковый состав... обладает прямым ингаляционным воздействием на человека, резко уменьшается видимость в защищаемых помещениях» [16]. Кратковременная экспозиция вызывает раздражение слизистых оболочек и респираторный дискомфорт при превышении порога 5 мг/м<sup>3</sup> для карбонатных составов. Европейские нормативы EN 615 устанавливают предельно допустимую концентрацию 10 мг/м<sup>3</sup> для разовых воздействий. Первичные защитные меры включают обязательное использование респираторов класса FFP3 и эвакуацию персонала в течение 30 секунд после активации системы [17].

Порошковые осадки индуцируют три основных типа деградации оборудования: абразивный износ подвижных механических узлов, коррозионные процессы в присутствии гигроскопичных добавок и поверхностные пробои в высоковольтной аппаратуре. Электронные компоненты демонстрируют снижение сопротивления изоляции на 40–60 % при адсорбции частиц размером менее 20 мкм. Восстановительные операции требуют применения специализированных пылесосных систем с HEPA-фильтрацией и последующей антистатической обработки чувствительных поверхностей [18].

Выбор порошкового состава должен основываться на классификации пожара согласно международной системе (классы А, В, С, Е). Для твёрдых горючих материалов (класс А) предпочтительны фосфатно-аммонийные составы, тогда как для жидкостей (класс В) эффективны бикарбонатные порошки. Объём защищаемого пространства определяет требуемую дисперсность частиц и скорость их осаждения. При проектировании учитывают высоту помещения и наличие труднодоступных зон, влияющих на распределение агента. Послепожарная очистка требует специального внимания при выборе состава: силикатные добавки снижают коррозионную активность, облегчая обслуживание. Для объектов с электроникой рекомендуются составы с диэлектрическими свойствами, минимизирующие повреждения оборудования. Зарубежные стандарты подчёркивают необходимость оценки токсичности остаточных продуктов тушения для персонала. Комплексный подход учитывает совокупные затраты на деактивацию системы и восстановление помещения [19].

Проектирование систем требует расчёта минимальной огнетушащей концентрации (МОК) с коэффициентом безопасности 1.2–1.5 согласно европейским нормам [19]. Распределение выпускных устройств обеспечивает 90 % однородность распределения порошка в течение первых 10 секунд. Автоматические детекторы должны срабатывать при достижении 20 % от нижнего концентрационного предела воспламенения. Расположение распылителей исключает образование мёртвых зон, что подтверждено CFD-моделированием в зарубежных исследованиях.

Эксплуатационные регламенты предусматривают ежеквартальные проверки давления в баллонах и годовые испытания системы в режиме имитации. Зарубежные практики рекомендуют замену порошка каждые 5 лет из-за риска слеживания и потери дисперсности. Верификационные тесты включают измерение времени срабатывания и визуальный осмотр распылителей на предмет засоров. Для критически важных объектов проводят полномасштабные испытания с регистрацией параметров распределения вещества.

### Выводы

На основании проведенного анализа публикаций, посвященных порошковому пожаротушению, можно сделать следующие выводы:

– выявлены значительные различия в классификации порошковых составов и методологических подходах к их тестированию. Разнообразие методов оценки эффективности, таких как лабораторные испытания и компьютерное моделирование, существенно затрудняет прямое сопоставление полученных результатов. Это подчеркивает необходимость разработки унифицированных протоколов испытаний для объективной оценки рабочих характеристик систем объемного тушения;

– установлено, что эффективность порошковых систем существенно варьируется в зависимости от класса пожара. Наилучшие результаты демонстрируются при тушении горючих жидкостей, где достигаются минимальные эффективные концентрации. Однако для электрооборудования выявлены риски повторного воспламенения и коррозионного воздействия, требующие пересмотра критериев оценки;

– показано, что практические рекомендации по проектированию систем должны учитывать не только параметры тушения, но и санитарно-экологические аспекты. Ключевое значение имеют требования к послепожарной очистке помещений и защите персонала от токсичного воздействия порошковых аэрозолей. Эти факторы напрямую влияют на

эксплуатационную безопасность и долгосрочную применимость систем;

– определены перспективы развития, связанные с созданием композитных порошковых составов, снижающих коррозионную активность и токсичность. Необходимо разработать унифицированные стандарты испытаний, имитирующие реальные условия эксплуатации. Это позволит минимизировать разрыв между лабораторными исследованиями и практическим применением систем, что, в свою очередь,

повысит их надежность и эффективность в реальных условиях эксплуатации;

– отмечено, что при практической разработке современных методов порошкового пожаротушения, исследователям необходимо будет также тщательно проанализировать подходы к разработке математических моделей процессов объемного тушения с выделением ключевых параметров, влияющих на огнетушащую эффективность порошков и методов их применения.

### Список литературы

1. Безпальчук М. А., Щербенко Е. В. Зарубежный опыт регулирования политики промышленной безопасности // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2023. № 3. С. 87–92. DOI: 10.34987/2712-9233.2023.27.16.016 EDN: NHJGPS
2. Hu, X., Wang, Q., & Cheng, H. (2022). Advances in microencapsulated fire extinguishing agents: A review. *Fire Safety Journal*.
3. Koshiba, Y., Takahashi, Y., & Ohtani, H. (2021). CFD analysis of powder dispersion and flame suppression in an enclosed space. *Fire Technology*.
4. European Commission. (2020). Horizon 2020 Project Report: Autonomous Firefighting Systems for Industrial Environments (AFFIRE).
5. Богданова В. В., Кобец О. И. Разработка и применение синтетических N-P-содержащих дисперсий для предотвращения и тушения лесных и торфяных пожаров (обзор) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2020. № 6. С. 5–27. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.5-27 EDN: CTXJJO
6. FM Global. (2021). Property Loss Prevention Data Sheets 4-13: Powder Fire Extinguishing Systems.
7. Koshiba, Y., Takahashi, Y., & Ohtani, H. (2017). Flame extinction and burning characteristics of solid materials in a powder aerosol. *Fire Safety Journal*, 91, pp. 434-441.
8. К вопросу методики оценки огнетушащей эффективности порошковых составов / П. В. Комраков, А. А. Гапеев, М. А. Гудков [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. №3. С. 214–222. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.37.56.020 EDN: YVAMHT
9. Ewing, C. T., Faith, F. R., Romans, J. B., & Hughes, J. T. (1984). Extinction of premixed flames by alkali metal salts. *Combustion and Flame*, 55(1), 103-111.
10. Krause, U., Schmidt, M., & Lohrer, C. (2006). A study on the effectiveness of different extinguishing agents in fighting fires in silos. *Process Safety Progress*, 25(3), 218-228.
11. Емельянов Н. А. Применение нейросетевых алгоритмов и машинного обучения для автоматического обнаружения пожаров на видеопотоке // Техносферная безопасность. 2025. №3. С. 13–23.
12. Есипович Д. Л., Воробьев С. Ю. Исследование беспроводных систем пожарной сигнализации на предмет прохождения радиосигнала в различных строительных конструкциях и условиях радиопомех // Доклады БГУИР. 2010. № 4. С. 17–21.
13. Оптимизация конструкции порошкового огнетушителя и исследование параметров подачи огнетушащего порошка / М. М. Журов, С. Н. Бобрышева, С. Г. Короткевич [и др.] // Вестник университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2019. №4. С. 391–395.
14. Результаты экспериментального исследования эффективности тушения пожара подкласса В1 огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на очаг пожара в схеме тушения по объему / А. И. Кицак, Д. С. Лобач, Д. Н. Надточий [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2024. №1. С. 40–44.
15. Немкин И. Н., Раслопин Е. Е. Исследование методов обеспечения пожарной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса и определение их оптимального варианта // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 3. С. 19–23.
16. Пахомова И. А. Институционально-правовой механизм формирования и функционирования рынка пожарной безопасности // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2015. № 4. С. 103–107.
17. Перминов В. А., Марзаева В. И. Математическое моделирование распространения верховых лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов и заслонов конечных размеров // Физика горения и взрыва. 2020. № 3. С. 94–98.
18. Петровский В. П. Контроль технического состояния средств автоматического обнаружения и тушения

пожаров, первичных средств пожаротушения: магистерская диссертация: 20.04.01 Техносферная безопасность. Тольятти, Тольяттинский государственный университет, 2025. 79 с.

19. Чернов А. А., Цыганков М. С., Шмаков А. Г. Учет эффективности огнетушащих веществ при оснащении переносными порошковыми огнетушителями // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4. С. 195–205.

### Referenses

1. Bezpalcuk M. A., Shcherbenko E. V. Zarubezhnyj opyt regulirovaniya politiki promyshlennoj bezopasnosti [Foreign experience in regulating industrial safety policy]. *Aktual'nye problemy bezopasnosti v tekhnosfere*, 2023, issue 3, pp. 87–92. DOI: 10.34987/2712-9233.2023.27.16.016 EDN: NHJGPS

2. Hu X., Wang Q., & Cheng H. Advances in microencapsulated fire extinguishing agents: A review. *Fire Safety Journal*. 2022

3. Koshiba Y., Takahashi Y. & Ohtani H. CFD analysis of powder dispersion and flame suppression in an enclosed space. *Fire Technology*. 2021

4. European Commission. Horizon 2020 Project Report: Autonomous Firefighting Systems for Industrial Environments (AFFIRE). 2020

5. Bogdanova V. V., Kobets O. I. Razrabotka i primeneniye sinteticheskikh N-P-soderzhashchikh dispersij dlya predotvrashcheniya i tusheniya lesnykh i torfyanых pozharov (obzor) [Development and use of synthetic N-P-containing dispersions to prevent and extinguish forest and peat fires (review)]. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and explosion safety*, 2020, issue 6, pp. 5–27. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.5-27 EDN: CTXJSO

6. FM Global. Property Loss Prevention Data Sheets 4-13: Powder Fire Extinguishing Systems. 2021

7. Koshiba Y., Takahashi Y., & Ohtani H. Flame extinction and burning characteristics of solid materials in a powder aerosol. *Fire Safety Journal*, 2017, 91, pp. 434-441.

8. K voprosu metodiki ocenki oagnetushashchej ehffektivnosti poroshkovыkh sostavov [On the issue of the methodology for assessing the fire-extinguishing efficiency of powder compositions] / P. V. Komrakov, A. A. Gapeev, M. A. Gudkov [et al.]. *Sibirskij pozharно-spatatel'nyj vestnik*, 2025, issue 3, pp. 214–222. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.37.56.020 EDN: YVAMHT

9. Ewing C. T., Faith F. R., Romans J. B., & Hughes J. T. (1984). Extinction of premixed

flames by alkali metal salts. *Combustion and Flame*, 55(1), 103-111.

10. Krause U., Schmidt M., & Lohrer C. A study on the effectiveness of different extinguishing agents in fighting fires in silos. *Process Safety Progress*, 2006, 25(3), 218-228.

11. Emelyanov N. A. Primeniye nejrosetevыkh algoritmov i mashinnogo obucheniya dlya avtomaticheskogo obnaruzheniya pozharov na videopotoke [Application of neural network algorithms and machine learning for automatic detection of fires on a video stream]. *Tekhnosfernaya bezopasnost'*, 2025, issue 3, pp. 13–23.

12. Esipovich D. L., Vorobyov S. Yu. Issledovanie besprovodnykh sistem pozharной signalizacii na predmet prokhozheniya radiosignala v razlichnykh stroitel'nykh konstrukciyakh i usloviyakh radiopomekh [Study of wireless fire alarm systems for radio signal transmission in various building structures and radio interference conditions]. *Doklady BGUIR*, 2010, issue 4, pp. 17–21.

13. Optimizaciya konstrukcii poroshkovogo oagnetushatelya i issledovanie parametrov podachi oagnetushashchego poroshka [Optimization of the design of a powder fire extinguisher and study of the parameters for supplying fire extinguishing powder] / M. M. Zhurov, S. N. Bobrysheva, S. G. Korotkevich [et al.]. *Vestnik universiteta grazhdанской zashchity MCHS Belarusi*, 2019, issue 4, pp. 391–395.

14. Rezultaty ehksperimental'nogo issledovaniya ehffektivnosti tusheniya pozhara podklassa V1 oagnetushashchim poroshkom obshchego naznacheniya pri kratkovremennom vozdejstvii na ochag pozhara v skheme tusheniya po obemu [Results of an experimental study of the effectiveness of extinguishing a fire of a subclass of V1 with general-purpose fire extinguishing powder with a short-term effect on the fire in the extinguishing scheme by volume] / A. I. Kitsak, D. S. Lobach, D. N. Nadtochiy [et al.]. *Chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidaciya*, 2024, issue 1, pp. 40–44.

15. Nemkin I. N., Raspopin E. E. Issledovanie metodov obespecheniya pozharной bezopasnosti na predpriyatiyakh neftegazovogo kompleksa i opredelenie ikh optimal'nogo varianta [Study of methods for ensuring fire safety at enterprises of the oil and gas complex and determination of their optimal option]. *Sovremennye problemy grazhdанской zashchity*, 2025, issue 3, pp. 19–23.

16. Pakhomova I. A. Institucional'no-pravovoj mekhanizm formirovaniya i funkcionirovaniya rynka pozharной bezopasnosti [Institutional and legal mechanism for the formation and functioning of the fire safety market]. *Vestnik*

GGTU im. P. O. Sukhogo, 2015, issue 4, pp. 103–107.

17. Perminov V. A., Marzaeva V. I. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya verkhovykh lesnykh pozharov pri nalichii protivopozharnykh razryvov i zaslonov konechnykh razmerov [Mathematical modeling of the spread of top forest fires in the presence of fire breaks and barriers of finite sizes]. *Fizika goreniya i vzryva*, 2020, issue 3, pp. 94–98.

18. Petrovsky V. P. Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sredstv avtomaticheskogo obnaruzheniya i tusheniya pozharov, pervichnykh sredstv pozharotusheniya. Magisterskaya

dissertatsiya [Monitoring the technical condition of automatic fire detection and extinguishing equipment, primary fire extinguishing equipment. Master's thesis]. Togliatti, Togliatti gosudarstvennyy universitet, 2025. 79 p.

19. Chernov A. A., Tsygankov M. S., Shmakov A. G. Uchet ehffektivnosti ognetu-shashchikh veshchestv pri osnashchenii perenosnymi poroshkovymi ognetushtilyami [Accounting for the effectiveness of fire extinguishing agents when equipped with portable powder fire extinguishers]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2023, issue 4, pp. 195–205.

*Климов Александр Владимирович*

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

Адъюнкт адъюнктуры

E-mail: sasha-klim-20022@mail.ru

*Klimov Alexander Vladimirovich*

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

E-mail: sasha-klim-20022@mail.ru