

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Фомичев Л. Ю., Копысов И. В., Сухарский С. П., Челекова Е. Ю.

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ ВОЗДУХОВОДОВ СИСТЕМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ4

Терентьев Д. И., Сатюков Р. С.

АНАЛИЗ СВЕДЕНИЙ О ПОЖАРАХ, ВЫЗВАННЫХ САМОВОЗГОРАНИЕМ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ20

Сысоева Т. П., Кухарев А. А., Мусиенко Т. В., Агеев П. М.

СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОГНЕЗАЩИТНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ ПО КОЛИЧЕСТВУ ГОРЮЧИХ ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ, ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ПРИ НАГРЕВЕ28

Аносова Е. Б., Блохин А. А., Ляшенко С. М., Михайлова С. М.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОГНЕЗАЩИТНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ38

Беззапонная О. В., Козионов А. В., Вакарин Е. В., Магомедов О. Г.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА51

Баранчикова Н. И., Кульков В. Н., Корельштейн Л. Б., Михайловский Е. А.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗАЩИТНЫХ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС64

Хусноярова Р. И., Абдрахманова К. Н.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙ НА ОПАСНОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ОБЪЕКТЕ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ77

Савин М. А., Егоров Г. И., Опарин И. Д., Жученко С. А.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЖАРНОЙ НАСОСНО-РУКАВНОЙ СИСТЕМЫ СОВСАСЫВАЮЩЕЙ ЛИНИЕЙ ДЛЯ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ88

Турков В. А., Елфимова М. В., Монахов Д. И., Зыбин А. О.

ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЯ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ С ДВУМЯ КАТУШКАМИ И ПРИВОДОМ ОТ КАРДАННОЙ ПЕРЕДАЧИ В ПОЖАРНУЮ АВТОЦИСТЕРНУ111

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Гарелина С. А.

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ И МОНИТОРИНГА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ126

Скрынников А. Ю., Треушков И. В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МОБИЛЬНОГО СРЕДСТВА ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ138

Тухтаров А. А., Рыбаков А. В.

О ПОКАЗАТЕЛЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ СЕЛЕЙ150

Крецу Р. М., Рыбаков А. В.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО НАБОРА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ
РИСКОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМ-
ПЛЕКСА160

CONTENTS

FIRE SAFETY

Leonid Yu. Fomichev, Ilya V. Kopysov, Stanislav P. Sukharsky, Evgeniya Yu. Chelekova

ASSESSMENT OF THE FIRE RESISTANCE LIMIT OF AIR DUCTS IN SMOKE CONTROL VENTILATION
SYSTEMS4

Dmitriy I. Terentiev, Roman S. Satukov

ANALYSIS OF DATA ON FIRES CAUSED BY SPONTANEOUS COMBUSTION OF LITHIUM-ION
BATTERIES20

Tatiana P. Sysoeva, Alexander A. Kukharev, Tamara V. Musienko, Pavel M. Ageev

METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF FIRE PROTECTION TREATMENT OF WOOD
BASED ON THE AMOUNT OF FLAMMABLE VOLATILE SUBSTANCES RELEASED DURING
HEATING28

Evgeniya B. Anosova, Andrey A. Blokhin, Sergey M. Lyashenko, Sofya M. Mikhailova

THE INFLUENCE OF PAINT AND VANISH COATING CHARACTERISTICS ON THEIR FLAME-
RETARDANT AND OPERATIONAL PROPERTIES AND SCOPE OF APPLICATION38

Oksana V. Bezzaponnaya, Alexey V. Kozionov, Evgeniy V. Vakarin, Omar G. Magomedov

ON THE QUESTION OF ASSESSING FIRE HAZARD INDICATORS OF POLYMERIC MATERIALS
BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS51

Nadezhda I. Baranchikova, Victor N. Kulkov, Leonid B. Korelstein, Egor A. Mikhailovsky

HYDRAULIC CALCULATION OF PROTECTIVE WATER CURTAINS64

Rasulya I. Khusnoyarova, Karina N. Abdrakhmanova

ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL CAUSES OF ACCIDENTS AT A HAZARDOUS PRODUCTION
FACILITY FOR STORAGE AND PROCESSING OF PLANT RAW MATERIALS77

Mikhail A. Savin, Grigory I. Egorov, Ivan D. Oparin, Sergey A. Zhuchenko

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFECTIVENESS OF THE FIRE PUMP AND HOSE
SYSTEM WITH A SUCTION LINE FOR WINTER CONDITIONS88

Vladislav A. Turkov, Marina V. Yelfimova, Dmitriy I. Monakhov, Anton O. Zybin

INTEGRATION OF A DUAL-REEL, CARDAN-DRIVEN WATER MIST MODULE INTO A FIRE TRUCK111

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Svetlana A. Garelina

A MULTIPARAMETRIC MODEL FOR OPTIMIZATION OF WASTE RECYCLING STRATEGY AND
MONITORING AT INDUSTRIAL FACILITIES126

Alexey Yu. Skrynnikov, Igor V. Treushkov

TEST RESULTS OF A PROTOTYPE OF A MOBILE OIL AND PETROLEUM PRODUCTS SPILL CONTAINMENT FACILITY138

Altynbek A. Tukhtarov, Anatoly V. Rybakov

ON THE INDICATOR OF PROTECTION OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES FROM THE DAMAGING FACTORS OF MUDSLIDES150

Romina M. Kretsu, Anatoly V. Rybakov

FORMULATION OF THE PROBLEM OF SELECTING A RATIONAL SET OF MEASURES TO REDUCE RISKS OF EMERGENCIES AT FUEL AND ENERGY COMPLEX FACILITIES160

УДК 614.841.45:699.8

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ ВОЗДУХОВОДОВ СИСТЕМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Фомичев Леонид Юрьевич¹, Копысов Илья Викторович¹, Сухарский Станислав Петрович², Челекова Евгения Юрьевна²

¹ Центр экспертиз, исследований и испытаний в строительстве, г. Москва, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В исследовании рассматривается вопрос оценки предела огнестойкости воздуховодов систем противодымной вентиляции как значимого фактора при обеспечении пожарной безопасности. Показана значимость критериев Е и I, а также требований к негорючести материалов, герметичности фланцевых соединений и толщине стенки воздуховодов. Описаны комбинированные огнезащитные и теплоогнезащитные покрытия на основе базальтовых материалов, обеспечивающие критерии EI30–EI240 при корректном монтаже. Методика контроля включает визуальные и инструментальные измерения толщины покрытий, стенок и защиты элементов крепления в надзорной практике. Результаты полевых проверок и экспертного опроса 20 специалистов с высокой согласованностью мнений по Кендаллу ($W = 0,82$) выявили три наиболее критичных нарушения: несоответствие толщины стенки воздуховодов проектным значениям, недостаточная толщина смонтированных огнезащитных покрытий относительно регламентов и неправильная защита элементов крепления. Эти дефекты ведут к снижению пределов Е и I, рискам деформаций, потере герметичности и ухудшению аэродинамических характеристик, что непосредственно угрожает эффективности дымоудаления и условиям эвакуации. Рекомендации включают усиление входного контроля, точное соблюдение технологических регламентов, применение сертифицированных негорючих материалов и повышение информированности исполнителей. Выполнение указанных мер обеспечивает достижение требуемых критериев EI и получение заключения о соответствии для ввода объекта в эксплуатацию.

Ключевые слова: предел огнестойкости, пожарная безопасность, противодымная вентиляция, огнезащитные покрытия, системы противопожарной защиты, системы вентиляции, безопасность зданий и сооружений, государственный строительный надзор

Для цитирования: Оценка предела огнестойкости воздуховодов систем противодымной вентиляции / Л. Ю. Фомичев [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 4–19.

ASSESSMENT OF THE FIRE RESISTANCE LIMIT OF AIR DUCTS IN SMOKE CONTROL VENTILATION SYSTEMS

Leonid Yu. Fomichev¹, Ilya V. Kopysov¹, Stanislav P. Sukharsky², Evgeniya Yu. Chelekova²

¹State Budgetary Institution "Center for Examinations, Research and Testing in Construction", Moscow, Russian Federation

²National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russian Federation

Abstract. This study considers the assessment of the fire resistance rating of air ducts in smoke control ventilation systems as a significant factor in ensuring fire safety. It demonstrates the importance of the E and I criteria, as well as requirements for material non-combustibility, flange joint tightness, and duct wall thickness. The paper describes combined fire-protective and thermal-insulating coatings based on basalt materials that provide EI30–EI240 ratings when correctly installed. The control methodology includes visual and instrumental measurements of coating thicknesses, wall thicknesses, and protection of fastening elements within supervisory practice. The results of field inspections and a survey of 20 experts, with high agreement per Kendall ($W = 0.82$), identified three most critical non-compliances: nonconformance of duct wall thickness to design values, insufficient installed thickness of fire-protective coatings relative to regulations, and improper protection of fastening elements. These defects lead to reductions in E and I ratings, risks of deformation, loss of tightness, and deterioration of aerodynamic characteristics, directly threatening the effectiveness of smoke extraction and evacuation conditions. Recommendations include strengthening incoming quality control, strict adherence to technological regulations, the use of certified non-combustible materials, and improving practitioner awareness. Implementing these measures ensures attainment of the required EI classes and the issuance of a certificate of compliance for commissioning.

Keywords: fire resistance limit, fire safety, smoke control ventilation, fire-retardant coatings, fire protection systems, ventilation systems, building and structure safety, state construction supervision

For Citation: Assessment of the fire resistance limit of air ducts in smoke control ventilation systems / L. Yu. Fomichev et al. // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 4–19.

Введение

Пожарная безопасность — это одна из ключевых составляющих обеспечения безопасности жизни людей, сохранности имущества и устойчивости инфраструктуры. В условиях современного мира, где плотность застройки и концентрация людей в зданиях постоянно растут, обеспечение пожарной безопасности является важной задачей.

За первые девять месяцев 2024 г. в России было зарегистрировано 279 313 пожаров, в результате которых погибло 5 302 человека, включая 264 несовершеннолетних. Травмы различной степени тяжести получили 6 252 человека. Материальный ущерб, причиненный пожарами, оценивается в 13,2 миллиарда рублей [1].

Эти данные подчеркивают важность соблюдения требований пожарной безопас-

ности, своевременного обслуживания противопожарных систем, соблюдения требований проектной документации в части обеспечения пожарной безопасности. Снижение количества пожаров и их последствий требует комплексного подхода, включая модернизацию инфраструктуры, повышение уровня осведомленности граждан и строгого контроля за соблюдением нормативных требований.

Материалы и методы

Одним из элементов системы обеспечения пожарной безопасности являются

системы противопожарной защиты, направленные на защиту людей и имущества от воздействия опасных факторов пожара и ограничение его последствий. Одной из таких систем является система противодымной защиты зданий и сооружений, которая предназначена для обеспечения защиты людей на путях эвакуации и в безопасных зонах от воздействия опасных факторов пожара в течение времени, необходимого для эвакуации людей, посредством удаления продуктов горения и термического разложения и предотвращения их распространения (рис. 1) [2].

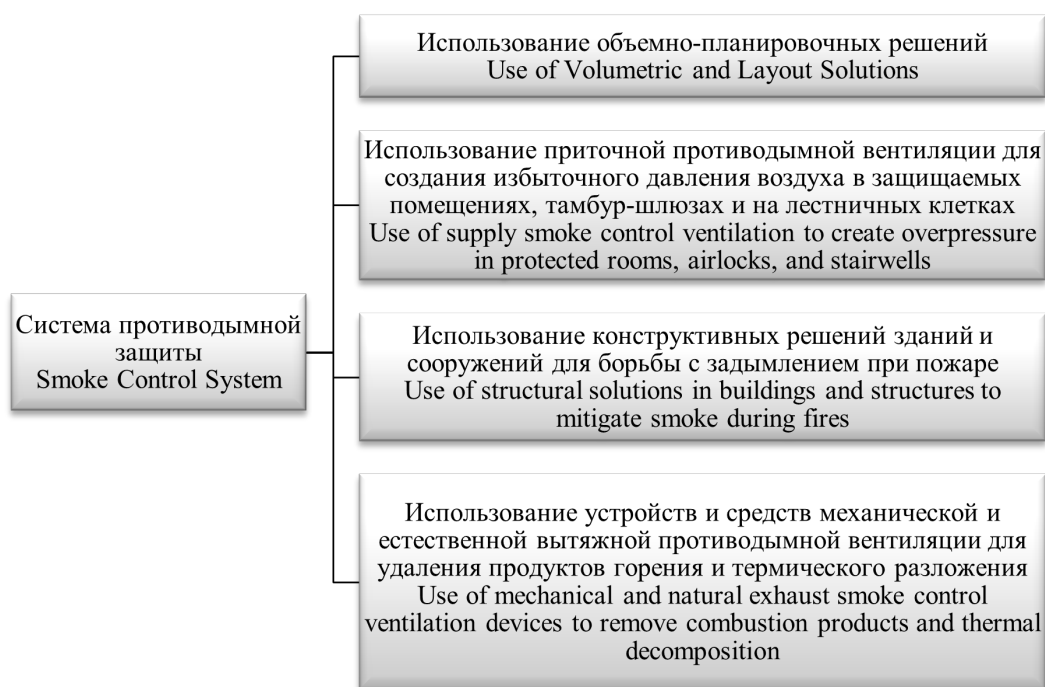


Рис. 1. Элементы системы противодымной защиты

Fig. 1. Elements of the Smoke Control System

Неотъемлемой частью инженерных систем современных зданий является вентиляция, в т. ч. противодымная. Основная задача вытяжной противодымной вентиляции — удаление дыма из зоны возгорания и прилегающих помещений. При возникновении пожара продукты горения, содержащие токсичные вещества, быстро заполняют пространство, затрудняя видимость

и дыхание. Вытяжная противодымная вентиляция активируется автоматически при срабатывании пожарной сигнализации или ручным способом. Она включает в себя вентиляторы дымоудаления, клапаны дымоудаления и воздуховоды, которые обеспечивают удаление продуктов горения из помещения. Воздушная смесь, имеющая высокую температуру, удаляется из верхней

части помещения. Это позволяет сохранить относительно чистый воздух в нижней зоне, что облегчает эвакуацию людей.

Приточная система противодымной вентиляции работает в комплексе с вытяжной и обеспечивает подачу свежего воздуха в зоны, где это необходимо. Ее основная функция заключается в создании избыточного давления в лестничных клетках, лифтовых шахтах и коридорах, что предотвращает проникновение дыма в эти зоны. Это особенно важно для путей эвакуации, т. к. позволяет людям безопасно покинуть здание. Приточная вентиляция также компенсирует удаляемый дым, предотвращая образование разрежения, которое могло бы затруд-

нить открывание дверей или привести к обратному току воздуха.

Системы вытяжной и приточной противодымной вентиляции работают совместно. Вытяжная система удаляет продукты горения, а приточная — обеспечивает подачу воздуха, создавая направленный поток, который вытесняет продукты горения. Это позволяет локализовать задымление, минимизировать его распространение и сохранить безопасные зоны для эвакуации [3].

Принцип работы системы противодымной вентиляции представлен на рис. 2.

Система противодымной вентиляции играет важнейшую роль в минимизации

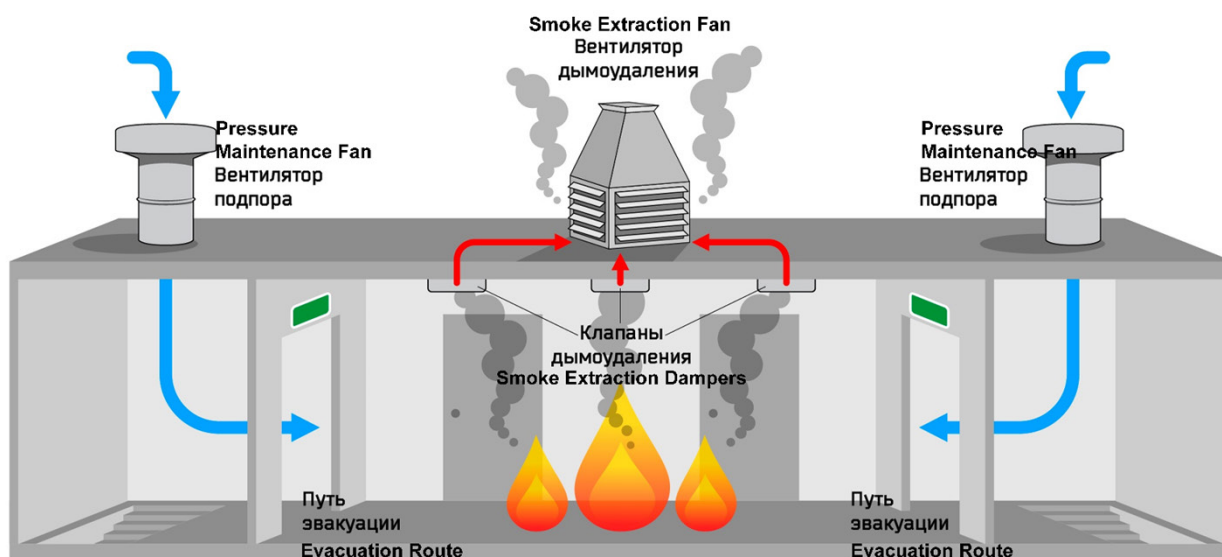


Рис. 2. Принцип работы противодымной вентиляции [5]

Fig. 2. Operating Principle of Smoke Control Ventilation [5]

воздействия опасных факторов пожара на человека и позволяет создать приемлемые условия для обеспечения эвакуации людей при пожаре [4–6].

Работа системы направлена:

- на снижение плотности задымления на путях эвакуации, что улучшает видимость за пределами зоны возгорания;
- понижение температуры воздушной среды в помещении, где находится очаг

пожара. Натурные эксперименты показывают, что в закрытых помещениях температура может достигать 1 000 °С, однако исправно функционирующая система дымоудаления способна снизить ее до 400 °С. Это значительно уменьшает воздействие теплового потока;

- предотвращение или ограничение свободного распространения пожара за пределы первичного очага возникновения;

- обеспечение приемлемых условий для дыхания за счет поддержания необходимой концентрации кислорода и снижения уровня угарного газа. Это способствует безопасной и оперативной эвакуации людей, а также позволяет эффективно осуществлять тушение возгораний.

Для выполнения функционального назначения в течение расчетного времени для систем противодымной вентиляции устанавливаются требования по пределу огнестойкости элементов систем [7–9].

Предел огнестойкости — это показатель, определяющий время, в течение которого

конструкция (в данном случае воздуховод) способна сохранять свои функции при воздействии огня [10].

Данное требование является критически важным, т. к. влияет:

- на производительность системы ($\text{м}^3/\text{ч}$);
- исключение возникновения новых очагов возгорания вследствие разрушения воздуховодов и возникновения вторичных очагов возгорания из-за нагрева прилегающих конструкций;
- исключение попадания продуктов горения в другие части здания.

Критерии оценки предела огнестойкости воздуховодов приведены в табл. 1.

Таблица 1
Критерии предела огнестойкости воздуховодов

Table 1
Criteria for Fire Resistance Limits of Air Ducts

Критерий Criteria	Расшифровка Decoding
Потеря целостности (E), мин Loss of Integrity (E), min	Время, в течение которого воздуховод не разрушается и не образует трещин, через которые могут проникать пламя и дым The duration during which the air duct does not collapse or develop cracks that allow flames and smoke to penetrate
Потеря теплоизолирующей способности (I), мин Loss of Thermal Insulation (I), min	Время, в течение которого температура на внешней поверхности воздуховода не превышает установленных норм The duration during which the temperature on the external surface of the air duct does not exceed established standards
Потеря несущей способности (R), мин Loss of Load-bearing Capacity (R), min	Время, в течение которого конструкция сохраняет свою прочность и не обрушивается The duration during which the structure retains its strength and does not collapse

Для воздуховодов противодымной вентиляции наиболее важными являются критерии E и I, т. к. они напрямую влияют на работоспособность системы. Для конструкций крепления воздуховодов к строительным конструкциям применим критерий R, который не должен быть меньше предела огнестойкости воздуховода.

Важнейшим параметром для всех систем вентиляции с пределом огнестойкости со-

гласно п. 6.13 СП 7.13130.2013 является применение в составе конструкции таких воздуховодов негорючих материалов. Наиболее часто достижение необходимого предела огнестойкости происходит путем применения теплозащитных и огнезащитных покрытий в составе их конструкций, негорючих материалов для уплотнения разъемных соединений. Пример соединения секции воздуховода представлен на рис. 3.

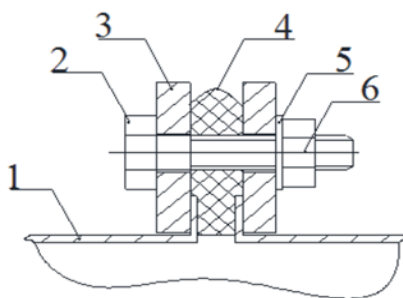


Рис. 3. Фланцевое соединение секции воздуховода с применением стальной полосы, закрепленной отбортовкой с упорным зигом:

1 — воздуховод; 2 — болт крепления; 3 — полоса стальная; 4 — базальтовый шнур; 5 — шайба; 6 — гайка

Fig. 3. Flanged connection of a duct section employing a steel strip secured via flanging with a locking crimp:

1 — Duct; 2 — Fastening bolt; 3 — Steel strip; 4 — Basalt cord; 5 — Washer; 6 — Nut

Еще одним важным параметром для обеспечения предела огнестойкости воздуховодов является материал и толщина стенки воздуховода, которая должна быть расчетной, но наиболее часто принимается не менее 0,8 мм. Данный параметр влияет на прочность воздуховода, а также на «прогиб» воздуховода при работе системы. Несоответствующая толщина стенки воз-

духовода может привести к деформациям, разрывам, уменьшению сечения воздуховода, что в итоге приведет к недостаточной производительности или отказу системы противодымной вентиляции [11–14].

Для повышения предела огнестойкости воздуховодов наиболее часто применяются комбинированные огнезащитные покрытия и теплоогнезащитные покрытия (рис. 4, 5).



Рис. 4. Внешний вид комбинированного огнезащитного покрытия (слева) на системе вытяжной противодымной вентиляции (справа)

Fig. 4. Appearance of Combined Fire-Resistant Coating (Left) on an Exhaust Smoke Control Ventilation System (Right)



Рис. 5. Внешний вид комбинированного теплоогнезащитного покрытия (слева) на системе приточной противодымной вентиляции (справа)

Fig. 5. External view of the combined thermal-fire protective coating (left) on the supply smoke control ventilation system (right)

Комбинированные огнезащитные покрытия для воздуховодов и систем противодымной вентиляции представляют собой многослойные системы, включающие базальтовые рулонные материалы и клеевые составы. Основной компонент — прошивной базальтовый материал, фольгированный с одной стороны, который обеспечивает низкую теплопроводность и устойчивость к высоким температурам. Данный вид покрытий обеспечивают как огнезащиту, так и дополнительную тепло- и звукоизоляцию. Крепление материала к воздуховодам и каналам производится при помощи негорючих и термостойких клеевых составов. Для повышения прочности швы фиксируются внахлест с проклеиванием мест соединений клеевыми составами и алюминиевой клейкой лентой. На рис. 4 представлено комбинированное огнезащитное покрытие [15].

Комбинированные покрытия обеспечивают предел огнестойкости от EI30 до EI180 в зависимости от толщины материала. Например, 5 мм для достижения предела огнестойкости EI30 и 50 мм для EI180 обладают виброустойчивостью и могут использоваться в условиях повышенной влажности. Применяются для защиты воздуховодов в зданиях любого назначения, включая промышленные объекты.

Теплоогнезащитные покрытия обычно представляют собой прошивные маты из базальтового супертонкого волокна (БСТВ) без связующего, также кашированные фольгой или металлической сеткой. Теплоогнезащитные материалы монтируются с помощью приварных штифтов с прижимными шайбами или металлических бандажей. Стыки герметизируются алюминиевой клейкой лентой [16].

Применение теплоогнезащитных покрытий позволяет достичь более высокого предела огнестойкости, до EI240, однако их единственным назначением является сохранение тепловой изоляции при высоких температурах. Наиболее часто толщина варьируется от 20 мм до 80 мм. Теплоогнезащитные материалы устойчивы к климатическим условиям окружающей среды с температурными перепадами и подходят для сложных условий эксплуатации, включая высокую влажность и воздействие химически активных сред. На рис. 5 представлено комбинированное теплоогнезащитное покрытие на системе противодымной вентиляции [17, 18].

При проектировании систем противодымной вентиляции учитываются не только требования к огнестойкости воздуховодов, а также [19]:

- выбор огнезащитных материалов в зависимости от условий эксплуатации;
- учет дополнительной нагрузки на конструкцию при использовании огнезащитных материалов;
- обеспечение герметичности соединений воздуховодов для предотвращения распространения продуктов горения.

При монтаже систем необходимо соблюдать технологию нанесения огнезащитных материалов и проводить процедуру контроля качества в процессе и после монтажа. Информация об особенностях технологического процесса производства работ по огнезащите воздуховодов содержится в технологическом регламенте на конкретный материал.

Результаты и их обсуждение

Процедура оценки соответствия предела огнестойкости воздуховодов требова-

ниям проектной документации проводится в рамках государственного строительного надзора в отношении объектов капитального строительства с целью предупреждения и выявления нарушений законодательства, соответствия выполняемых работ и применяемых строительных материалов и изделий в процессе строительства или реконструкции объектов капитального строительства, а также результатов таких работ требованиям проектной документации. Контроль параметров зависит от требований проектной документации, используемого огнезащитного материала и технологического регламента по монтажу, заявленного производителем. Для проведения экспертизы используются разработанные и аккредитованные методики оценки, включающие визуальный и инструментальный, предполагающие использование специальных инструментов с необходимыми параметрами точности, а также внесенные в государственный реестр средств измерений и имеющие действующий документ о метрологическом обеспечении.

В ходе выездных проверок строительных объектов экспертами выявляются нарушения в части обеспечения предела огнестойкости воздуховодов.

Для контроля качества монтажа огнезащитных покрытий используются следующие методы и контролируемые параметры:

1. Визуальный метод позволяет определить наличие таких дефектов, как механические повреждения покрытия, зазоры в огнезащитном покрытии, отсутствие клеевого состава на воздуховоде, нарушения в части монтажа покрытий на элементах крепления воздуховодов к строительным конструкциям, ошибки монтажа в местах соединения материала.
2. Инструментальный метод применяется для контроля толщины огнезащитного покрытия на корпусе воздуховода, элементах крепления, толщины стенок воздуховодов, нахлеста в местах соединения материала, монтажа материала на фланцевых соединениях (рис. 6).

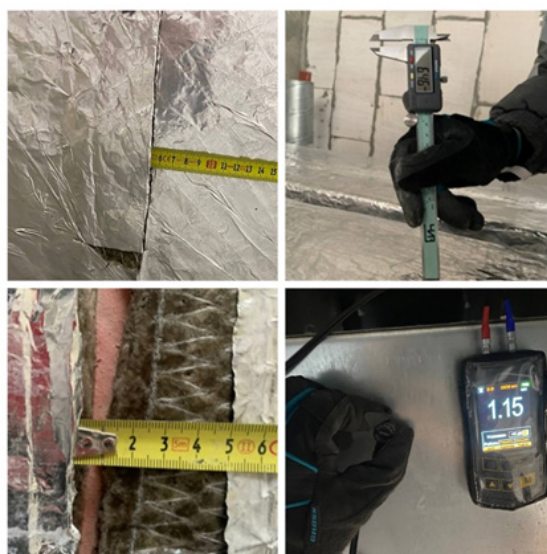


Рис. 6. Проведение контроля параметров огнезащитного покрытия систем противодымной вентиляции

Fig. 6. Inspection of Fire-Resistant Coating Parameters for Smoke Control Ventilation Systems

На рис. 7 представлена статистика наиболее частых нарушений при экспертизе работ по огнезащите воздуховодов противодымной вентиляции.

С целью выявления наиболее критичных нарушений с точки зрения пожарной безопасности, которые напрямую влияют на работоспособность систем противодымной вентиляции и выполнение функций в течение

требуемого времени, был проведен опрос среди 20 экспертов, среди которых 10 экспертов в области пожарной безопасности и 10 экспертов по системам вентиляции и кондиционирования. Результаты опроса приведены в табл. 2. Уровень критичности определяется совокупностью распространенности нарушений и степенью влияния на предел огнестойкости систем противодымной вентиляции.

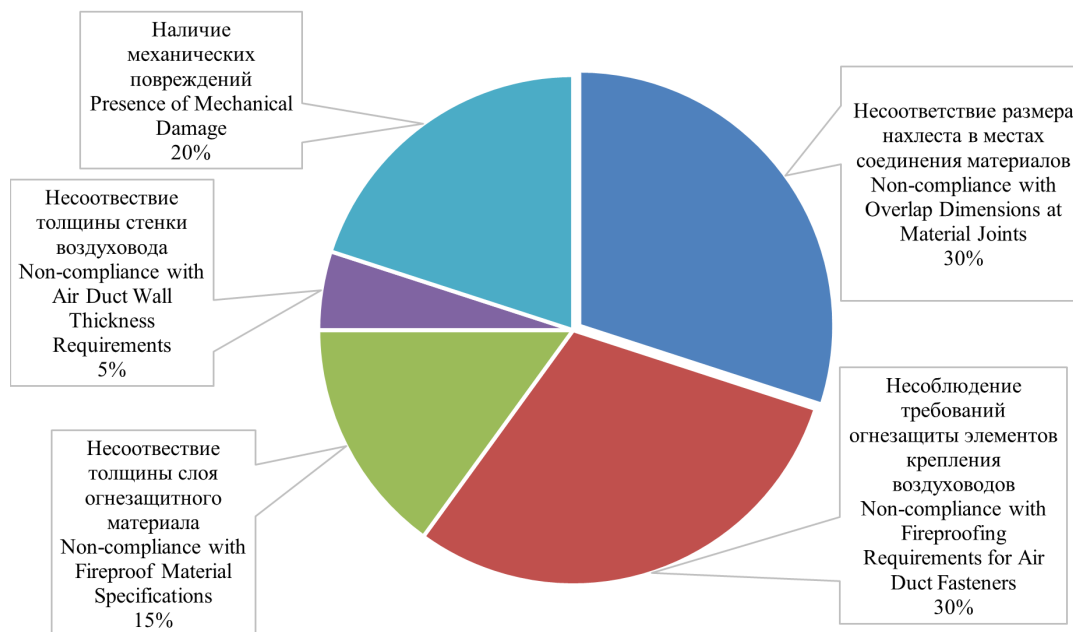


Рис. 7. Статистика наиболее частых нарушений при экспертизе работ по огнезащите воздуховодов противодымной вентиляции

Fig. 7. Statistics of the Most Common Non-Compliances During Fireproofing Inspection of Smoke Control Ventilation Air Ducts

Таблица 2
Результаты опроса экспертов

Table 2
Expert Survey Results

№	Нарушение Non-compliance	Средний ранг Average Rank	Критичность (по мнению экспертов) Criticality (According to Experts)
1	Несоответствие толщины стенки воздуховода проектным значениям Non-compliance of air duct wall thickness with design specifications	1.2	Чрезвычайная критичность Extremely Critical
2	Несоответствие толщины смонтированного огнезащитного покрытия требованиям технологического регламента Non-compliance of installed fire-resistant coating thickness with technical regulations	2.1	Высокая критичность Highly Critical

Окончание таблицы 2

№	Нарушение Non-compliance	Средний ранг Average Rank	Критичность (по мнению экспертов) Criticality (According to Experts)
3	Неправильная защита элементов крепления воздуховода Incorrect protection of air duct fastening elements	3.0	Критичное Critical
4	Наличие зазоров или дефектов в слоях огнезащитного покрытия Presence of gaps or defects in fire-resistant coating layers	4.5	Менее критичное Less Critical
5	Использование неподходящих клеевых составов или отсутствие клея в местах соединения материалов Use of unsuitable adhesive compounds or lack of adhesive at material joints	5.2	Наименее критичное Least Critical

Для оценки согласованности мнений экспертов использовался коэффициент конкордации Кендалла (W) по формуле:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)},$$

где:

S — сумма квадратов отклонений рангов от среднего ранга;

$m = 20$ — количество экспертов;

$n = 5$ — количество нарушений.

$$W > 0,8.$$

Из этого следует, что полученное значение $W = 0,82$ указывает на высокую степень согласованности мнений экспертов.

На основании данных, полученных по итогам экспертной оценки, выполнен анализ полученных результатов.

Наиболее критичным нарушением является несоответствие толщины стенки воздуховодов проектному значению. Производимые огнезащитные покрытия проходят сертификацию и испытания продукции с воздуховодами, имеющими толщину стенки не менее 0,8 мм. Из этого следует, что применение огнезащитных покрытий на воздуховодах с несоответствующей толщиной стенки не позволяет обеспечить необходимый предел огнестойкости, что

в итоге влияет на способность конструкции предотвращать проникновение пламени, дыма и продуктов горения через трещины или отверстия. Данное нарушение носит массовый характер и может допускаться на одной из стадий: на стадии закупки воздуховодов для поставки на объект строительства либо на стадии входного контроля на строительной площадке. На стадии входного контроля на строительной площадке при приемке поставки, как правило, оцениваются только внешний вид воздуховодов и комплектность поставки.

Вторым по критичности нарушением является несоответствие толщины смонтированного огнезащитного покрытия на воздуховодах и каналах систем требованиям

технологического регламента. Толщина применяемых материалов связана с физическим процессом теплопередачи и механизмом теплопроводности, который напрямую связан с обеспечением предела огнестойкости. В случае применения материала, несоответствующего по требуемой толщине, снижается способность несущей конструкции выдерживать нагрузку при пожаре и способность конструкции ограничивать передачу тепла на поверхность, противоположную источнику огня.

Третьим по критичности нарушением является защита элементов крепления воздуховода к строительным конструкциям, не предусмотренным технологическим регламентом способом. Схема крепления воздуховода к строительным конструкциям представлена на рис. 8. Распространенным случаем является закрепление огнезащитного материала на элементы крепления

воздуховода только алюминиевой клейкой лентой. При таком способе монтажа теплоогнезащитных систем на элементы крепления воздуховода клейкая лента из-за истечения срока службы или изменения климатических условий эксплуатации теряет свои адгезионные свойства, вследствие чего огнезащитный материал отслаивается от элементов крепления. При применении комбинированных огнезащитных систем монтаж огнезащитного покрытия на элементы крепления воздуховода нельзя закреплять из-за того, что без применения клеевого состава не достигается требуемый предел огнестойкости. Таким образом, закрепление огнезащитного материала без использования клеевого состава или без закрепления проволокой, влияет на несущую способность креплений и, в итоге, на предел огнестойкости системы противодымной вентиляции.

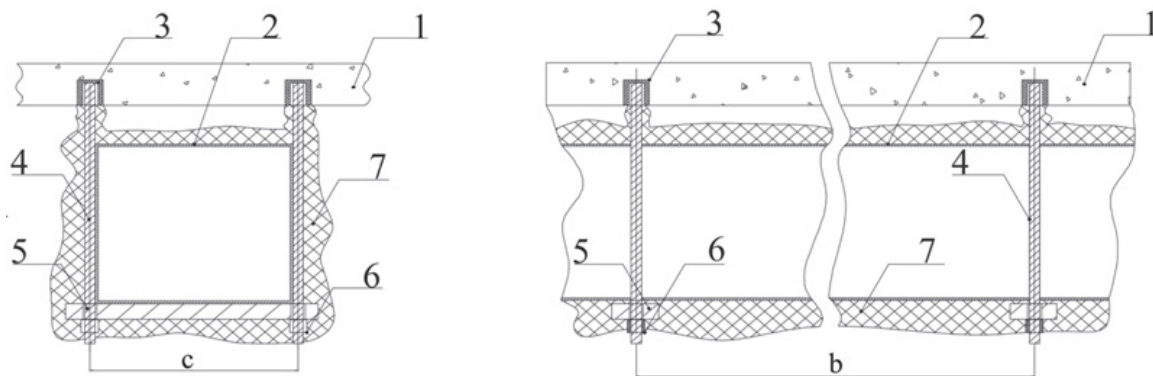


Рис. 8. Схема крепления воздуховода к строительным конструкциям:

1 — строительная конструкция (горизонтальная); 2 — воздуховод с огнезащитными свойствами; 3 — крепежный элемент узла подвески к строительной конструкции; 4 — вертикальные крепежные компоненты; 5 — монтажная траверса (направляющая рейка); 6 — фиксирующий элемент траверсы; 7 — огнестойкое покрытие, нанесенное на участок воздуховода и подвесные узлы; b — максимально допустимый шаг крепления подвесных узлов; c — расстояние между вертикальными элементами подвески

Fig. 8. Fire-resistant duct suspension system:

1 — building structure (horizontal); 2 — fire-rated duct; 3 — suspension assembly-to-structure mounting element; 4 — vertical mounting elements; 5 — mounting rail (traversa); 6 — rail fastening component; 7 — fireproof coating applied to the duct section and suspension assemblies; b — maximum permissible suspension assembly spacing interval; c — vertical suspension element spacing

В случае нахождения нарушений участник строительства несет административ-

ную и уголовную ответственность в соответствии с законодательством Российской

Федерации. По факту выявления нарушений поднадзорному лицу выдается предписание об устранении нарушений. В случае наличия неисполненных предписаний поднадзорному лицу будет отказано в выдаче заключения о соответствии построенного, реконструированного объекта капитального строительства требованиям проектной документации. Заключение о соответствии является обязательным документом для последующего ввода объекта в эксплуатацию, т. к. подтверждает, что требования проектной документации выполнены в полном объеме, в т. ч. в части систем противодымной вентиляции, которые способны выполнять свои функции по защите людей и имущества в случае пожара [20].

Выводы

Экспертная деятельность выступает одним из инструментов реализации политики в области государственного строительного надзора города Москвы, обеспечивая соблюдение нормативных требований при возведении объектов капитального строительства. Систематизация надзорных практик способствует минимизации техногенных рисков, формированию устойчивой городской инфраструктуры и созданию условий для долгосрочной эксплуатации объектов недвижимости. Результативность подтверждается

статистикой снижения аварийности и ростом показателей доверия населения к новым жилым комплексам.

Для снижения количества нарушений в части выполнения требований по обеспечению предела огнестойкости систем противодымной вентиляции производителям огнезащитных материалов следует повышать уровень осведомленности потребителей продукции в части ее применения, создавать наглядные инструкции по монтажу огнезащитных покрытий, подчеркивать важность соблюдения процесса монтажа. Данный подход позволит повысить качество конечного применения продукции потребителями, что в итоге повлияет на уровень обеспечения пожарной безопасности в строительстве в положительную сторону.

Предел огнестойкости воздуховодов противодымной вентиляции — это важный параметр, который напрямую влияет на безопасность людей в случае пожара. Применение огнезащитных материалов обеспечивает устойчивость воздуховодов к воздействию опасных факторов пожара, что способствует сохранению жизни людей и минимизации ущерба. Современные технологии и материалы обеспечивают широкие возможности для эффективной огнезащиты, однако их выбор и применение должны осуществляться с учетом нормативных требований и особенностей конкретного объекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ обстановки с пожарами и их последствиями на территории РФ за девять месяцев 2024 г. / Департамент надзорной деятельности и профилактической работы. М., 2024. URL: <https://clck.ru/3QBx8S> (дата обращения: 06.02.2025).

2. Фомичев Л. Ю., Минаева И. А. Повышение надежности автоматической пожарной сигнализации на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 12. С. 47–52.
3. Фатуллаева К. М. Конструирование систем вентиляции в жилых многоэтажных зданиях // Системные технологии. 2023. № 2 (47). С. 123–130. URL: <https://clck.ru/3QAFJV> (дата обращения: 12.03.2025).
4. Numerical study on the smoke movement in office rooms with various exhaust vents settings / S. Siregar et al. // Materials Today Proceedings. 2022. Vol. 72. Pp. 1–8. URL: <https://clck.ru/3QBx2R> (дата обращения: 12.03.2025).
5. Smoke movement analysis in an inner corridor building with vents on the stairwell / A. G. Bulanov et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 510, № 5. Article 052097.
6. Райзер Ю. С., Гатаулина А. Р., Абдуллин З. З. Исследование пределов огнестойкости противопожарных клапанов системы вентиляции // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 10. С. 56–60.
7. Towards the Development of Fire-Resistant Ventilation Ducts using Natural Fibers for Improved Safety and Performance for Mining Industries / S. Kaliyavaradhan et al. // CSBE/SCGAB 2023 Annual Technical Conference. Lethbridge, Alberta, 2023.
8. Influence of fire position on smoke movement in an inner corridor building with multiple openings / D. Li et al. // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 118. Article 03057.
9. Кузьмин А. А., Романов Н. Н., Пермьяков А. А. Расчет потерь давления в системах противодымной вентиляции // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2019. № 2. URL: <https://clck.ru/3QAJUe> (дата обращения: 12.03.2025).
10. Теплофизические характеристики стали и огнезащитных покрытий при нормированных температурных режимах пожара / В. И. Голованов [и др.] // Пожары и ЧС. 2023. № 4. URL: <https://clck.ru/3QAJnS> (дата обращения: 12.03.2025).
11. Техническая экспертиза: исследование систем вентиляции в торгово-развлекательном центре / К. О. Чичиров [и др.] // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 2 (44). URL: <https://clck.ru/3QAJzr> (дата обращения: 12.03.2025).
12. Bobu D. Computer Simulation Study Regarding the Influence of Ventilation Openings on the Fire Dynamics in a Closed Area. 2021. URL: <https://clck.ru/3QAKJj> (дата обращения: 12.03.2025).
13. Iordache V. Numerical Model Development of the Air Temperature Variation in a Room Set on Fire for Different Ventilation Scenarios // Applied Sciences. MDPI AG. 2021. URL: <https://clck.ru/3QAKzL> (дата обращения: 12.03.2025).
14. Barsim M. Numerical Simulation of an Experimental Atrium Fires in Combined Natural and Forced Ventilation by CFD // International Journal of Ventilation. Taylor & Francis. 2019. URL: <https://clck.ru/3QALMv> (дата обращения: 12.03.2025).
15. Budykina T., Anosova Ye. Thermal resistance of fire retardant materials // Magazine of Civil Engineering. 2022. № 4 (112). URL: <https://clck.ru/3QBxTZ> (дата обращения: 12.03.2025).
16. Кошелев В. А., Орлов А. А. Принципы обеспечения огнезащитных свойств материалов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 2. URL: <https://clck.ru/3QALyL> (дата обращения: 12.03.2025).

17. Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала МБОР на стенде лучистого нагрева / А. Н. Гаращенко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2020. № 6. URL: <https://clck.ru/3QAMDW> (дата обращения: 12.03.2025).

18. Тенденции развития и методы испытаний огнезащитных покрытий / Ю. А. Григорьев [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2019. № 5. С. 39–44.

19. Дымова Н. Я., Каргашилов Д. В., Зинченко Г. А. Оптимизация противопожарной защиты объектов с учетом оценки пожарных рисков // Современные проблемы гражданской защиты. 2018. № 3 (28). URL: <https://clck.ru/3QAMgg> (дата обращения: 12.03.2025).

20. Особенности испытаний внутреннего противопожарного водопровода в рамках государственного строительного надзора / Л. Ю. Фомичев [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2025. № 2 (108). С. 94–109.

REFERENCES

1. Analysis of the situation with fires and their consequences on the territory of the Russian Federation for the first nine months of 2024 / Department of Supervision and Preventive Work of the Ministry of Emergency Situations of Russia. M., 2024. URL: <https://clck.ru/3QBx8S> (date of application: 06.02.2025).

2. Fomichev L. Yu., Minaeva I. A. Improving the Reliability of Automatic Fire Alarms at Oil and Petroleum Product Storage Facilities // Occupational Safety in Industry. 2024. № 12. Pp. 47–52.

3. Fatullaeva K. M. Design of Ventilation Systems in Residential Multi-Story Buildings // System Technologies. 2023. № 2 (47). URL: <https://clck.ru/3QAFJV> (date of application: 12.03.2025).

4. Numerical study on the smoke movement in office rooms with various exhaust vents settings / S. Siregar et al. // Materials Today Proceedings. 2022. Vol. 72. Pp. 1–8. URL: <https://clck.ru/3QBx2R> (date of application: 12.03.2025).

5. Smoke movement analysis in an inner corridor building with vents on the stairwell / A. G. Bulanov et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 510, № 5. Article 052097.

6. Rayzer Yu. S., Gataullina A. R., Abdullin Z. Z. Study of fire resistance limits of fire dampers in ventilation systems // Water Supply and Sanitary Engineering. 2024. № 10. Pp. 56–60.

7. Towards the Development of Fire-Resistant Ventilation Ducts using Natural Fibers for Improved Safety and Performance for Mining Industries / S. Kaliyavaradhan et al. // CSBE/SCGAB 2023 Annual Technical Conference. Lethbridge, Alberta, 2023.

8. Influence of fire position on smoke movement in an inner corridor building with multiple openings / D. Li et al. // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 118. Article 03057.

9. Kuzmin A. A., Romanov N. N., Permyakov A. A. Calculation of Pressure Losses in Smoke Control Ventilation Systems // Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia. 2019. № 2. URL: <https://clck.ru/3QAJUe> (date of application: 12.03.2025).

10. Thermophysical Properties of Steel and Fire-Retardant Coatings Under Standardized Fire Temperature Regimes // V. I. Golovanov et al. // Fires and Emergencies. 2023. № 4. URL: <https://clck.ru/3QAJnS> (date of application: 12.03.2025).

11. Technical Expertise: Study of Ventilation Systems in a Shopping and Entertainment Center / K. O. Chichirov et al. // Caspian Engineering and Construction Bulletin. 2023. № 2 (44). URL: <https://clck.ru/3QAJzr> (date of application: 12.03.2025).
12. Bobu D. Computer Simulation Study Regarding the Influence of Ventilation Openings on the Fire Dynamics in a Closed Area. 2021. URL: <https://clck.ru/3QAKJj> (date of application: 12.03.2025).
13. Iordache V. Numerical Model Development of the Air Temperature Variation in a Room Set on Fire for Different Ventilation Scenarios // Applied Sciences. MDPI AG. 2021. URL: <https://clck.ru/3QAKzL> (date of application: 12.03.2025).
14. Barsim M. Numerical Simulation of an Experimental Atrium Fires in Combined Natural and Forced Ventilation by CFD // International Journal of Ventilation. Taylor & Francis. 2019. URL: <https://clck.ru/3QALMv> (date of application: 12.03.2025).
15. Budykina T., Anosova Ye. Thermal resistance of fire retardant materials // Magazine of Civil Engineering. 2022. № 4 (112). URL: <https://clck.ru/3QBxTZ> (date of application: 12.03.2025).
16. Koshelev V. A., Orlov A. A. Principles of Ensuring Fire-Retardant Properties of Materials // Bulletin of South Ural State University. Series: Construction and Architecture. 2019. № 2. URL: <https://clck.ru/3QALyL> (date of application: 12.03.2025).
17. Research on Structural Fire Protection Options Based on Roll Basalt Fiber Material MBOR Using Radiant Heating / A. N. Garashchenko et al. // Fire and Explosion Safety. 2020. № 6. URL: <https://clck.ru/3QAMDW> (date of application: 12.03.2025).
18. Trends in Development and Testing Methods of Fire-Retardant Coatings / Yu. A. Grigorev et al. // Adhesives. Sealants. Technologies. 2019. № 5. Pp. 39–44.
19. Dymova N. Ya., Kargashilov D. V., Zinchenko G. A. Optimization of Fire Protection for Facilities Considering Fire Risk Assessment // Modern Problems of Civil Protection. 2018. № 3 (28). URL: <https://clck.ru/3QAMgg> (date of application: 12.03.2025).
20. Features of Testing Internal Fire Water Supply Systems as Part of State Construction Supervision / L. Yu. Fomichev et al. // Technologies of Technosphere Safety. 2025. № 2 (108). Pp. 94–109.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фомичев Леонид Юрьевич, ведущий инженер отдела пожарного контроля Центра экспертиз, исследований и испытаний в строительстве (109052, Российская Федерация, г. Москва, Рязанский просп., 13); e-mail: fomichev.lu@yandex.ru

Копысов Илья Викторович, ведущий инженер отдела пожарного контроля Центра экспертиз, исследований и испытаний в строительстве (109052, Российская Федерация, г. Москва, Рязанский просп., 13); e-mail: KopysovIV@str.mos.ru

Сухарский Станислав Петрович, аспирант, кафедра комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское ш., 26); e-mail: stanislav-07@inbox.ru

Челекова Евгения Юрьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское ш., 26); e-mail: Kiara_lion@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonid Yu. Fomichev, Lead Engineer, Fire Control Department, Center for Examinations, Research, and Testing in Construction (GBU "CEIIS") (13 Ryazansky Prospect, Moscow, 109052, Russian Federation); e-mail: fomichev.lu@yandex.ru

Ilya V. Kopysov, Lead Engineer, Fire Control Department, State Budgetary Institution "Center for Examinations, Research and Testing in Construction" (SBI "CERTS") (13 Ryazansky Prospekt, Moscow, 109052, Russian Federation); e-mail: KopysovIV@str.mos.ru

Stanislav P. Sukharsky, Postgraduate Student, Department of Comprehensive Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), (26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation); e-mail: stanislav-07@inbox.ru

Evgenia Yu. Chelekova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Comprehensive Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) (26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation); e-mail: Kiara_lion@mail.ru

Поступила в редакцию 17.07.2025
Одобрена после рецензирования 08.10.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 614.841.41

АНАЛИЗ СВЕДЕНИЙ О ПОЖАРАХ, ВЫЗВАННЫХ САМОВОЗГОРАНИЕМ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Терентьев Дмитрий Иванович, Сатюков Роман Сергеевич
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. На фоне продолжающегося активного распространения и расширения областей применения литий-ионных аккумуляторов в России и за рубежом фиксируются случаи пожаров, вызванных их самовозгоранием. В данной работе выполнен анализ случаев пожаров на территории некоторых областей Российской Федерации, попавших в поле зрения специалистов региональных испытательных пожарных лабораторий. Судя по собранной информации, в последние годы вопросы обеспечения пожарной безопасности объектов защиты, на которых допускаются эксплуатация, хранение или транспортировка литий-ионных аккумуляторных батарей, по-прежнему сохраняют актуальность и остроту. Материалы, описывающие случаи пожаров по причине самовозгорания литий-ионных аккумуляторных батарей, опубликованные в данной работе, не могут считаться всеобъемлющими по нескольким причинам. Однако в ходе анализа материалов были выявлены тенденции, которые не могут не вызывать обеспокоенность специалистов в области обеспечения пожарной безопасности. Одной из таких тенденций может считаться рост числа пожаров в результате самовозгорания литий-ионных аккумуляторов в многоквартирных жилых домах. Также выявлено, что значительная доля пожаров вызвана самовозгоранием устройств, использующих литий-ионные батареи, которые находились в процессе зарядки. Для решения установленных проблем могут оказаться востребованными меры регуляторного характера.

Ключевые слова: пожарная безопасность, литий-ионные аккумуляторы, опасность взрыва, свойства горючей нагрузки, самовоспламенение, математическая модель пожара, оценка пожарных рисков

Для цитирования: Терентьев Д. И., Сатюков Р. С. Анализ сведений о пожарах, вызванных самовозгоранием литий-ионных аккумуляторных батарей // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 20–27.

ANALYSIS OF DATA ON FIRES CAUSED BY SPONTANEOUS COMBUSTION OF LITHIUM-ION BATTERIES

Dmitriy I. Terentiev, Roman S. Satukov
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. As lithium-ion batteries continue to spread and expand their applications in Russia and abroad, fires caused by their spontaneous combustion are reported. This paper analyzes fire incidents in several regions of the Russian Federation that were observed by specialists from regional fire testing laboratories. Based on the collected information, fire safety issues at protected facilities where lithium-ion batteries are used, stored, or transported remain relevant and pressing in recent years. The materials describing fires caused by spontaneous combustion of lithium-ion batteries published in this paper cannot be considered comprehensive for several reasons. However, during the analysis of the materials, trends were identified that are of concern to fire safety specialists. One such trend is the increasing number of fires resulting from the spontaneous combustion of lithium-ion batteries in apartment buildings. It was also discovered that a significant proportion of fires are caused by the spontaneous combustion of devices using lithium-ion batteries while they are charging. Regulatory measures may be needed to address these identified issues.

Keywords: fire safety, lithium-ion batteries, explosion hazard, flammable load properties, spontaneous combustion, mathematical fire model, fire risk assessment

For Citation: Terentiev D. I., Satukov R. S. Analysis of data on fires caused by spontaneous combustion of lithium-ion batteries // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 20–27.

Анализ данных о пожарах с участием литий-ионных аккумуляторов, представленных испытательными пожарными лабораториями

В 2024 г. научно-исследовательским отделением учебно-научного комплекса обеспечения пожарной безопасности объектов и населенных пунктов Уральского института ГПС МЧС России был проведен сбор и анализ сведений, имеющихся в распоряжении испытательных пожарных лабораторий (далее — ИПЛ) о пожарах, возникавших по причине возгорания литий-ионных аккумуляторов (далее — ЛИАБ), за период с 2021 по 2024 гг. Сведения были представлены ИПЛ следующих российских регионов: Амурской, Архангельской, Ивановской, Костромской, Курской, Мурманской, Нижегородской, Новгородской, Омской, Орловской, Ростовской, Самарской, Саратовской, Сахалинской, Свердловской, Тверской,

Томской, Челябинской областей, Ханты-Мансийского автономного округа — Югра, Алтайского, Забайкальского, Камчатского, Пермского, Ставропольского, Хабаровского краев, республик Карелия, Коми, Марий Эл, Мордовия, Хакасия, Чувашия. ИПЛ некоторых регионов сообщили об отсутствии данных о случаях возникновения пожаров по причине самовозгорания ЛИАБ. ИПЛ Санкт-Петербурга, Москвы и соответствующих областей не приняли участие в опросе.

Согласно полученным данным за указанный период зафиксировано как минимум 96 случаев пожаров, причиной которых по результатам проведенных экспертиз явилось самовозгорание ЛИАБ. С учетом того, что проведенный опрос не охватил столичные регионы, фактически являющиеся крупнейшими центрами транспортировки, хранения и эксплуатации ЛИАБ, имеющиеся данные нельзя считать исчерпывающими — реальное количество пожаров, возникавших

по данной причине, может существенно превышать указанную в отчете величину.

На диаграмме (рис. 1) приведено распределение пожаров, возникших по причине

самовозгорания ЛИАБ, по классам функциональной пожарной опасности объектов защиты, на которых были зафиксированы пожары.

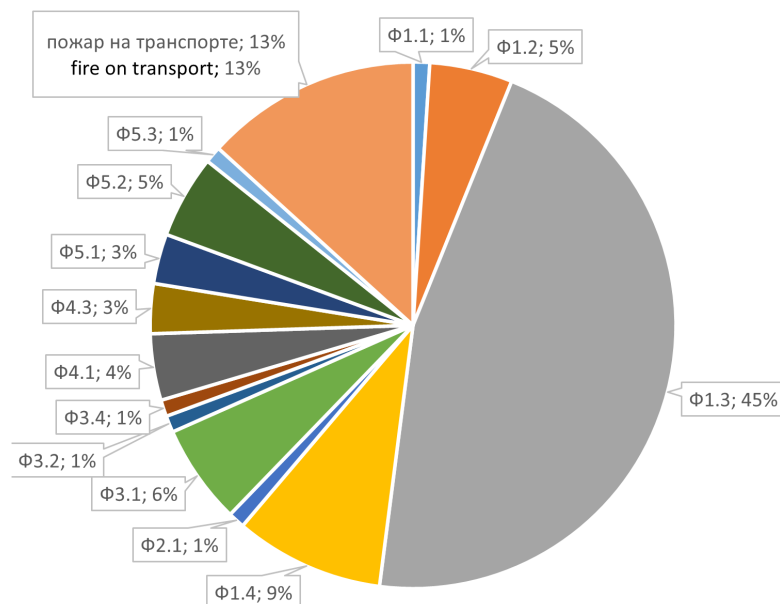


Рис. 1. Распределение пожаров, возникших по причине самовозгорания ЛИАБ по классам функциональной пожарной опасности зданий согласно результатам опроса ИПЛ

Fig. 1. Distribution of fires caused by spontaneous combustion of LIRB by classes of functional fire hazard of buildings, according to the results of the FTL survey

Согласно указанным данным наибольшее количество пожаров, возникающих по причине самовозгорания ЛИАБ, фиксируется в жилом секторе (54 % от общего количества случаев).

С учетом наблюдаемого в настоящее время распространения ЛИАБ в сфере беспилотных летательных систем, а также на транспорте (особенно в связи с принятой в 2021 г. концепцией развития электротранспорта с бюджетом в 591 млрд руб. до 2030 г. [1]), следует ожидать изменений в вышепредставленном распределении пожаров по функциональным классам пожарной опасности зданий с креном в сторону роста количества пожаров на транспорте и на производственных объектах, где будут допускаться хранение, зарядка и эксплуатация ЛИАБ.

Следует отметить, что в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации № 2200 «Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом и о внесении изменений в п. 2.1.1 Правил дорожного движения Российской Федерации» от 21 декабря 2020 г. [2] ЛИАБ, перевозимые автотранспортом, расцениваются как опасные грузы, к которым следует применять действующие директивы и рекомендации ООН, причем требования безопасности при транспортировке ЛИАБ в качестве опасного груза имеют обязательный характер. При этом возникает иллюзия, что с момента разгрузки на складе и при поступлении продукции к пользователю ее опасность становится неочевидной, а обязательные требования безопасности снимаются.

Однако результаты опроса ИПЛ указывают, что в основном пожарная опасность ЛИАБ проявляется не столько при транспортировке, сколько при их эксплуатации и хранении.

Согласно результатам отчетов в 42 % случаев ЛИАБ в момент возгорания находились в процессе зарядки. В 5% случаев возгорание произошло из-за внешнего нагрева. В 7 % случаев причиной воспламенения послужило механическое повреждение ЛИАБ. В 45 % случаев аккумуляторная батарея

до момента самовозгорания не имела признаков каких-либо опасных воздействий.

На рис. 2 показано распределение возгораний по носителям литий-ионных аккумуляторных батарей согласно отчетам ИПЛ. Полученные данные свидетельствуют о том, что 30 % пожаров происходит по причине самовоспламенения ЛИАБ средств индивидуальной мобильности (СИМ); на втором месте по частоте воспламенения находятся ЛИАБ смартфонов.

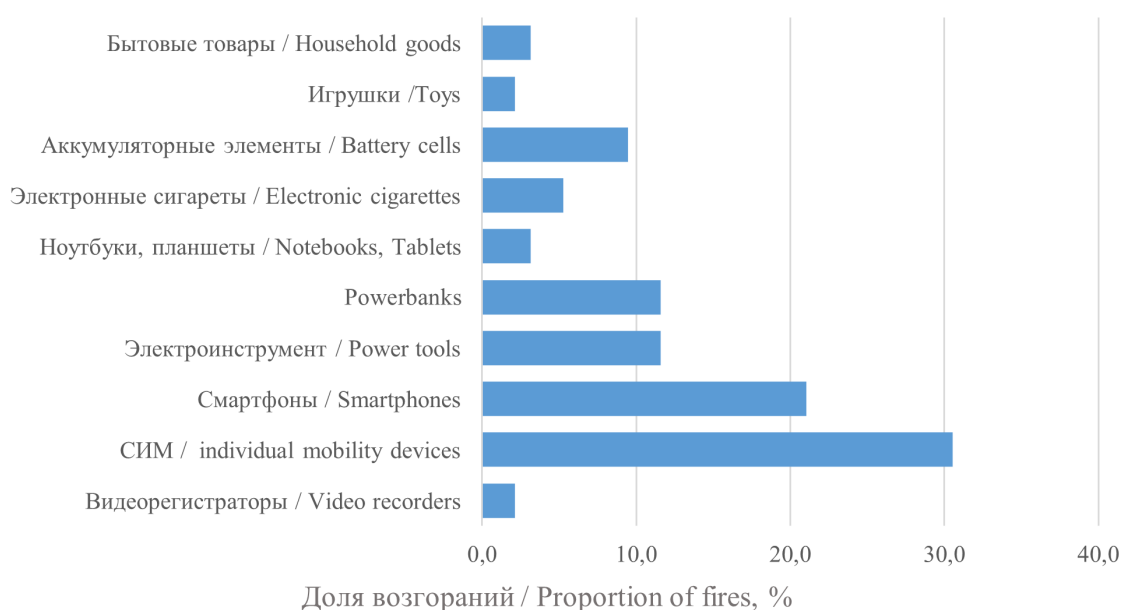


Рис. 2. Распределение пожаров, возникших по причине самовозгорания ЛИАБ, по типам носителей согласно результатам опроса ИПЛ

Fig. 2. Distribution of fires caused by spontaneous combustion of LIRB by carrier type, according to the results of the survey of the FTL

Информация о частоте воспламенения ЛИАБ в процессе заряда, по-видимому, указывает на распространенность техники с неэффективными электронными системами контроля и управления работы батареи и зарядного устройства или же на их полное отсутствие в электрической схеме этих образцов.

В 11 % расследованных случаев пожаров самовозгорание ЛИАБ сопровождалось взрывом с воздействием его факторов на конструкции и людей. В других случаях

фиксировались громкие хлопки без образования выраженных факторов взрыва. Рост давления газов внутри неисправной батареи следует считать ожидаемым, а не случайным сценарием развития событий [3–9].

О степени тяжести последствий

На пожарах, отраженных в опросе ИПЛ, пострадали несколько десятков человек, шесть человек погибли. 94 % пострадали в жилых домах и квартирах. В 54 % случаев

вред здоровью был причинен отравлением продуктами горения, в 31 % случаев — воздействием высокой температуры (получение ожогов), в 15 % случаев причина нанесения вреда здоровью не была указана.

На рис. 3 показано распределение пожаров, возникших по причине самовозгорания ЛИАБ, по величине результирующей площади горения. С учетом того факта, что значительная часть пожаров происходила

в жилых домах и квартирах, можно сделать вывод о том, что самовозгорание ЛИАБ в половине случаев приводило к распространению горения на всю площадь комнаты или квартиры, а в другой половине случаев — к горению на площади локального очага не более 1–5 м². Отдельные пожары распространились на территорию более 100 м², причем в одном случае площадь пожара достигла 750 м².

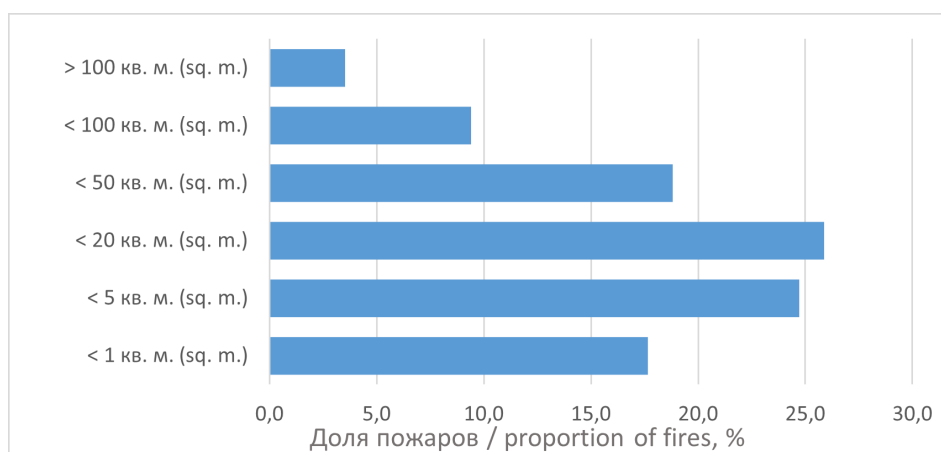


Рис. 3. Распределение пожаров, возникших по причине самовозгорания ЛИАБ, по величине результирующей площади горения согласно результатам опроса ИПЛ

Fig. 3. Distribution of fires caused by spontaneous combustion of LIRB, by the size of the resulting fire source, according to the results of the survey of the FTL

Из всех пожаров с малой площадью горения (до 5 м²) почти каждый второй был вызван возгоранием ЛИАБ СИМ.

В случаях с пожарами, распространившимися на большие площади, основными источниками горения также оказались СИМ (31 %), смартфоны (29 %), аккумуляторы бытовой техники и электроинструмента (23 %), пауэрбанки (6 %).

Согласно результатам опроса явление самовозгорания ЛИАБ в помещении в рамках прогнозирования динамики ОФП можно рассматривать как источник зажигания нового типа, обладающий определенными параметрами и таким образом обеспечивающий характерную начальную динамику распространения пожара. При этом с вы-

сокой вероятностью происходит переход горения на другие виды горючей нагрузки, имеющиеся в помещении.

Результаты опроса ИПЛ также показывают, что гибель людей может произойти на пожарах даже со сравнительно небольшой площадью горения. Основной причиной следует считать высокую токсичность продуктов горения и термического разложения отдельных видов данной горючей нагрузки.

Выводы

Пожарная опасность различных видов бытовой техники, использующих ЛИАБ, подтверждается отчетами российских ИПЛ.

В наиболее уязвимом положении в настоящий момент находятся конечные пользователи СИМ, смартфонов и бытовой техники. Почти в половине случаев возгорания происходят при зарядке ЛИАБ, что указывает на несостоятельность встроенных электронных защитных систем этой продукции.

По мере дальнейшего распространения ЛИАБ в другие области применения, по-видимому, следует ожидать смещения акцентов пожарной опасности на другие классы объектов защиты.

Выглядит не полностью продуманной ситуация с действующим нормативным регулированием, когда продукция, содержащая ЛИАБ, с одной стороны, не считается опасной при хранении и эксплуатации в быту, а с другой стороны, ее транспортировка автотранспортом уже считается опасной и должна

проводиться с выполнением обязательных требований безопасности.

Логичным шагом, способным в определенной мере исправить такую парадоксальную ситуацию, могло бы стать введение обязательных требований наличия эффективных электронных систем безопасности — систем контроля и управления работой батареи (СКУ, она же BMS), систем управления работой зарядных устройств, автоматических предохранителей — для СИМ, смартфонов и других видов техники, применяемых в быту.

Кроме этого, введение требования обязательной маркировки всех видов такой продукции могло бы помочь пользователям избавиться от иллюзий и в большей мере осознать пожарную опасность применения ЛИАБ в быту.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. В России к 2030 году будет создана новая высокотехнологичная отрасль по производству электромобилей // Министерство экономического развития Российской Федерации : офиц. сайт. URL: <https://clck.ru/3QArMe> (дата обращения: 25.05.2025). Дата публикации: 23.08.2021.
2. Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом и о внесении изменений в пункт 2.1.1 Правил дорожного движения Российской Федерации : постановление Правительства Российской Федерации № 2200 от 21.12.2020 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/400111454/> (дата обращения: 25.05.2025).
3. Предварительное исследование пожароопасных свойств литий-ионных аккумуляторов / Д. И. Терентьев [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 3 (44). С. 25–34.
4. Орлов О. И., Комельков В. А., Сорокин Д. В. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 177–189.
5. Елисеев Ю. Н., Мокряк А. В. Анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2020. № 3. С. 14–17.
6. Crafts C., Borek T., Mowry C. Safety Testing of 18650-Style Lithium-ion Cells. Sandia National Laboratories, SAND2000-1454C, May 2000.

7. Харламенков А. С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31, № 3. С. 96–102.
8. Контроль качества литий-ионных аккумуляторов / Д. В. Бессонов [и др.] // Вестник НЦБЖД. 2021. № 1 (47). С. 68–74.
9. Изучение термической устойчивости Li-ионных батарей / Д. В. Бессонов [и др.] // Безопасность критических инфраструктур и территорий. Проблемы безопасности строительных критических инфраструктур «Safety 2018»: сб. ст. / науч. ред. С. А. Тимашев. Екатеринбург, 2018. С. 102–104.

REFERENCES

1. A new high-tech industry for the production of electric vehicles will be created in Russia by 2030 // Ministry of Economic Development of the Russian Federation : official website. URL: <https://clck.ru/3QArMe> (date of application: 25.05.2025). Date of publication: 23.08.2021.
2. On Approval of the Rules for the Carriage of Goods by Road and on Amendments to paragraph 2.1.1 of the Rules of the Road of the Russian Federation : decree of the Government of the Russian Federation dated № 2200 21.12.2020 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/400111454/> (date of application: 25.05.2025).
3. Preliminary investigation of the fire-hazardous properties of lithium-ion batteries / D. I. Terentyev et al. // Technosphere safety. 2024. № 3 (44). Pp. 25–34.
4. Orlov O. I., Komelkov V. A., Sorokin D. V. Fire hazard of lithium-ion batteries // Modern problems of civil protection. 2023. № 4 (48). Pp. 177–188.
5. Yeliseyev Yu. N., Mokryak A. V. Analysis of fire hazard of lithium-ion batteries // Bulletin of Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia. 2020. № 3. Pp. 14–17.
6. Crafts C., Borek T., Mowry C. Safety Testing of 18650-Style Lithium-ion Cells. Sandia National Laboratories, SAND2000-1454C, May 2000.
7. Kharlamenkov A. S. Fire hazard of using lithium-ion batteries in Russia // Fire and Explosion Safety. 2022. Vol. 31, № 3. Pp. 96–102.
8. Quality control of lithium-ion batteries / D. V. Bessonov et al. // Bulletin of the National Library of Railways. 2021. № 1 (47). Pp. 68–74.
9. Study of the thermal stability of Li-ion batteries / D. V. Bessonov et al. // Safety of critical infrastructures and territories. Problems of safety of construction critical infrastructures «Safety 2018»: collection of articles. Ekaterinburg, 2018. Pp. 102–104.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Терентьев Дмитрий Иванович, канд. хим. наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИО УНК обеспечения пожарной безопасности объектов и населенных пунктов Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 47228; Scopus Author ID: 55900790600; ResearcherID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366; e-mail: terentyevdi@uigps.ru

Сатюков Роман Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, начальник УНК обеспечения пожарной безопасности объектов и населенных пунктов Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 793362; e-mail: satyukovrs@uigps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy I. Terentiev, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Leading Researcher, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); ID RISC: 47228; Scopus Author ID: 55900790600; ResearcherID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366; e-mail: terentyevdi@uigps.ru

Roman S. Satukov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the educational and scientific complex, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); ID RISC: 793362; e-mail: satyukovrs@uigps.ru

Поступила в редакцию 30.05.2025
Одобрена после рецензирования 02.07.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 614.841.2

СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОГНЕЗАЩИТНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ ПО КОЛИЧЕСТВУ ГОРЮЧИХ ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ, ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ПРИ НАГРЕВЕ

Сысоева Татьяна Павловна, Кухарев Александр Александрович, Мусиенко Тамара Викторовна,
Агеев Павел Михайлович

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается апробация нового способа оценки качества огнезащитной обработки деревянных конструкций по количественной оценке выделяющихся летучих компонентов веществ при индукционном нагреве. В первую очередь был определен диапазон времени и температурное воздействие, при котором можно отследить изменения между показателями необработанных и обработанных образцов. Для проведения дальнейшего исследования были выбраны два способа нанесения огнезащитных составов: способ послойного нанесения и способ пропитки. Суть эксперимента заключалась в том, что образец помещался в экспериментальный прототип камеры цилиндрической формы и подвергался воздействию индукционной паяльной станции в течение 60 секунд, при температуре 430 °С — для образцов, обработанных послойным способом, и температуре 480 °С — для образцов, обработанных способом пропитки. Обусловленность выбранных температур и времени приводится в самой статье. На основе результатов сделан вывод о том, что пик значений достигается при 60 секундах, далее (после 70 секунд) происходит образование карбонизационного слоя древесины и наблюдается переход показаний на плато, т. е. показания переходят в постоянное значение с небольшим отклонением от 0,1 до 0,3 %. Показатели выделяющихся летучих веществ на необработанных образцах значительно больше в сравнении с обработанными образцами. Это свидетельствует о том, что рассматриваемый способ оценки качества огнезащитной обработки может применяться в криминалистических исследованиях.

Ключевые слова: огнезащитная обработка, деревянные конструкции, индукционный нагрев, количественная оценка, пожарно-техническая экспертиза

Для цитирования: Способ оценки качества огнезащитной обработки древесины по количеству горючих летучих веществ, выделяющихся при нагреве / Т. П. Сысоева [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 28–37.

METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF FIRE PROTECTION TREATMENT OF WOOD BASED ON THE AMOUNT OF FLAMMABLE VOLATILE SUBSTANCES RELEASED DURING HEATING

Tatiana P. Sysoeva, Alexander A. Kukharev, Tamara V. Musienko, Pavel M. Ageev

Abstract. The article discusses the validation of a new method for assessing the quality of fire protection treatments for wooden structures based on quantitative evaluation of volatile components released during induction heating. First, the time range and temperature exposure were determined, at which it is possible to track changes between the indicators of untreated and treated samples. For further research, two methods of applying flame retardants were selected: the method of layer-by-layer application and the method of impregnation. The experiment involved placing the sample in a cylindrical experimental chamber and exposing it to an induction soldering station for 60 seconds at a temperature of 430 °C for samples treated with the layer-by-layer method and 480 °C for samples treated with the impregnation method. The conditionality of the selected temperatures and time is given in the article itself. Based on the results, it was concluded that the peak values are reached at 60 seconds, then (after 70 seconds) a carbonation layer of wood is formed and the readings reach a plateau, i.e. the readings change to a constant value with a slight deviation from 0.1 to 0.3 %. The indicators of volatile substances released on untreated samples are significantly higher in comparison with the treated ones. This indicates that this method of assessing the quality of flame retardant treatment can be used in forensic research.

Keywords: fire-retardant treatment, wooden structures, induction heating, quantitative assessment, fire-technical expertise

For Citation: Method for assessing the quality of fire protection treatment of wood based on the amount of flammable volatile substances released during heating / T. P. Sysoeva et al. // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 28–37.

Введение

Сегодня одним из наиболее распространенных строительных материалов является древесина и ее производные [1]. Можно с уверенностью сказать, что древесина долгие годы будет востребована в связи с ее свойствами: экологичностью, простотой механической обработки, прочностью, а также возобновляемостью ресурсов. Наиболее существенным недостатком древесины и материалов на ее основе является высокая пожарная опасность, поэтому актуальной проблемой остается обеспечение защиты деревянных конструкций от огня.

Основными путями защиты древесины являются: снижение скорости термического разложения и изменение состава продуктов термического разложения [2, 3]. Для достижения этих целей древесину модифицируют различными средствами огнезащиты; к ним относятся: огнезащитные покрытия, лаки, эмали, обмазки, а также разнообразные пропитки [4–7].

В связи с этим целью научного исследования является разработка нового способа оценки качества огнезащитной обработки деревянных конструкций по количественной оценке выделяющихся летучих компонентов веществ при индукционном нагреве.

Апробация нового способа

В качестве объектов исследования использовались образцы древесины из сосны

(рис. 1) и огнезащитные составы 1-й группы «Барьер» (рис. 2) и 2-й группы огнезащитной эффективности фирмы «Сатин» (рис. 3).



Рис. 1. Исходные образцы древесины из сосны размером 4 × 35 см

Fig. 1. Initial samples of pine wood 4 × 35 cm in size



Рис. 2. Огнезащитный состав фирмы «Барьер» 1-й группы

Fig. 2. Fire-retardant composition of the company "Barrier" of the 1st group

В исследованиях были использованы следующие приборы и оборудование: индукционная паяльная станция (рис. 4), сигнализатор-эксплозиметр СТХ-17 (рис. 5) и экспериментальный прототип камеры цилиндрической формы (рис. 6).

Выбор индукционной паяльной станции сделан исходя из того, что она поддерживает постоянный нагрев в диапазоне температур от 200 до 480 °С.

Прибор СТХ-17 предназначен для контроля дозврывоопасных концентраций горючих газов и паров горючих жидкостей и их



Рис. 3. Огнезащитный состав фирмы «Сатин» 2-й группы

Fig. 3. Fire-retardant composition of the company "Satin" of the 2nd group

совокупности (С, %) в воздухе, в процентном соотношении от НКПР [8].

Для проведения экспериментов был разработан прототип экспериментальной камеры. Он представляет собой металлическое изделие цилиндрической формы размерами 10 × 5 см, состоящее из двух прокладок, закручивающейся винтовой крышки с отверстием для установки датчика сигнализатора-эксплозиметра и отверстия размером 1 × 1 см для подачи индукционного нагревательного элемента (рис. 6).

Огнезащитные составы наносились двумя способами:

- способ послойного нанесения;
- способ пропитки.

В первом случае, в соответствии с рекомендациями производителей, составы наносились кистью с тщательной пропиткой торцов и трещин в два слоя с перерывом в 2 часа.

При втором способе образцы полностью погружались в ванну с огнезащитными составами. Время пропитки составом составляло 2 и 4 часа. В процессе работы было проведено 30 экспериментов для каждого вида огнезащитного состава и способа нанесения для получения чистоты эксперимента.



Рис. 4. Quick-202D ESD индукционная паяльная станция

Fig. 4. Quick-202D ESD induction soldering station



Рис. 5. Сигнализатор-эксплозиметр CTX-17

Fig. 5. STX-17 explosion detector

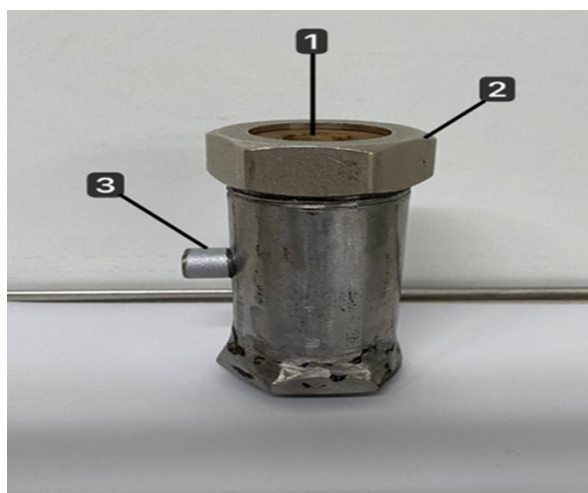


Рис. 6. Экспериментальный прототип камеры цилиндрической формы:

1 — прокладки с отверстиями для установки датчика эксплозиметра; 2 — винтовая крышка с отверстием для подачи датчика эксплозиметра; 3 — отверстие для подачи индукционного нагревательного элемента

Fig. 6. An experimental prototype of a cylindrical chamber:

1 — gaskets with holes for installing the explosion sensor; 2 — screw cap with a hole for feeding the explosion sensor; 3 — a hole for feeding an induction heating element

На первом этапе исследования образцы необработанной древесины (15 образцов с двумя местами измерений) (рис. 7) подвергали тепловому воздействию в 430 °С

с помощью индукционного нагревателя и отслеживали изменения концентрации летучих компонентов прибором CTX-17 до выхода на стационарный режим.

Примеры показателей измерения концентрации летучих компонентов прибором представлены на рис. 8. После 60-й секунды эксперимента значения концентрации ле-

тучих компонентов приходят к постоянным значениям. Усредненные результаты с доверительными интервалами данного этапа экспериментов представлены на рис. 9.

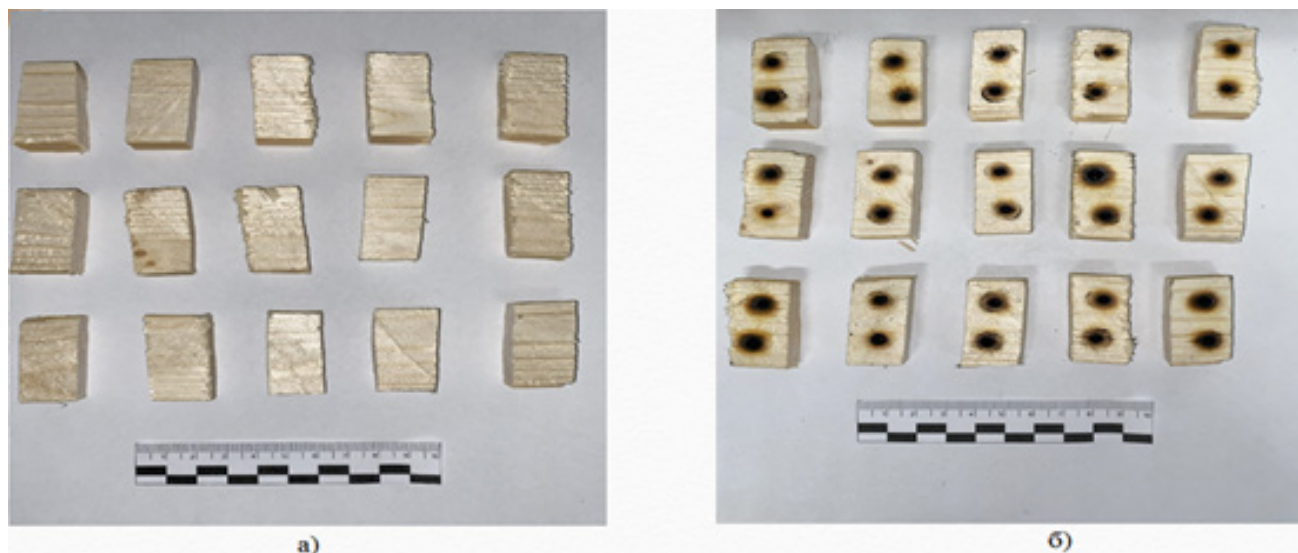


Рис. 7. Внешний вид древесины:

а — образцы необработанной древесины до термического воздействия; б — результаты термического воздействия на образцы необработанной древесины

Fig. 7. The appearance of the tree:

а — samples of untreated wood before thermal exposure; б — the results of thermal exposure to samples of untreated wood



Рис. 8. Показатели сигнализатора-эксплозиметра СТХ-17 за 60 секунд воздействия индукционного нагревателя при температуре 430 °C на образец необработанной древесины

Fig. 8. Indicators of the STX-17 explosion detector for 60 seconds of exposure to an induction heater at a temperature of 430 °C on a sample of untreated wood

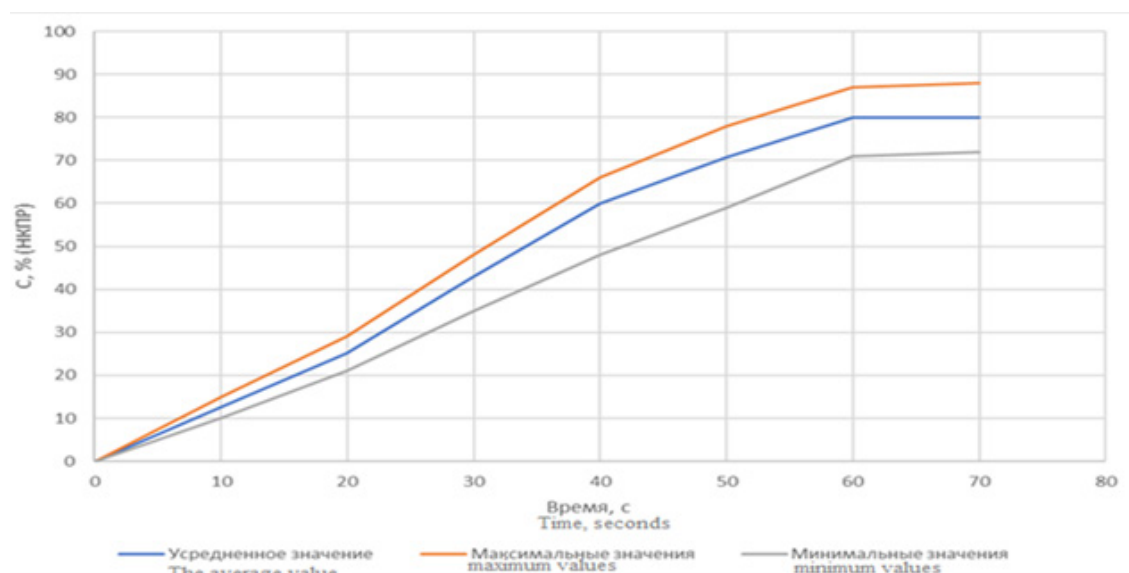


Рис. 9. Зависимость количества выделившихся летучих горючих компонентов (C, % НКПР) на необработанных образцах древесины от времени

Fig. 9. Dependence of the amount of volatile, combustible components released (C, % NKPR) on untreated wood samples on time

На втором этапе исследования образцы древесины, обработанные разными составами и способами, подвергались тепловому воздействию в 430 °С с помощью индукционного нагревателя и отслеживались изменения концентрации летучих

компонентов прибором СТХ-17 в течение 60 секунд.

Усредненные результаты исследования образцов древесины, обработанных разными составами и способами, на данном этапе экспериментов представлены на рис. 10–11.

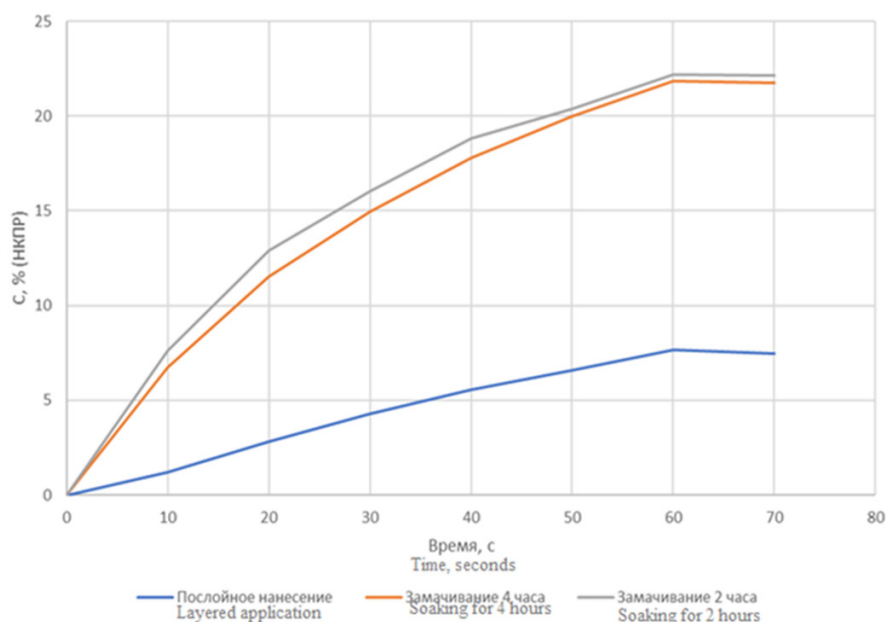


Рис. 10. Зависимость количества выделившихся летучих горючих компонентов (C, % НКПР) на обработанных образцах древесины огнезащитным составом 1-й группы огнезащитной эффективности фирмы «Барьер» двумя способами нанесения

Fig. 10. Dependence of the amount of volatile, combustible components released (C, % NKPR) on treated wood samples with fire-retardant composition of the 1st group of fire-retardant effectiveness of the company "Barrier" by two methods of application

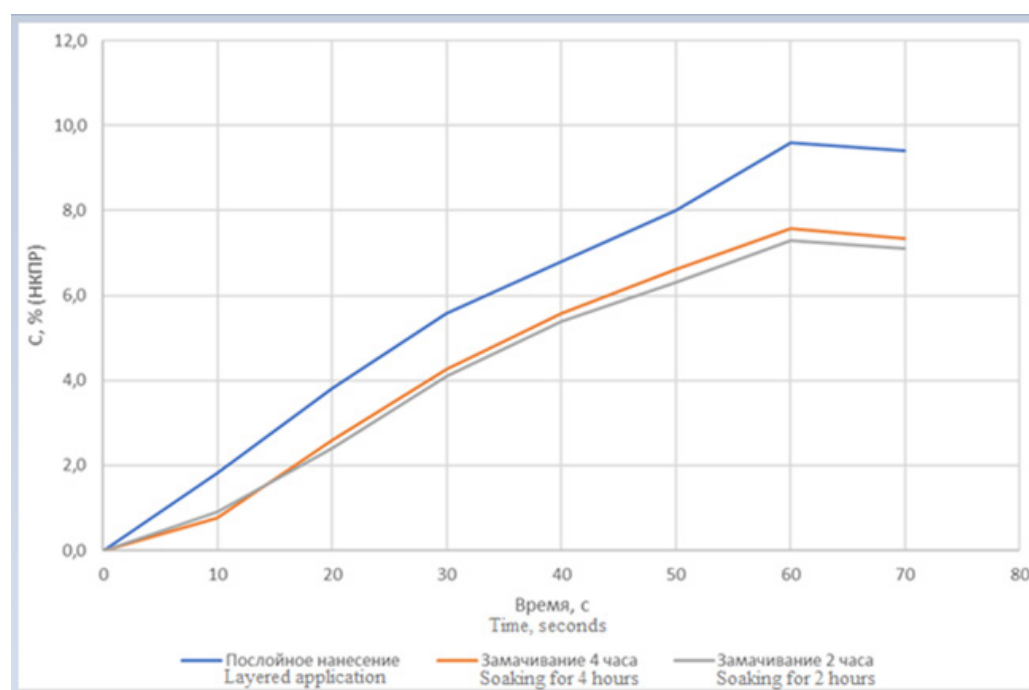


Рис. 11. Зависимость количества выделившихся летучих горючих компонентов (C, % НКПР) на обработанных образцах древесины огнезащитным составом 2-й группы огнезащитной эффективности фирмы «Сатин» двумя способами нанесения

Fig. 11. Dependence of the amount of volatile, combustible components released (C, % NKPR) on treated wood samples with a fire-retardant compound of the 2nd group of fire-retardant effectiveness of the "Satin" company by two methods of application

Результаты и их обсуждение

Как видно из зависимости (рис. 9), средние значения показателей выделяющихся летучих веществ при температуре 430 °C на необработанных образцах составляют 12 % при времени нагрева 10 секунд, доходят до 80 % и перестают расти после 60 секунд эксперимента.

Образцы древесины, пропитанные огнезащитным составом 1-й группы огнезащитной эффективности фирмы «Барьер», выделяют значительно меньше летучих горючих веществ, чем необработанный образец (рис. 10):

- способ послойного нанесения: 10 секунд — 1,7 %, 60 секунд — 7,6 %;
- способ пропитки в течение четырех часов: 10 секунд — 2 %, 60 секунд — 22 %.

Время пропитки практически не влияет на выделение летучих веществ.

Образцы древесины, пропитанные огнезащитным составом 2-й группы огнезащитной эффективности фирмы «Сатин», выделяют значительно меньше летучих горючих веществ, чем необработанный образец (рис. 11):

- способ послойного нанесения: 10 секунд — 1,8 %, 60 секунд — 9,6 %;
- способ пропитки в течение четырех часов: 10 секунд — 0,9 %, 60 секунд — 7,5 %.

Время пропитки практически не влияет на выделение летучих веществ.

Отметим, что образцы, обработанные способом пропитки составом фирмы «Сатин», выделяют значительно меньше летучих веществ, чем образцы, обработанные составом фирмы «Барьер». Возможно, это связано с разными связующими веществами этих огнезащитных составов.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что этим методом можно установить

предварительное качество огнезащитной обработки древесины, т. к. результаты испытаний необработанных и обработанных образцов разнятся в несколько раз.

Заключение

Предлагаемый способ оценки горючести отличается от существующих способов тем, что в целях обеспечения возможности минимального разрушения исследуемого объекта используется индукционный нагревательный элемент диаметром не более 8 мм. Нагрев осуществляется методом кондукции при фиксированной температуре и времени теплового воздействия непосредственно при контак-

те с индуктором, нагреваемым переменным магнитным полем. Стоит отметить, что данный способ не запатентован и находится на стадии разработки.

Для исследований предлагаемый способ позволит уменьшить размеры образца, а также даст возможность применения в полевых методах оценки качества огнезащитной обработки. Данный способ не требует специальной подготовки образцов и может применяться непосредственно на объекте без отбора образцов для дальнейших исследований в лабораторных условиях, т. е. рассматриваемый способ оценки качества огнезащитной обработки рекомендуем использовать в рамках пожарно-технических исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Становление огнезащитной обработки деревянных конструкций и зданий / А. Л. Хрулькевич [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 4 (31). С. 8–13.
2. Чудиновских Е. А., Юркин Ю. В. Эффективность защиты деревянных конструкций от огня и биоповреждений в многоквартирных жилых зданиях // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее : сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 370–374.
3. Петров А. М. К вопросу о методах огнебиозащитной обработки древесины // Наука, студенчество, образование: актуальные вопросы современных исследований : сборник статей IV Международной научно-практической конференции / отв. ред. Г. Ю. Гуляев. Пенза, 2023. С. 41–43.
4. Касымов Д. П., Агафонцев М. В., Перминов В. В. Оценка влияния огнезащитных составов на пожароопасные свойства некоторых типов строительных материалов из древесины // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научно-технической конференции. Воронеж, 2017. С. 1316–1320.
5. Intumescent fire-retardant coatings for ancient wooden architectures with ideal electromagnetic interference shielding / Ch. Liang et al. // Advanced Composites and Hybrid Materials. 2021. Vol. 4, № 4. Pp. 979–988.
6. Fire protection of wooden storage containers for explosive and pyrotechnic products / S. Guzii et al. // Eureka: Physics and Engineering. 2016. № 2. Pp. 34–42.

7. Колосова А. П. Лабораторный контроль загазованности помещений для обеспечения безопасности персонала тепловой электростанции на примере Ново-Кемеровской ТЭЦ // Россия молодая : сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. Кемерово, 2024. С. 73503.1–73503.7.

8. Сигнализатор-эксплозиметр термохимический СТХ-17 : руководство по эксплуатации 5B2.840.392-79 РЭ. 2007. 21 с. URL: <https://clck.ru/3QBEFJ> (дата обращения: 25.10.2025).

REFERENCES

1. The formation of fire-retardant treatment of wooden structures and buildings / A. L. Khrulkevich et al. // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2023. № 4 (31). Pp. 8–13.
2. Chudinovskikh E. A., Yurkin Yu. V. Effectiveness of protection of wooden structures from fire and biological damage in multi-apartment residential buildings // Actual issues of construction: a look into the future : a collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 40th anniversary of the creation of Engineering the Construction Institute. Krasnoyarsk, 2022. Pp. 370–374.
3. Petrov A. M. On the issue of methods of fire protection treatment of wood // Science, students, education: current issues of modern research : collection of articles of the IV International scientific and practical conference / ed. by G. Y. Gulyaev. Penza, 2023. Pp. 41–43.
4. Kasymov D. P., Agafontsev M. V., Perminov V. V. Assessment of the effect of flame retardants on the fire-hazardous properties of certain types of wood building materials // Actual problems of applied mathematics, computer science and mechanics : proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Voronezh, 2017. Pp. 1316–1320.
5. Intumescent fire-retardant coatings for ancient wooden architectures with ideal electromagnetic interference shielding / Ch. Liang et al. // Advanced Composites and Hybrid Materials. 2021. Vol. 4, № 4. Pp. 979–988.
6. Fire protection of wooden storage containers for explosive and pyrotechnic products / S. Guzii et al. // Eureka: Physics and Engineering. 2016. № 2. Pp. 34–42.
7. Kolosova A. P. Laboratory control of gas contamination of premises to ensure the safety of thermal power plant personnel using the example of Novo-Kemerovo CHPP // Molodaya Russia : collection of materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists with international participation. Kemerovo, 2024. Pp. 73503.1–73503.7.
8. Thermochemical explosion detector STX-17 : operation manual 5B2.840.392-79 RE. 2007. 21 p. URL: <https://clck.ru/3QBEFJ> (date of application: 25.10.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сысоева Татьяна Павловна, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России

(196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); РИНЦ ID: 3683-2066; Scopus Author ID: 57216502671; ResearcherID: AAE-9733-2022; ORCID: 0000-0003-0230-465; e-mail: syisik@mail.ru

Кухарев Александр Александрович, заместитель начальника отдела экспертизы пожаров и организации подготовки экспертов исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); SPIN-код: 6980-7904; AuthorID: 867246; e-mail: kukharev@mail.ru

Мусяенко Тамара Викторовна, д-р полит. наук, канд. истор. наук, доцент, профессор кафедры управления и экономики Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); SPIN-код: 2319-0146; AuthorID: 390246; e-mail: tvn77777@mail.ru

Агеев Павел Михайлович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела сертификации научно-технической продукции в области пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); SPIN-код: 5752-7937; AuthorID: 861997; e-mail: pageev72@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana P. Sysoeva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher at the Research Center for Fire Expertise of St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); RSCI ID: 3683-2066; Scopus Author ID: 57216502671; ResearcherID: AAE-9733-2022; ORCID: 0000-0003-0230-465; e-mail: syisik@mail.ru

Alexander A. Kukharev, Deputy Head of the Department of Fire Expertise and Expert Training at the Research Center for Fire Expertise of St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN code: 6980-7904; AuthorID: 867246; e-mail: kukharev@mail.ru

Tamara V. Musienko, Dr. Sci. (Polit.), Cand. Sci. (Hist.), Associate Professor, Professor of the Department of Management and Economics of St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN code: 2319-0146; AuthorID: 390246; e-mail: tvn77777@mail.ru

Pavel M. Ageev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Department of Certification of Scientific and Technical Products in the field of fire Safety at St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN code: 5752-7937; AuthorID: 861997; e-mail: pageev72@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.05.2025
Одобрена после рецензирования 05.09.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 614.849

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОГНЕЗАЩИТНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Аносова Евгения Борисовна, Блохин Андрей Александрович, Ляшенко Сергей Михайлович, Михайлова Софья Максимовна

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. Огнезащитная эффективность лакокрасочных покрытий (ЛКП) зависит не только от их состава и проявляемых огнезащитных свойств, но и от эксплуатационных характеристик, определяющих срок службы и качество покрытий. Стандартные методы испытаний современных строительных красок не включают адгезионную стойкость и прочности как обязательные критерии оценки эффективности защиты древесных и металлических элементов зданий и сооружений. В настоящей работе проведено комплексное исследование двух ЛКП, обладающих, согласно заявленным производителем характеристикам, первой группой огнезащиты. Одно из покрытий предназначено для огнезащиты дерева, другое — для металла. Испытания включали оценку их адгезионных свойств и твердости, согласно стандартным методам испытаний, описанных в ГОСТах. Установлено, что нанесение краски на древесину способствует повышению дымообразования защищаемого таким образом материала. В то же время лакокрасочные покрытия проявляют эффективные эксплуатационные характеристики, что позволяет использовать их как декоративные для окраски мокрых фасадов, оград и т. п. Полученные в исследовании данные могут быть использованы при разработке мер противопожарной защиты, а также учтены при разработке производителем рекомендаций, касающихся области применения ЛКП.

Ключевые слова: лакокрасочные покрытия, огнезащита, адгезия, прочность, интумесцентные свойства, дымообразование, синхронный термический анализ

Для цитирования: Влияние характеристик лакокрасочных покрытий на их огнезащитные и эксплуатационные свойства и область применения / Е. Б. Аносова [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 38–50.

THE INFLUENCE OF PAINT AND VANISH COATING CHARACTERISTICS ON THEIR FLAME-RETARDANT AND OPERATIONAL PROPERTIES AND SCOPE OF APPLICATION

Evgeniya B. Anosova, Andrey A. Blokhin, Sergey M. Lyashenko, Sofya M. Mikhailova
Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The flame-retardant effectiveness of paint and varnish coatings depends not only on their composition and flame-retardant properties, but also on the operational characteristics that determine the service life and quality of coatings. Standard test methods for modern building paints do not include an assessment of adhesion resistance and strength when evaluating the effectiveness of protection of wood and metal elements of buildings and structures as a mandatory element.

In this work, a comprehensive study of paint coatings is carried out, which, according to the characteristics stated by the manufacturer, have the first group of fire protection for wood and metal, including an assessment of their adhesive properties and hardness, according to standard test methods to standard methods of state standards. It is found that applying paint to wood increases the smoke generation of the material thus protected. At the same time, paint and varnish coatings exhibit good performance properties, which allows them to be used as decorative for painting wet facades and fences. The data obtained in the study can be used in the development of fire protection measures, as well as taken into account in the development of recommendations for the application of paintwork.

Keywords: paint and varnish coatings, fire protection, adhesion, strength, intumescent properties, smoke generation, synchronous thermal analysis

For Citation: The influence of paint and varnish coating characteristics on their flame-retardant and operational properties and scope of application / E. B. Anosova et al. // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 38–50.

Введение

Древесина и металл являются распространенными и доступными материалами, нашедшими широкое применение в гражданском строительстве, поэтому их эксплуатационные и пожароопасные свойства — предмет пристального внимания специалистов в области пожарной безопасности [1, 2].

Древесина всегда обрабатывается огнезащитными пропитками, отделывается штукатуркой, покрывается лакокрасочными материалами. Металлические конструкции, не являясь горючими, тем не менее, в случае повышенного теплового воздействия деформируются, становятся пластичными и нарушают целостность строения в течение 15 минут после начала пожара.

Таким образом, огнезащитные мероприятия актуальны как для горючих, так и негорючих элементов и конструкций зданий и сооружений, использующихся при строительстве гражданских зданий.

Одним из простых в исполнении и недорогих способов огнезащиты является нанесение лакокрасочных покрытий (далее — ЛКП) на защищаемые поверхности. При использовании данного способа не утяжеляется конструкция здания, как в случае оштукатуривания, и не требуется дополнительных строительных работ, как в случае создания облицовок и экранов. Кроме того, применение ЛКП не подразумевает наличия навыков строительства и монтажа. Поэтому применение данного вида снижения пожарной опасности будет, вероятно,

наиболее распространено в частном секторе гражданского строительства, характеризующемся повышенной пожарной опасностью [3].

Эффективность действия ЛКП элементов строительных конструкций зависит не только от их состава и поведения при повышенной температуре. Такие эксплуатационные характеристики, как твердость, прочность, адгезионная способность являются показателями того, как долго и результативно лакокрасочные покрытия могут защищать здания и сооружения в течение срока их функционирования.

Внешние воздействия — химические и фотохимические процессы, происходящие на свету и при воздействии кислорода и влаги воздуха, сезонные изменения климата, жизнедеятельность микроорганизмов и т. п. — снижают срок службы огнезащитных покрытий и уменьшают действенность ЛКП в случае повышенных температур. Преобладающее из перечисленных воздействий будет определяющим для срока службы покрытия. Согласно ГОСТ Р 59637–2021 срок службы огнезащитного покрытия должен быть не менее 10 лет. При этом должны оцениваться не только огнезащитные характеристики, но и изменения внешнего вида покрытия.

Способность замедлять распространение пламени по конструкционным элементам, вплоть до полного прекращения горения, может быть связана со свойством ЛКП, влияющим на людей и окружающую среду, — повышенным дымообразованием. Кроме того, много пожарно-технической продукции в настоящий момент подвергается фальсификации, поэтому оценка индивидуальных свойств и характеристик пожароопасности лакокрасочных покрытий является актуальной [4–6].

В работе [7] приведено сопоставление вязкости лакокрасочных продуктов и их способности к дымообразованию и токсичности продуктов термического разложения. Авторы пришли к выводу, что огнезащитное покрытие может способствовать как снижению, так и повышению выхода токсичных продуктов горения и дымообразования.

Токсичности продуктов термического распада огнезащитных красок посвящены работы [8, 9], а причинам нарушения качества интумесцентных покрытий для стали — работы [10–14].

Авторы [15–20] отмечают влияние на эффективность применения огнезащитных вспучивающихся покрытий многих факторов: старение, химический состав, комбинации с другими составами, стойкость к атмосферным воздействиям.

В настоящей работе исследованы два образца огнезащитной краски по древесине и металлу на основе акрила. Для обоих материалов производителем заявлена первая степень огнестойкости, соответствующая низкому уровню горючести.

Лакокрасочное покрытие по металлу, согласно данным производителя, представляет собой комплексную композицию с многочисленными ингредиентами, включающую в себя функциональные добавки, пигменты и интумесцентные наполнители в виде суспензии. При воздействии высоких (свыше 200 °C) температур покрытие демонстрирует свои защитные свойства: оно увеличивается в объеме, создавая теплоизолирующий пористый барьер, что обеспечивает огнезащиту металлических конструкций. Изделие предназначено для защиты металлических элементов от огня в строительстве как гражданских, так и промышленных объектов и предназначено

для использования внутри зданий или под навесами, а также на открытом воздухе.

Базовый оттенок — белый, с возможностью тонирования в нежные пастельные цвета. Материал можно наносить при температуре не ниже +5 °С. При хранении в оригинальной упаковке производитель гарантирует сохранение свойств в течение 12 месяцев.

Лакокрасочное покрытие по дереву предназначено для использования во время внутренних и наружных отделочных работ для обработки поверхностей из дерева, бетона, фанеры, ДСП и ДВП. При нанесении образует прочную защитную пленку, предотвращающую вымывание био- и огнезащитных компонентов краски.

Краска содержит специальные активные добавки от биологических поражений — гнили, мха, плесени, водорослей и грибка. Под воздействием высоких температур состав образует вспененный теплоизолирующий слой, предотвращающий дальнейшее распространение огня.

Целью настоящей работы является оценка огнезащитных и эксплуатационных характеристик двух образцов огнезащитной краски для металла и древесины для разработки рекомендаций, касающихся области их применения.

Материалы и методы

Для идентификации свойств, проявляемых огнезащитными материалами при термическом воздействии на них, информативным и наглядным является метод синхронного термического анализа (СТА).

Представляют интерес следующие параметры, характеризующие поведение материала при термическом воздействии:

- на кривой ТГ — температура начала термического уменьшения массы, характеризующая минимальную температуру, при которой в образце исследованного материала начинаются процессы, сопровождающиеся выделением газо- и парообразных продуктов, создающих концентрацию, способную вспыхнуть или воспламениться от источника зажигания;
- на кривой ДТГ — максимальная скорость уменьшения массы, соответствующая в отдельных случаях значению температуры воспламенения либо самовоспламенения, в зависимости от свойств исследуемого материала;
- на кривой ТГ — зольный остаток, т. е. масса вещества, оставшаяся после воздействия повышенных температур (сгорания), соответствующая негорючей части материала. Чем выше содержание зольного остатка, тем менее горюч исследуемый образец;
- на кривой ДСК — температура начала и максимума экзотермических эффектов — параметров, характеризующих начало экзотермических процессов, сопровождающих термическое разложение материала, способных привести к самовоспламенению, а также максимальную скорость их прохождения.

Для оценки эксплуатационных характеристик лакокрасочных покрытий — твердости и адгезионной способности — в Российской Федерации разработаны ГОСТ Р 54586–2011 «Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытия по карандашу» и ГОСТ 31149–2014 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза».

Критерием оценки твердости согласно ГОСТ Р 54585–2011 служит сопротивление внешнего слоя ЛКП воздействию карандаша с грифелем различной твердости и виды деформаций, оставляемые им на поверхности лакокрасочного покрытия: вмятины, царапины, нарушение сплошности. Карандаши для испытаний должны обладать твердостью от 9В (наименьшая) до 9Н (наивысшая). За твердость покрытия принимают твердость карандаша самой высокой твердости, не оставившего повреждений на поверхности слоя краски.

Адгезия лакокрасочных покрытий согласно ГОСТ 31149–2014 оценивается по результатам испытаний, в ходе которых производится

воздействие на поверхность слоя краски острым режущим предметом. Оценка адгезионной способности ЛКП производится в баллах от 0 до 5, где 0 подразумевает высокую адгезию к поверхности, а 5 — отсутствие адгезии.

Определение дымообразующей способности материалов проводится согласно методике ГОСТ 12.1.044–2018 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» на установке, соединенной с компьютером. Вычисление коэффициента дымообразования проводится по формуле:

$$D_m = \frac{V}{Lm} \ln \frac{T_0}{T_{min}},$$

где:

V — вместимость камеры измерения, м^3 ;

L — длина пути луча света в задымленной среде, м ;

m — масса образца, кг ;

T_0, T_{min} — соответственно значения начального и конечного светопропускания, %.

Результаты исследования и их обсуждение

Испытания с применением метода СТА образцов огнезащитного ЛКП для древесины и металла проводились с использованием синхронного термического анализатора STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Германия).

Были получены графические зависимости, обработка которых проводилась с применением программного обеспечения Netzsch Proteus Thermal Analysis.

На рис. 1 представлены кривые СТА огнезащитного ЛКП, предназначенного для металла. В табл. 1–2 приведено описание результатов анализа согласно ГОСТ Р 53293–2009 «Пожарная опасность веществ и мате-

риалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа».

Условия испытания: скорость нагрева — 20 К/мин, атмосфера внутри печи — воздух, масса навесок — несколько миллиграмм (3–5 мг).

Температура начала уменьшения массы составила 200 °С.

Зольный остаток, по данным кривой ТГ, составил 43,7 %, что может свидетельствовать о высокой термической стойкости покрытия, нанесенного на металлическую пластину.

Максимальной скоростью уменьшения массы характеризуется пик в интервале температур 280–400 °С.

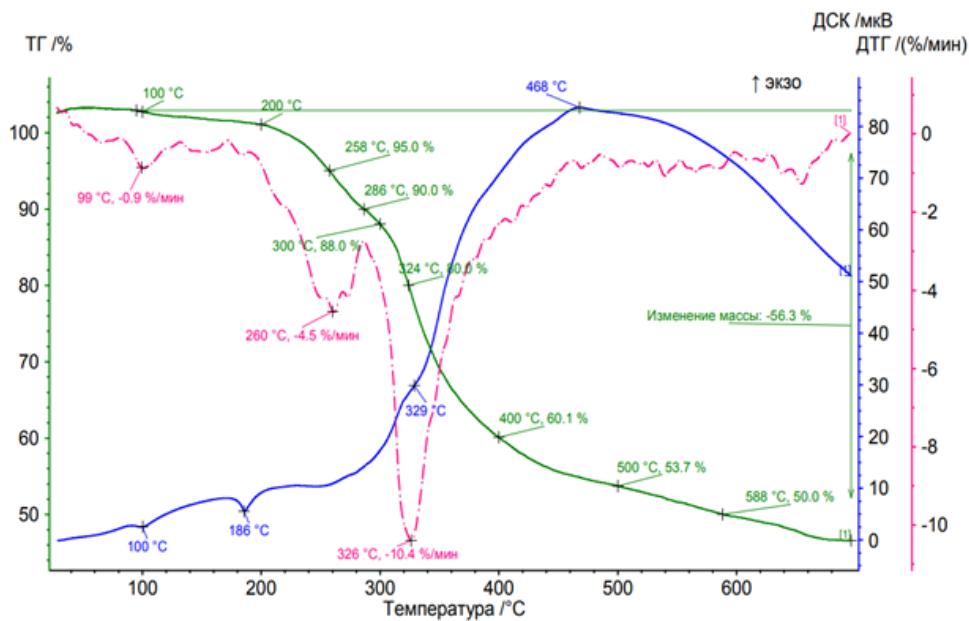


Рис. 1. Термограмма огнезащитного лакокрасочного покрытия для металла
Fig. 1. Thermogram of flame-retardant paint coating for metal

Таблица 1
Степень превращения ω при температуре $^{\circ}\text{C}$

Table 1
Degree of transformation ω at temperature $^{\circ}\text{C}$

$t, ^{\circ}\text{C}$	100	200	300	400	500	600
$\omega_{\text{ср}}, \%$	0	13	12	39,9	46,3	50
$\omega_{\text{average}}, \%$						

Таблица 2
Характеристика максимумов скорости превращения

Table 2
Characteristics of the transformation rate maximas

$t_{\text{max}}, ^{\circ}\text{C}$	99	260	326
$\omega, \%/ \text{мин}$	0,9	4,5	10,4
$\omega, \%/ \text{min}$			

Анализ кривой ДСК свидетельствует о существовании двух эндотермических пиков при температурах 100 и 186 $^{\circ}\text{C}$, соответствующих испарению влаги и вскипанию органических компонентов ЛКП, и экзотермического пика, соответствующего процессу интумесценции с образованием пенококсового слоя, с максимумом при температуре 468 $^{\circ}\text{C}$.

В результате испытаний методами термического анализа краски интерьерной огнезащитной по дереву также были полу-

чены графические зависимости. Условия испытания: скорость нагрева — 10 К/мин, атмосфера внутри печи — воздух, масса навесок — несколько миллиграмм (3–5 мг) (рис. 2).

В табл. 3–4 приведено описание результатов анализа согласно ГОСТ Р 53293–2009 «Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа».

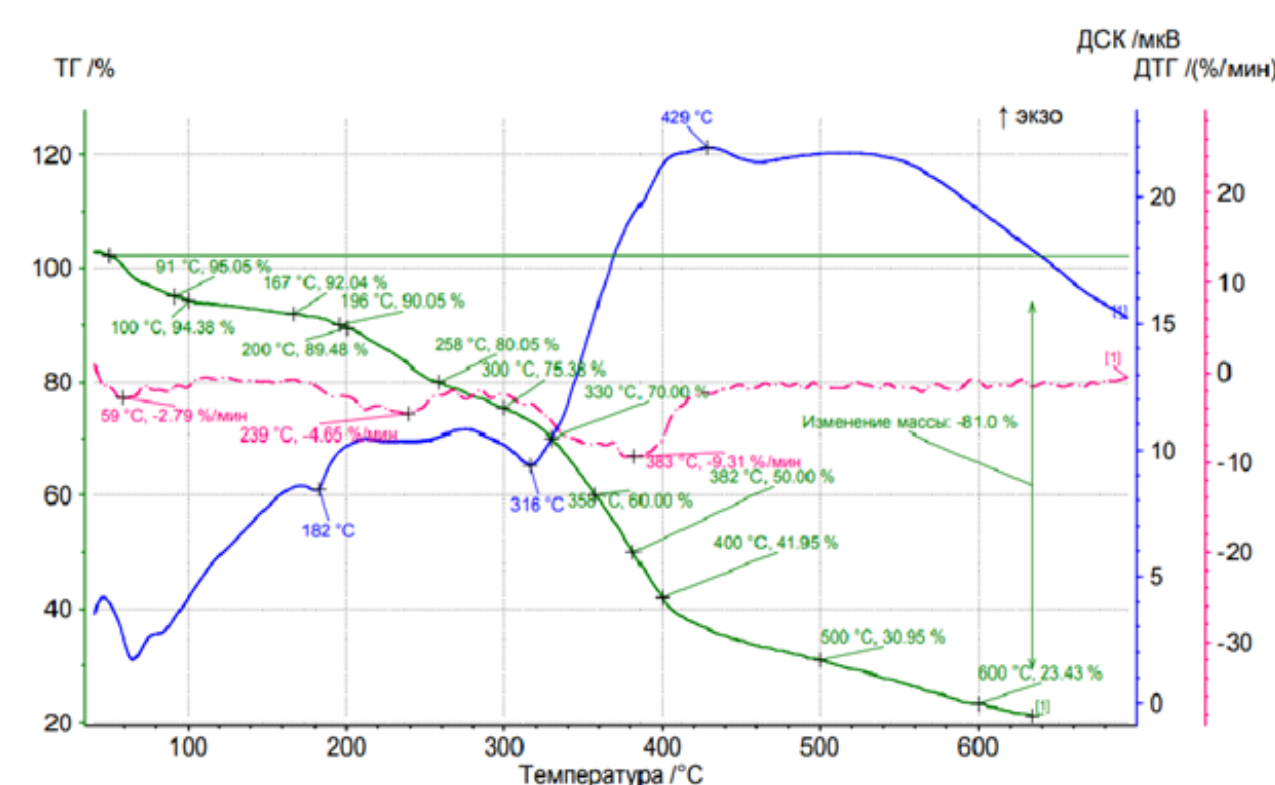


Рис. 2. Термограмма огнезащитного лакокрасочного покрытия для дерева

Fig. 2. Thermogram of fire-resistant coating for wood

Таблица 3
Степень превращения ω при температуре $^{\circ}\text{C}$

Table 3
 Degree of transformation ω at temperature $^{\circ}\text{C}$

$t, ^{\circ}\text{C}$	100	200	300	400	500	600
$\omega_{\text{cp}}, \%$ $\omega_{\text{average}}, \%$	5,6	10,5	24,6	58	69,1	76,6

Таблица 4
Характеристика максимумов скорости превращения

Table 4
 Characteristics of the transformation rate maximas

$t_{\text{max}}, ^{\circ}\text{C}$	59	239	383
$\omega, \%/ \text{мин}$ $\omega, \%/ \text{min}$	2,8	4,6	9,3

На представленных кривых СТА образца зольный остаток, определенный по кривой ТГ, составил 19 %. Начало уменьшения массы образца совпало со временем начала нагревания.

Анализ кривой ДСК свидетельствует о существовании двух эндотермических

пиков, соответствующих, по-видимому, испарению влаги и вскипанию органической части ЛКП, с максимумами при температурах 182 и 316 $^{\circ}\text{C}$.

Процесс интумесценции с образованием пенококсового слоя происходит в интервале 320–450 $^{\circ}\text{C}$, достигая максимума при 429 $^{\circ}\text{C}$.

И для покрытия по дереву, и для покрытия по металлу процесс интумесценции связан с процессом тепловыделения при выгорании связующего огнезащитного покрытия и полной карбонизацией состава с одновременным переходом в стадию горения пенококка.

Таким образом, предварительные исследования с применением метода СТА подтверждают наличие у рассмотренных лакокрасочных покрытий огнезащитного эффекта, проявляющегося в виде многократного увеличения в объеме при повышении температуры и создания негорючего пенококсового слоя.

Для оценки эксплуатационных свойств исследованных покрытий были проведены испытания их твердости и адгезионной способности.

С целью определения твердости покрытий согласно ГОСТ Р 54586–2011 для проведения испытания был взят брусок сосны (сорт АВ, размер 20 × 20 × 60 мм) и пластина металла (сталь) (0,2 × 200 × 100 мм). Толщина лакокрасочного покрытия на древесном бруске составила 150 мкм. Толщина огнезащитной краски на металле составила 180 мкм. Полученные результаты представлены на рис. 3.

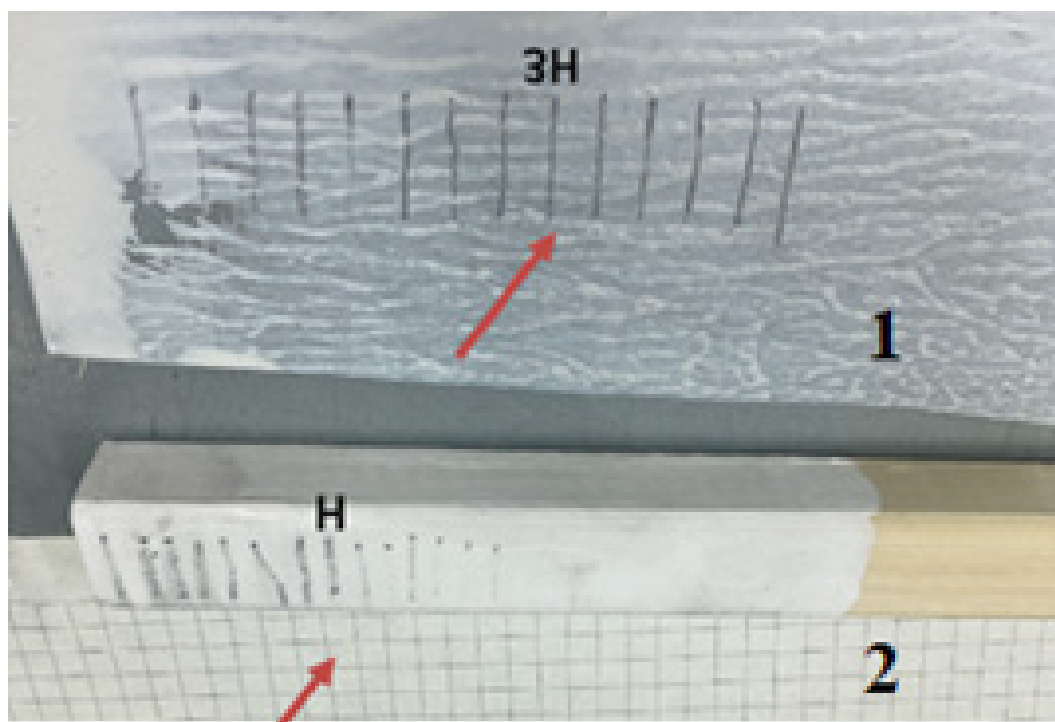


Рис. 3. Фотография результатов испытаний определения твердости покрытия по карандашу покрытий по металлу (1) и деревине (2)

Fig. 3. A photograph of the tests using the method of determining the hardness of the coatings for metal (1) and wood (2) by pencil

На бруске образец соответствует твердости «Н». На металле слой огнезащитной краски соответствует твердости «3Н».

Далее был исследован внешний вид поверхности надрезов испытываемых покрытий на деревянном бруске и стальной пластине для определения адгезии методом решет-

чатого надреза. В результате испытаний и краски по дереву, и краски по металлу произошло отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоения немного превышает 5 % площади решетки. Классификация в баллах — 1. Результаты показаны на рис. 4.

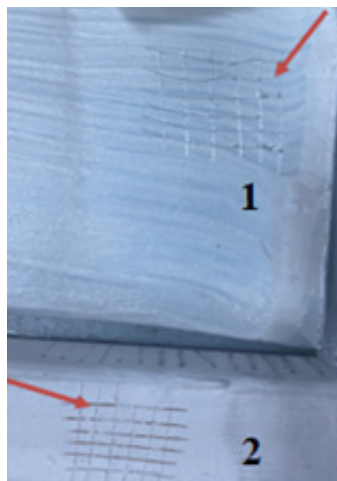


Рис. 4. Фотография результатов определения адгезии покрытия, нанесенного на металл (1) и дерево (2), полученных методом решетчатого надреза

Fig. 4. A photograph of the results of the determination of adhesion by the lattice incision method of the coatings for metal (1) and wood (2)

Таким образом, лакокрасочные покрытия по металлу и древесине имеют высокий показатель адгезии и проявляют эффективные эксплуатационные свойства.

Далее испытания проводились на тех же образцах древесины и металла с нанесенным вторым слоем огнезащитной краски, в лабораторных условиях при температуре 23 °С, относительной влажности 50 %. При измерении твердости согласно ГОСТ Р 54586–2011 получены следующие результаты: на бруске дерева твердость составила «Н», на металле — «3Н».

Таким образом, при нанесении второго слоя огнезащитной краски на исследуемые образцы твердость ЛКП не изменилась.

При определении адгезии методом решетчатого надреза согласно ГОСТ 31149–2014 на образцах деревянного бруска и металлической пластине с нанесенной на них вторым слоем огнезащитной краской, в соответствии с классификацией результатов испытаний, произошло отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоения на дереве немного превышает 5 % площади решетки [16]. Классификация в баллах — 1. Площадь отслоения на металле

немного превышает 5 % площади решетки [16]. Классификация в баллах — 0.

Таким образом, данные лакокрасочные покрытия имеют высокие показатели твердости и адгезии и в случае нанесения их на дерево, и в случае нанесения на металл.

Определение дымообразующей способности образцов ЛКП проводилось согласно методике ГОСТ 12.1.044–2018 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» на установке, соединенной с компьютером.

Было проведено испытание образца лакокрасочного материала, нанесенного на древесину, а также нативной древесины. Согласно полученным данным, коэффициент дымообразования (D_m) для нативной древесины составил $481 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ — умеренная группа дымообразования (Д2), а для древесины с нанесенным покрытием — $618 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ — высокая группа дымообразования (Д3).

Поскольку для вестибюлей, лестничных клеток, коридоров, фойе допускается применять отделочные материалы классов с умеренной дымообразующей способностью [21],

использовать данное огнезащитное покрытие внутри помещения не рекомендуется.

Выводы

1. Проведение термического анализа рассмотренных образцов лакокрасочных покрытий позволило установить характеристики, влияющие на их огнезащитную способность: высокий процент зольного остатка, образование пенококсового слоя при повышении температуры.

2. Исследованные образцы ЛКП проявляют хорошие эксплуатационные свойства (высокую адгезию, твердость) при нанесении как на металлические, так и на деревянные элементы.

3. Ввиду высокого дымообразования краска для древесины не может применяться в помещениях и на путях эвакуации. Данный образец лакокрасочного покрытия может быть применен в качестве декоративной отделки фасада и для наружных работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савельев А. П., Шабарин А. А., Федорова А. А. Повышение огнестойкости зданий и сооружений за счет применения средств огнезащиты // Материалы XXII Научно-практической конференции молодых ученых и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева. Саранск, 2018. С. 374–379.

2. Пчельников А. В., Пичугин А. П. Наномодификация защитных покрытий металлических конструкций и оборудования для обеспечения эксплуатационной стойкости // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1. С. 116–120.

3. Проблемы прогнозирования срока службы тонкослойных огнезащитных покрытий / С. Н. Булага [и др.] // Пожарная безопасность. 2015. № 1. С. 84–91.

4. Богданова В. В., Кобец О. И. Исследование влияния термических превращений компонентов вспениваемых композиций на их огнестермозащитные свойства // Горение и взрыв. 2020. № 4. С. 108–115.

5. Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: A review / M. Yasir et al. // Surf. Eng. 2020. Vol 36, № 4. Pp. 334–363.

6. Intumescent polypropylene: Reaction to fire and mechanistic aspects / S. Bourbigot et al. // Fire Safety J., 2019. Vol. 105. Pp. 261–269.

7. Влияние лакокрасочных материалов на дымообразующую способность и токсичность продуктов горения древесины / М. М. Альмендбаев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2015. № 3, Т. 23. С. 23–29.

8. Пузач С. В., Доан В. М., Нгуен Т. Д. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении : монография. М., 2017. 130 с.

9. Сосков А. А., Пронин Д. Г. Огнезащита стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 57–59.

10. Мартынов А. В., Греков В. В., Попова О. В. Некоторые причины нарушения качества интумесцентных покрытий // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 11. С. 69–75.
11. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe structures: A review // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 162. P. 105712.
12. Marriappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review // Journal of Fire Sciences. 2016. Vol. 34 (2). Pp. 120–163.
13. Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity / G.-Q. Li et al. // Thin-Walled Structures. 2016. Vol. 98. Pp. 177–184.
14. Li G.-Q., Han J., Wang Y. C. Constant effective thermal conductivity of intumescent coatings: Analysis of experimental results // Journal of Fire Sciences. 2017. Vol. 35 (2). Pp. 132–135.
15. Проблемы и тенденции в области огнезащитных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. 2019. № 11. С. 10–12.
16. Сабирзанова Р. Н. Исследование влияния составляющих компонентов вспучивающегося антипирена на огнестойкие свойства материалов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 2. С. 20–26.
17. Огнезащитные покрытия: последние разработки в функциональных покрытиях, которые действительно спасают жизни / К. Бод [и др.] // Лакокрасочные материалы и их применение. 2017. № 6. С. 20–26.
18. Евтушенко Ю. М., Тоиров С. Х., Шевченко Н. Н. Огнезащита стальных конструкций // Перспективные материалы. 2024. № 7. С. 5–17.
19. Исследование старения огнезащитных вспучивающихся покрытий методами СЭМ, XRD и ИК-спектроскопии / М. Ю. Умирхина [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2020. № 5. С. 60–70.
20. Мельдер Е. В., Сивенков А. Б. Эффективность комбинации интумесцентных покрытий для огнезащиты стальных конструкций // Технологии техносферной безопасности. 2020. Вып. 1 (95). С. 49–65.
21. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон № 123 : принят Государственной Думой 04.07.2008 : одобрен Советом Федерации 11.07.2008 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 24.10.2025).

REFERENCES

1. Savelyev A. P., Shabarin A. A., Fedorova A. A. Increasing the fire resistance of buildings and structures through the use of fire protection equipment // Materials of the XXII Scientific and practical conference of young scientists and students of the National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev. Saransk, 2018. Pp. 374–379.
2. Pchelnikov A. V., Pichugin A. P. Nanomodification of protective coatings of metal structures and equipment to ensure operational stability // Expert: Theory and Practice. 2023. № 1. Pp. 116–120.
3. Problems of forecasting the service life of thin-layer flame-retardant coatings / S. N. Bulaga et al. // Fire Safety. 2015. № 1. Pp. 84–91.

4. Bogdanova V. V., Kobets O. I. Investigation of the effect of thermal transformations of components of foamed compositions on their fire-thermal properties // Combustion and explosion. 2020. № 4. Pp.108–115.
5. Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: A review / M. Yasir et al. // Surf. Eng. 2020. Vol 36, № 4. Pp. 334–363.
6. Intumescent polypropylene: Reaction to fire and mechanistic aspects / S. Bourbigot et al. // Fire Safety J., 2019. Vol. 105. Pp. 261–269.
7. The effect of paint and varnish materials on the smoke-forming ability and toxicity of wood gorenje products / M. M. Almendbaev et al. // Fire safety. 2015. № 3, vol. 23. Pp. 23–29.
8. Puzach S. V., Doan V. M., Nguyen T. D. Formation, distribution and human impact of toxic combustion products in case of fire in an indoor environment : monograph. M., 2017. 130 p.
9. Soskov A. A., Pronin D. G. Fire protection of steel structures // Industrial and civil engineering. 2015. № 7. Pp. 57–59.
10. Martynov A. V., Grekov V. V., Popova O. V. Some reasons for the violation of the quality of intumescent coatings // Occupational safety in industry. 2020. № 11. Pp. 69–75.
11. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe structures: A review // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 162. P. 105712.
12. Marriappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review // Journal of Fire Sciences. 2016. Vol. 34 (2). Pp. 120–163.
13. Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity / G.-Q. Li et al. // Thin-Walled Structures. 2016. Vol. 98. Pp. 177–184.
14. Li G.-Q., Han J., Wang Y. C. Constant effective thermal conductivity of intumescent coatings: Analysis of experimental results // Journal of Fire Sciences. 2017. Vol. 35 (2). Pp. 132–135.
15. Problems and trends in the field of flame-retardant coatings // Paint and varnish materials and their application. 2019. № 11. Pp. 10–12.
16. Sabirzanova R. N. Investigation of the effect of the components of a bulging flame retardant on the fire-resistant properties of materials // Bulletin of the Technological University. 2015. Vol. 18, № 2. Pp. 20–26.
17. Flame-retardant coatings: the latest developments in functional coatings that really save lives / K. Bod [et al.] // Paint and varnish materials and their application. 2017. № 6. Pp. 20–26.
18. Yevtushenko Yu. M., Toirov S. Kh., Shevchenko N. N. Fire protection of steel structures // Promising materials. 2024. № 7. Pp. 5–17.
19. Investigation of aging of flame-retardant bulging coatings by SEM, XRD and IR spectroscopy methods / M. Yu. Umirkhina et al. // Fire and explosion safety. 2020. № 5. Pp. 60–70.
20. Melder E. V., Sivenkov A. B. Effectiveness of a combination of intumescent coatings for fire protection of steel structures // Technologies of Technosphere Safety. 2020. № 1 (95). Pp. 49–65.
21. Technical Regulations on Fire Safety Requirements : Federal Law № 123 : adopted by the State Duma on 04.07.2008 : approved by the Federation Council on 11.07.2008 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (date of application: 24.10.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аносова Евгения Борисовна, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); ORCID ID: 0000-0001-8001-4821; РИНЦ ID: 753731; e-mail: evgenia.anosowa@yandex.ru

Блохин Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); РИНЦ ID: 820279; e-mail: a.blokhin@agz.50.mchs.gov.ru

Ляшенко Сергей Михайлович, канд. воен. наук, доцент, заведующий кафедрой пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); РИНЦ ID: 732824; e-mail: sergeu-l@yandex.ru

Михайлова София Максимовна, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); РИНЦ ID: 832151; e-mail: notalone-s@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniya B. Anosova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A, Sokolovskaya, Khimki, 141435 Russian Federation); e-mail: evgenia.anosowa@yandex.ru

Andrey A. Blokhin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A, Sokolovskaya, Khimki, 141435 Russian Federation); e-mail: a.blokhin@agz.50.mchs.gov.ru

Sergey M. Lyashenko, Cand. Sci. (Mil.), Associate Professor, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A, Sokolovskaya, Khimki, 141435 Russian Federation); e-mail: sergeu-l@yandex.ru

Sofia M. Mikhailova, Senior Lecturer, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A, Sokolovskaya, Khimki, 141435 Russian Federation); e-mail: notalone-s@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.03.2025
Одобрена после рецензирования 03.07.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 614.84

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Беззапонная Оксана Владимировна¹, Козионов Алексей Викторович², Вакарин Евгений Владимирович¹, Магомедов Омар Гасаналиевич¹

¹ Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Свердловской области, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрены методические подходы к оценке показателей пожарной опасности (температуры самовоспламенения и теплоты сгорания) полимерных материалов различной химической природы. Приведены результаты исследований полимерных материалов различной химической природы с использованием термоанализатора STA 449 F5 Jupiter фирмы Netzsch. Показана возможность оценки температуры самовоспламенения с использованием сразу трех аналитических сигналов: дифференциальной сканирующей калориметрии, дифференциальной термогравиметрии и первой производной от дифференциальной сканирующей калориметрии. Для диагностики температуры самовоспламенения методом синхронного термического анализа необходимо выполнение следующих условий: нахождение в интервале температур экзотермического пика термоокислительной деструкции полимера; близость к точке перегиба на ДСК-кривой; близость к максимуму ДТГ-пика; максимальная интенсивность тепловыделения.

Рассмотрена проблема оценки теплоты сгорания веществ и материалов. Для повышения практической значимости результатов оценки теплоты сгорания предложен способ оценки теплоты сгорания методом синхронного термического анализа в окислительной среде воздуха с учетом результатов испытаний исследуемого материала в инертной среде.

Ключевые слова: пожарная безопасность, полимерные материалы, температура самовоспламенения, метод синхронного термического анализа

Для цитирования: К вопросу оценки показателей пожарной опасности полимерных материалов методом синхронного термического анализа / О. В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 51–63.

ON THE QUESTION OF ASSESSING FIRE HAZARD INDICATORS OF POLYMERIC MATERIALS BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS

Oksana V. Bezzaponnaya¹, Alexey V. Kozionov², Evgeniy V. Vakarin¹, Omar G. Magomedov¹

¹ Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Russian Federation

Abstract. materials of various chemical natures using the STA "Netzsch" 449 F 5 Jupiter thermal analyzer are presented. The feasibility of assessing the autoignition temperature using three analytical signals simultaneously is demonstrated: differential scanning calorimetry, differential thermogravimetry, and the first derivative of differential scanning calorimetry. To diagnose the autoignition temperature using the synchronous thermal analysis method, the following conditions must be met: being in the temperature range of the exothermic peak of thermo-oxidative destruction of the polymer; proximity to the inflection point on the DSC-curve; proximity to the maximum of the DTG-peak; maximum heat release intensity.

The problem of assessing the heat of combustion of substances and materials is also considered. To enhance the practical significance of heat of combustion assessment results, a method for assessing the heat of combustion using synchronous thermal analysis in an oxidizing air environment is proposed, taking into account the results of testing the material under study in an inert atmosphere.

Keywords: fire safety, polymeric materials, autoignition temperature, synchronous thermal analysis method

For Citation: On the question of assessing fire hazard indicators of polymeric materials by the method of synchronous thermal analysis / O. V. Bezzaponnaya et al. // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 51–63.

Введение

Точность определения показателей пожарной опасности веществ и материалов имеет важное значение, особенно при производстве пожарно-технической экспертизы. Для решения данной задачи применяются стандартные методы в соответствии с ГОСТ 12.1.044–2018 «ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы определения», фактическая погрешность некоторых из них зачастую превышает 10 %. Практически не применяются современные и информативные инструментальные методы, в частности метод синхронного термического анали-

за (далее — СТА), ввиду отсутствия разработанных методик. Между тем метод СТА характеризуется высокой точностью полученных результатов (погрешность определения температуры не превышает 1,5 %, а теплового эффекта фазовых переходов — 3 %) и информативностью. За одно испытание представляется возможным получить большой объем информации, т. к. одновременно определяются и термогравиметрические характеристики (потеря массы, зольный или коксовый остаток, скорость потери массы) исследуемого материала и термохимические характеристики (тепловой эффект, удельный тепловой поток, изменение теплоемкости). При этом метод характеризуется высоким уровнем автома-

тизации в управлении экспериментом. Все это свидетельствуют о целесообразности применения метода СТА для определения показателей пожарной опасности твердых веществ и материалов, а разработка методических подходов для оценки пожароопасных свойств веществ и материалов с использованием инструментов СТА является актуальной задачей.

Поскольку в последнее время полимерные материалы находят все более широкое применение в качестве отделочных строительных материалов, а также материалов для изготовления предметов интерьера и быта, актуальность вопроса оценки их пожароопасных свойств не вызывает сомнений.

Полимерные материалы характеризуются высокой пожарной опасностью, особенно термопласты, которые в температурных условиях развившегося пожара способны плавиться, растекаться, возгораться и капать, формируя вторичные очаги пожара [1]. Исследователями предпринимались попытки оценки пожароопасных свойств полимерных материалов с использованием методов термического анализа [2–4]. Большое внимание уделяется также определению кинетических параметров термоокислительной деструкции (далее — ТОД) полимеров методом динамической термогравиметрии [5–10] для дальнейшей оценки возможности их возгорания в температурных условиях пожара.

Температура самовоспламенения — важный показатель пожарной опасности (далее — ППО) веществ и материалов. В соответствии с ГОСТ 12.1.044–2018 температура самовоспламенения — это наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных ис-

пытаний наблюдается самовоспламенение вещества. При этом самовоспламенение характеризуется резким увеличением скорости экзотермических объемных реакций, что приводит к возникновению пламенного горения или взрыва. В связи с этим, логично, что для определения температуры самовоспламенения необходим аналитический сигнал, характеризующий скорость тепловыделения. Причем для экспертных исследований погрешность определения данной характеристики не должна превышать 3 %.

Всем этим требованиям отвечает метод СТА, в котором с помощью кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (далее — ДСК) регистрируется тепловой поток, а также существует возможность получения первой производной ДСК-кривой (dДСК-кривой). По максимуму dДСК-кривой можно точно оценить температуру, при которой происходит резкое увеличение скорости исследуемого экзотермического процесса, что характерно для процесса самовоспламенения веществ и материалов. При этом погрешность определения значений температуры методом СТА не превышает 1,5 %. Кроме этого, учитывая тот факт, что для самовоспламенения исследуемого вещества необходимо выделение горючих паров или газов в результате термического разложения исследуемого вещества (материала), на термогравиметрической кривой (далее — ТГ-кривой) в температурном интервале протекания процесса окислительной деструкции будет наблюдаться потеря массы веществом, а на кривой дифференциальной термогравиметрии (далее — dТГ-кривой) — пик, характеризующий максимальную скорость выделения горючих газов. То есть метод СТА обладает всем необ-

ходимым инструментарием для точной оценки такого важного ППО, как температура самовоспламенения.

В работе [11] приведены результаты исследований полимерных материалов для разработки методического подхода оценки температуры самовоспламенения методом СТА. В результате исследований было установлено, что для диагностики температуры самовоспламенения необходима проверка выполнения нескольких условий: нахождение проверяемого значения температуры в интервале экзотермического эффекта процесса ТОД исследуемого материала, причем максимум dДСК-пика в наибольшей степени должен соответствовать температуре точки перегиба на ДСК-кривой формируемого экзотермического пика; близость проверяемого значения температуры к температуре максимальной скорости потери массы (максимума ДТГ-пика); в случае получения нескольких пиков на dДСК-кривой целесообразно рассматривать пик, характеризующийся большей скоростью тепловыделения при данной температуре [11], что свойственно процессу самовоспламенения.

В соответствии ГОСТ 12.1.044–2018 теплота сгорания материалов — это количество тепла, выделяющееся при полном сгорании единицы массы материала в среде кислорода. В реальных условиях, особенно в условиях пожара, содержание кислорода в разы меньше, т. е. реальная теплота сгорания материалов также будет значительно ниже их теплоты сгорания в чистом кислороде, значения которых приведены в справочной литературе [12]. Этот факт не позволяет применять результаты оценки теплоты сгорания материалов, полученных в чистом кислороде, при решении задач судебной пожар-

но-технической экспертизы. В связи с этим актуальны исследования по оценке теплоты сгорания материалов в окислительной среде воздуха с применением современных и высокоточных методов, в частности метода СТА.

В целях подтверждения возможности применения метода СТА для оценки вышеперечисленных показателей пожарной опасности, проведены дополнительные экспериментальные исследования полимерных материалов (далее — ПМ) различной химической природы. Для испытаний были выбраны термопластичные полукристаллические ПМ: вспененный полипропилен (далее — ПП), вспененный полиэтилен (далее — ПЭ), полиэтилен низкой плотности (далее — ПЭНП), полиметилметакрилат (далее — ПММА), а также аморфные термопласты: поликарбонат (далее — ПК), полистирол (далее — ПС) и поливинилхлорид (далее — ПВХ).

Результаты исследований и их обсуждение

Для оценки показателей пожарной опасности ПМ методом СТА проведены испытания с использованием термоанализатора STA 449 F5 Jupiter фирмы Netzsch с учетом холостого опыта в режиме «коррекция + образец» в динамической окислительной среде воздуха: скорость нагрева — 20 °С/мин; расход продувочного газа — 80 мл/мин; расход защитного (инертного) газа — 20 мл/мин; начальная температура — 25–30 °С; конечная температура — 910 °С.

Термограмма вспененного ПП приведена на рис. 1. На термограмме исследуемого ПМ представлены: ТГ-кривая, ДТГ-кривая, ДСК-кривая и dДСК-кривая.

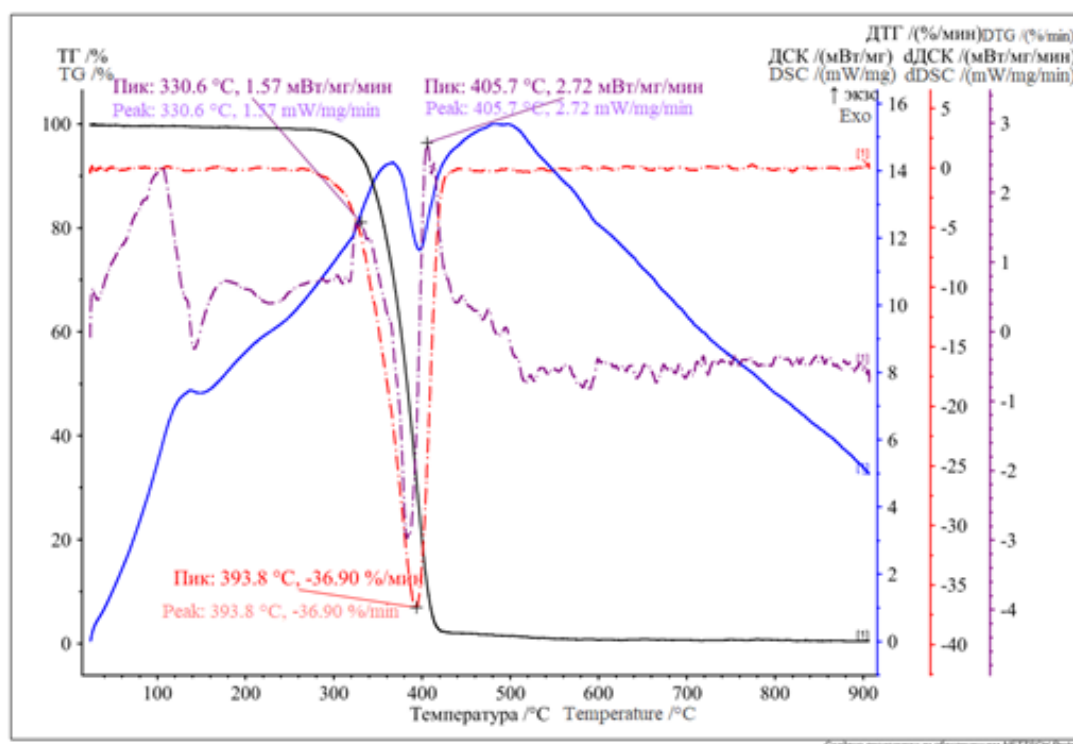


Рис. 1. Термограмма вспененного ПП

Fig. 1. Thermogram of foamed PP

Процесс термоокислительной деструкции вспененного ПП начинается при температурах выше 300 °С, максимальная скорость потери массы, диагностируемая по ДТГ-кривой, составила 36,9 %/мин при температуре 393,8 °С. Экзотермический эффект процесса ТОД вспененного ПП наблюдается в интервале температур 300–600 °С.

На dДСК-кривой в интервале температур ТОД исследуемого ПМ наблюдается пик, характеризующий резкое увеличение скорости тепловыделения в результате воздействия высоких температур на вспененный ПП. Температура максимума dДСК-пика составила 405,7 °С. Для того чтобы квалифицировать данное значение температуры как температуру самовоспламенения, необходимо проверить выполнение условий [11]: нахождение данного значения температуры в интервале экзотермического эффекта процесса ТОД исследуемого материала, причем максимум dДСК-пика в наибольшей степени должен соответствовать температуре точ-

ки перегиба на ДСК-кривой формируемого экзотермического пика; близость к температуре максимальной скорости потери массы (393,8 °С) за счет выделения газов в результате ТОД.

Достаточно часто, как и в случае вспененного ПП, на dДСК-кривой в области температур ТОД исследуемого ПМ наблюдаются несколько пиков. Исследования показали, что температуре самовоспламенения отвечает пик, находящийся ближе к температуре максимума ДТГ-пика. Пик на dДСК-кривой при температуре 330,6 °С характеризует начало выделения тепла в результате ТОД вспененного ПП и не характеризует процесс самовоспламенения. Таким образом, проверка выполнения всех условий для диагностики температуры самовоспламенения показала, что температура самовоспламенения вспененного ПП составляет 405,7 °С.

Аналогично определялась температура самовоспламенения вспененного ПЭ (рис. 2).

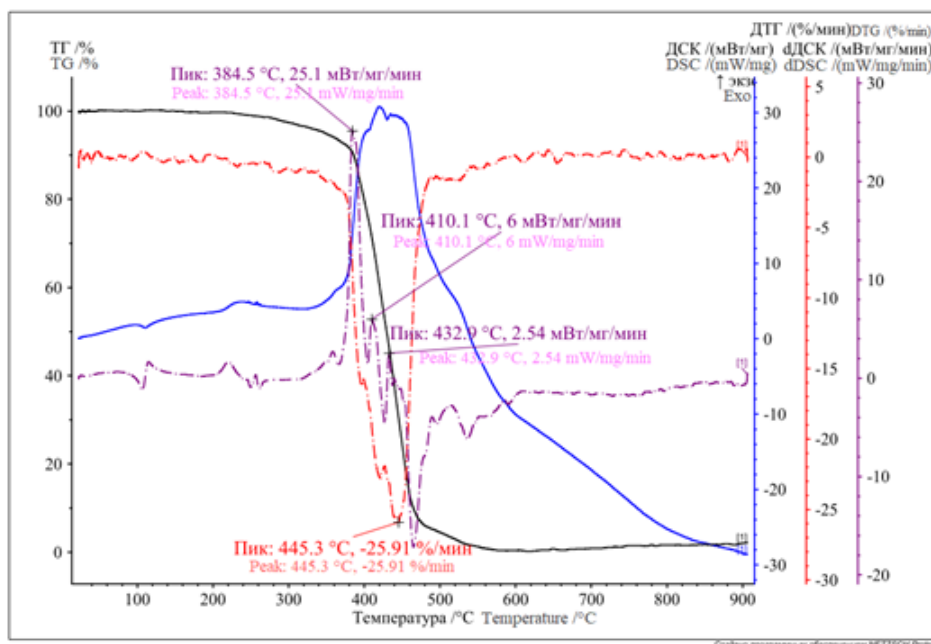


Рис. 2. Термограмма вспененного ПЭ

Fig. 2. Thermogram of foamed PE

В интервале температур экзотермического процесса ТОД вспененного ПЭ (350–550 °С) наблюдаются сразу три dДСК-пика (рис. 2). Температуре самовоспламенения отвечает второй dДСК-пик с температурой максимума 410,1 °С, поскольку первый dДСК-пик символизирует начало экзотермического процесса, а третий пик с темпе-

ратурой максимума 432,9 °С, несмотря на близость к температуре максимума ДТГ-пика, характеризуется меньшей интенсивностью тепловыделения (2,54 мВт/мг/мин), нежели второй dДСК-пик (6,0 мВт/мг/мин).

На рис. 3 представлена термограмма ПЭНП.

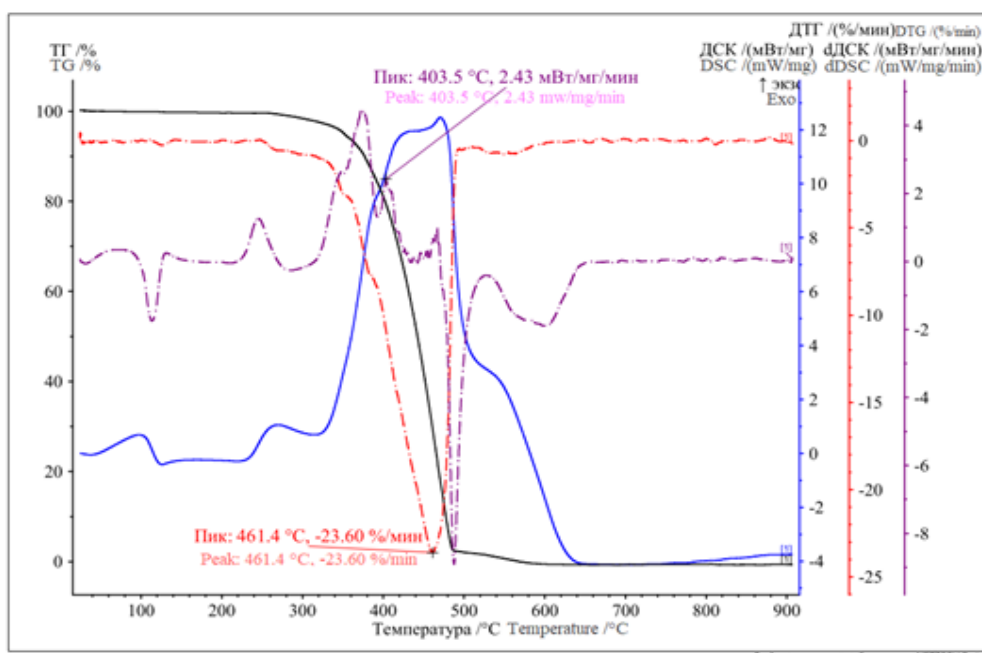


Рис. 3. Термограмма ПЭНП

Fig. 3. Thermogram of LDPE

Температура самовоспламенения ПЭНП составила 403,5 °С, поскольку именно для этого значения температуры выполняются все условия: нахождение в интервале температур экзотермического пика; близость

к точке перегиба на ДСК-кривой; близость к максимуму ДТГ-пика; максимальная интенсивность тепловыделения.

Для ПВХ температура самовоспламенения составила 449,2 °С (рис. 4).

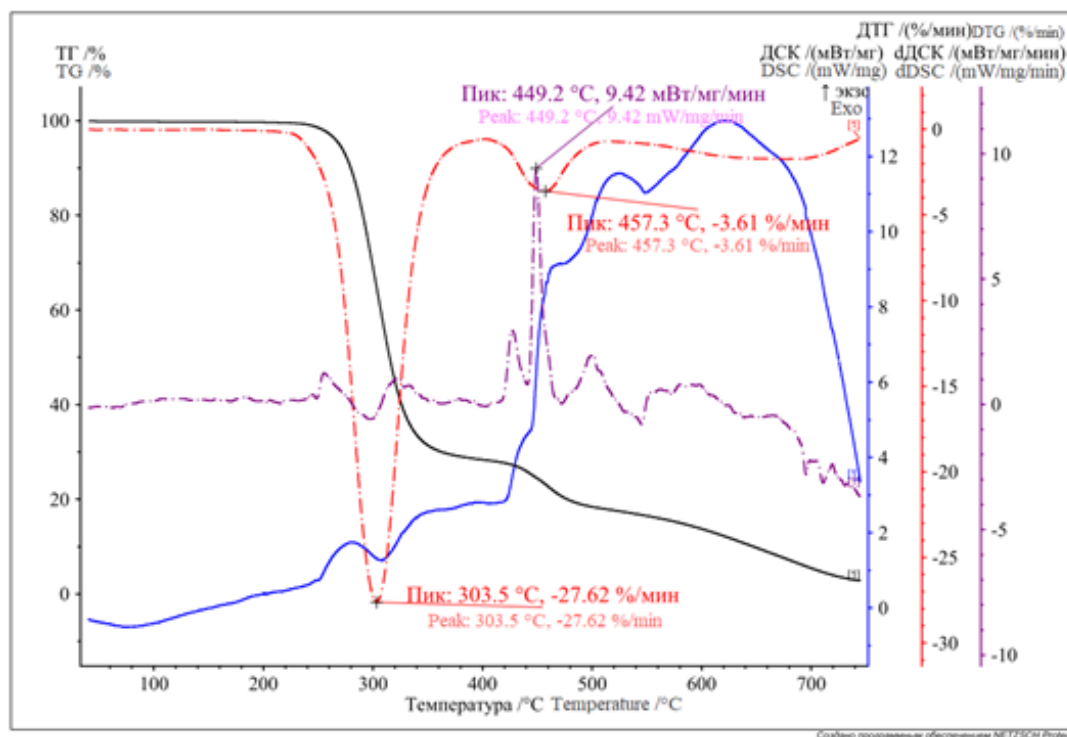


Рис. 4. Термограмма ПВХ

Fig. 4. Thermogram of PVC

Необходимо отметить, что для ПВХ интервал температур именно ТОД составляет 400–500 °С, а не 250–350 °С, в котором наблюдается процесс термического разложения ПВХ.

Аналогичным образом определялись значения температуры самовоспламенения для остальных ПМ. Значения температур самовоспламенения исследуемых полимерных материалов, полученные с использованием предлагаемого методического подхода, приведены в табл. 1.

Анализ данных, представленных в табл. 1, свидетельствует об удовлетворительной сходимости результатов экспериментальных исследований, полученных методом СТА, и данных, представленных в литера-

турных источниках. При этом необходимо отметить, что в литературных источниках представлены очень разрозненные значения температур самовоспламенения, поскольку для улучшения эксплуатационных свойств ПМ производителями используются различные добавки и антипирены, влияющие на показатели их пожарной опасности и на температуру самовоспламенения, в частности.

Важной характеристикой для решения диагностических задач в рамках судебной пожарно-технической экспертизы является тепловой эффект процесса ТОД, который определяется методом СТА по площади (интегральной интенсивности) ДСК-пика (рис. 5).

Таблица 1
Температура самовоспламенения полимерных материалов различной химической природы

Table 1
 Autoignition temperature of polymeric materials of different chemical nature

№	Полимерный материал Polymer material	Температура самовоспламенения, $T_{\text{свп}}, ^\circ\text{C}$ Autoignition temperature, $T_{\text{autoign}}, ^\circ\text{C}$	
		Экспериментальные данные, полученные методом СТА Experimental data obtained by the STA method	По данным из литературных источников According to literary sources
1	Вспененный ПП Foamed PP	405,7	—
2	Вспененный ПЭ Foamed PE	410,1	—
3	ПЭНП LDPE	403,5	349–422 [12]
4	ПК PC	500,8	477–580 [13–14]
5	ПС PS	449,1	488–496 [12]
6	ПММА PMMA	409,9	450–462 [2]
7	ПВХ PVC	449,2	440–454 [2, 12, 15]

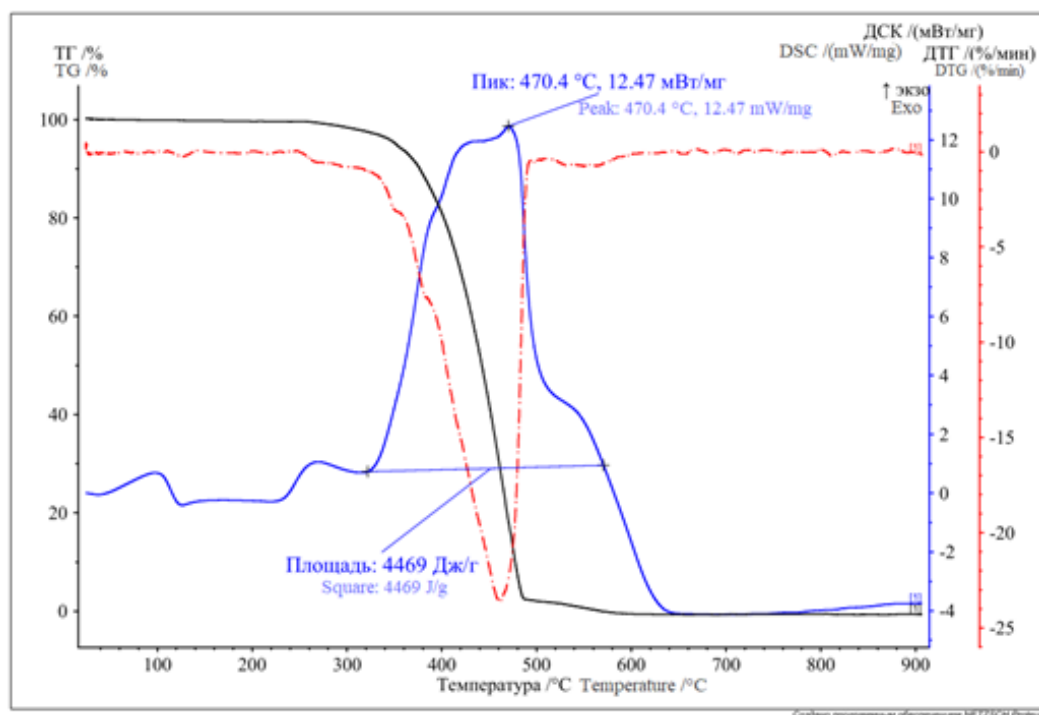


Рис. 5. Термограмма ПЭНП

Fig. 5. Thermogram of LDPE

Таблица 2
Тепловой эффект процесса ТОД полимерных материалов
различной химической природы

Table 2

Thermal effect of the thermal decomposition process of polymeric materials
of different chemical nature

№	Полимерный материал Polymer material	Тепловой эффект ТОД, Дж/г Thermal effect of TOD, J/g
1	Вспененный ПП Foamed PP	5 969
2	Вспененный ПЭ Foamed PE	7 170
3	ПЭНП LDPE	4 469
4	ПК PC	10 796
5	ПС PS	2 310
6	ПММА PMMA	1 201
7	ПВХ PVC	3 795

В случае отсутствия экзотермического эффекта при проведении исследований в инертной среде, тепловой эффект равен теплоте сгорания исследуемого материала. В работе [4] рассмотрены примеры применения данного методического подхода для оценки горючести ПВХ-линолеума, древесины березы и композитного полимерного материала, а также рассмотрен методический подход определения группы горючести веществ и материалов [4]. Косвенным методом с использованием СТА представляется возможным также оценить кислородный индекс ПМ.

Заключение

В ходе экспериментальных исследований показана возможность оценки температуры

самовоспламенения полимерных материалов методом СТА. Температура самовоспламенения оценивается с использованием сразу трех аналитических сигналов: дифференциальной сканирующей калориметрии, дифференциальной термогравиметрии и первой производной от дифференциальной сканирующей калориметрии, что позволяет точно определить значение этого важного показателя пожарной опасности. Показано, что для диагностики температуры самовоспламенения СТА необходимо выполнение следующих условий: нахождение в интервале температур экзотермического пика; близость к точке перегиба на ДСК-кривой; близость к максимуму ДТГ-пика; максимальная интенсивность тепловыделения. Погрешность метода в определении значений температуры не превышает 1,5 %.

Оценка теплоты сгорания веществ и материалов в соответствии с ГОСТ 12.1.044–2018 не имеет практической значимости при решении задач судебной пожарно-технической экспертизы, поскольку среда чистого кислорода, в которой она определяется, не встречается в реальных

условиях, тем более в условиях пожара. Надежным, достаточно точным (погрешность не превышает 3 %) и информативным методом для оценки теплового эффекта и теплоты сгорания (при вычете теплового эффекта в инертной среде) является метод СТА.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Диагностика формирования вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом синхронного термического анализа / О. В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 67–77.
2. Q&As Concerning Fire of Flexible Polyurethane Foams: Hazards and Prevention "For Houses and Buildings" : Final Report / Japan Urethane Industries Institute. Tokyo, 2010. 35 p. URL: <https://clck.ru/3QD7iJ> (дата обращения: 15.10.2025).
3. Исследование пожароопасных свойств полимерных материалов методом синхронного термического анализа / О. В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2023. № 4 (41). С. 13–23.
4. Беззапонная О. В., Лузина М. Д., Динисламов М. М. Применение метода синхронного термического анализа для оценки горючести веществ и материалов // Техносферная безопасность. 2022. № 4 (37). С. 127–140.
5. Wellen R. M., Canedo E. L. On the Kissinger equation and the estimate of activation energies for non-isothermal cold crystallization of PET // Polymer Testing. 2014. № 40. Pp. 33–38. URL: <https://clck.ru/3QD7vH> (дата обращения: 15.10.2025).
6. Simple Direct Method to Obtain Kinetic Parameters for Polymer Thermal Decomposition / D. Lázaro et al. // Appl. Sci. 2021. № 11. URL: <https://clck.ru/3QD86m> (дата обращения: 15.10.2025).
7. Characterisation of pyrolysis kinetics and detailed gas species formations of engineering polymers via reactive molecular dynamics / T. B. Y. Chen et al. // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2020. URL: <https://clck.ru/3QD9Qb> (дата обращения: 15.10.2025).
8. Беззапонная О. В. Оценка кинетических параметров термоокислительной деструкции полимерных материалов для решения задач пожарно-технической экспертизы // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 166–174.
9. Predictions of polymer thermal degradation: relevance of selecting the proper kinetic model / P. E. Sánchez-Jiménez et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. № 147 (3). URL: <https://clck.ru/3QD8P3> (дата обращения: 15.10.2025).
10. Degradation Kinetics of Polycarbonate Composites / S. Charde et al. // Chem. Biochem. Eng. Q. 2018. № 32 (2). Pp. 151–165.

11. Беззапонная О. В. Определение температуры самовоспламенения веществ и материалов методом синхронного термического анализа // Технологии техносферной безопасности. 2024. № 2 (104). С. 177–187.
12. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник в 2-х ч. М., 2004.
13. Hirano T., Noreukis S. E., Waterman T. E. Combust and Flame. 1974. Vol. 22. P. 353.
14. Kashiwagi T. Radiative Ignition model of a Solid Fuel // Combustion Science and technology. 1974. Vol. 8. Pp. 225–236. URL: <https://clck.ru/3QD9BC> (дата обращения: 15.10.2025).
15. Абдулалиев Ф. А., Лебедев А. Ю., Цанг Д. А. Исследование пожарной опасности полимерных композиционных материалов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2015. № 2. С. 38–48.

REFERENCES

1. Diagnostics of formation of secondary fire sources in the study of polymeric materials by the method of synchronous thermal analysis / O. V. Bezzaponnaya et al. // Technosphere safety. 2025. № 1 (46). Pp. 67–77.
2. Q&As Concerning Fire of Flexible Polyurethane Foams: Hazards and Prevention "For Houses and Buildings" : Final Report / Japan Urethane Industries Institute. Tokyo, 2010. 35 p. URL: <https://clck.ru/3QD7iJ> (date of application: 15.10.2025).
3. Study of fire hazardous properties of polymeric materials by the method of synchronous thermal analysis / O. V. Bezzaponnaya et al. // Technosphere safety. 2023. № 4 (41). Pp. 13–23.
4. Bezzaponnaya O. V., Luzina M. D., Dinislamov M. M. Application of the method of synchronous thermal analysis to assess the flammability of substances and materials // Technosphere safety. 2022. № 4 (37). Pp. 127–140.
5. Wellen R. M., Canedo E. L. On the Kissinger equation and the estimate of activation energies for non-isothermal cold crystallization of PET // Polymer Testing. 2014. № 40. Pp. 33–38. URL: <https://clck.ru/3QD7vH> (date of application: 15.10.2025).
6. Simple Direct Method to Obtain Kinetic Parameters for Polymer Thermal Decomposition / D. Lázaro et al. // Appl. Sci. 2021. № 11. URL: <https://clck.ru/3QD86m> (date of application: 15.10.2025).
7. Characterisation of pyrolysis kinetics and detailed gas species formations of engineering polymers via reactive molecular dynamics / T. B. Y. Chen et al. // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2020. URL: <https://clck.ru/3QD9Qb> (date of application: 15.10.2025).
8. Bezzaponnaya O. V. Assessment of kinetic parameters of thermal-oxidative destruction of polymeric materials for solving problems of fire-technical expertise // Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 1 (73). Pp. 166–174.
9. Predictions of polymer thermal degradation: relevance of selecting the proper kinetic model / P. E. Sánchez-Jiménez et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. № 147 (3). URL: <https://clck.ru/3QD8P3> (date of application: 15.10.2025).
10. Degradation Kinetics of Polycarbonate Composites / S. Charde et al. // Chem. Biochem. Eng. Q. 2018. № 32 (2). Pp. 151–165.

11. Bezzaponnaya O. V. Determination of the autoignition temperature of substances and materials by the method of synchronous thermal analysis // Technologies of technosphere safety. 2024. № 2 (104). Pp. 177–187.
12. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. Fire and explosion hazard of substances and materials and means of their extinguishing : a handbook in 2 parts. M., 2004.
13. Hirano T., Noreukis S. E., Waterman T. E. Combust and Flame. 1974. Vol. 22. P. 353.
14. Kashiwagi T. Radiative Ignition model of a Solid Fuel // Combustion Science and technology. 1974. Vol. 8. Pp. 225–236. URL: <https://clck.ru/3QD9BC> (date of application: 15.10.2025).
- 15 Abdulaliev F. A., Lebedev A. Yu., Tsang D. A. Study of fire hazard of polymer composite materials // Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2015. № 2. Pp. 38–48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беззапонная Оксана Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Почетный работник науки и высоких технологий РФ, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); ORCID: 0000-0001-6566-448X; WOS Research ID: R-8727-2019; Scopus Author ID: 6504618195; ID РИНЦ: 119257; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Козионов Алексей Викторович, начальник сектора судебных экспертиз СЭУ ФПС ИПЛ по Свердловской области (620905, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Евгения Савкова, д. 53); e-mail: kozionov.30@gmail.ru

Вакарин Евгений Владимирович, магистрант Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); e-mail: vakarin01@bk.ru

Магомедов Омар Гасаналиевич, магистрант Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); e-mail: omagomedov633@gmail.com

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Oksana V. Bezzaponnaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Professor of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ORCID: 0000-0001-6566-448X; WOS Research ID: R-8727-2019; Scopus Author ID: 6504618195; RINC ID: 119257; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Aleksey V. Kozionov, Head of the Forensic Examination Sector, Federal State Budgetary Institution of the Federal Fire Service Institute of the Sverdlovsk Region (53 Evgeniya Savkova St., Ekaterinburg, 620905, Russian Federation); e-mail: kozionov.30@gmail.ru

Yevgeny V. Vakarin, Master's Student, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); e-mail: vakarin01@bk.ru

Omar G. Magomedov, Master's Student, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia
(22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); e-mail: omagomedov633@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2025
Одобрена после рецензирования 07.10.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 614.844

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗАЩИТНЫХ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС

Баранчикова Надежда Ивановна¹, Кульков Виктор Николаевич¹, Корельштейн Леонид Бенционович², Михайловский Егор Анатольевич³

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

² НТП Трубопровод, г. Москва, Российская Федерация

³ Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. В последние годы в системах противопожарного водоснабжения все чаще стали использоваться водяные завесы для пожаротушения, охлаждения, орошения, защиты технологических площадок причальных комплексов, резервуарных парков, эстакад и площадок для обслуживания цистерн с нефтепродуктами. Эффективность функционирования водяных завес во многом зависит от полученных результатов гидравлического расчета системы противопожарного водоснабжения. В действующих нормативных документах имеется методика гидравлического расчета водяных завес со струями, работающими вертикально вниз, и струями, вытекающими вертикально вверх, без учета многоконтурности систем противопожарного водоснабжения и фактических характеристик оросителей: расходной и высотной. Предложены аппроксимирующие зависимости расходных и высотных характеристик, широко применяемых насадков типа НП для водяных завес. Предложена математическая модель потокораспределения в системах пожаротушения с водяными завесами со струями, направленными вертикально вверх, на основе которой может выполняться гидравлический расчет водяных завес. Модель и аппроксимирующие зависимости реализованы в программно-вычислительном комплексе «ИСИГР», особенностью которого является его применение через интернет. Пользователям программы доступны: графический интерфейс с развитыми средствами рисования сети и задания данных по ее элементам произвольно или через базу оборудования, возможность аппроксимации характеристик насосов и др.

Ключевые слова: системы противопожарного водоснабжения, противопожарные водяные завесы, насадки, оросители, вертикальные вверх раздробленные струи, задача потокораспределения, гидравлический расчет, нефиксированный отбор, напор истечения, давление перед оросителем

Для цитирования: Гидравлический расчет защитных водяных завес / Н. И. Баранчикова [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 64–76.

HYDRAULIC CALCULATION OF PROTECTIVE WATER CURTAINS

Nadezhda I. Baranchikova¹, Victor N. Kulkov¹, Leonid B. Korelstein², Egor A. Mikhailovsky³

¹ National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

² "NTPTruboprovod" LLC, Moscow, Russian Federation

³ Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. In recent years, water curtains have increasingly been used in fire-fighting water supply systems for fire extinguishing, cooling, irrigation, protection of process areas of berth complexes, overpasses and areas for servicing tanks with petroleum products. The efficiency of water curtains largely depends on the results obtained from the hydraulic calculation made for fire-fighting water supply system. The current regulatory documents contain a methodology for hydraulic calculation of water curtains with jets directed vertically downwards and with jets flowing vertically upwards. The methodology, however, leaves without consideration the multi-loop nature of fire-fighting water supply systems and the actual flow rate and altitude characteristics for sprinklers. The study proposes approximating dependencies of flow rate and altitude characteristics of widely used nozzles of the NP type for water curtains. It also proposes a mathematical model of flow distribution in fire extinguishing systems with water curtains with jets directed vertically upwards, which can serve as a basis for the hydraulic calculation of water curtains. The model and approximating dependencies are implemented in the ISIGR software. A distinguishing feature of the software is its application via the Internet. The software users have access to a graphical interface with advanced tools for drawing a network and setting data on its components arbitrarily or through the equipment database. Additionally, users can approximate the characteristics of pumps.

Keywords: fire-fighting water supply systems, fire-fighting water curtains, nozzles, sprinklers, vertical up-ward fragmented jets, current distribution problem, hydraulic calculation, non-fixed selection, outflow pressure, pressure before the sprinkler

For Citation: Hydraulic calculation of protective water curtains / N. I. Baranchikova et al. // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 64–76.

Введение

Защитные водяные завесы достаточно широко используются в качестве средства предотвращения распространения токсичных газопаровоздушных и горючих облаков, образующихся при аварийных выбросах сжиженных газов и ядовитых веществ, а также в качестве средства уменьшения мощных тепловых радиационных потоков при пожарах горючих веществ. Для нейтрализации токсичных паров создаются мелкодисперсные водяные завесы с давлением перед

распылителями не менее 0,7 МПа, чтобы создать такую дисперсность капель струи, которая бы обеспечивала необходимую дисперсность капель воды, способных связывать парогазовую фазу ядовитых веществ. Применение водяных завес позволяет повысить защищенность личного состава МЧС, участвующего в ликвидации аварий и пожаров.

Эффективное применение защитных водяных завес возможно только при корректно выполненном гидравлическом расчете системы противопожарного водоснабжения,

одним из элементов которой является водяная завеса.

ВСН 12-87/ММФ «Причалные комплексы для перегрузки нефти и нефтепродуктов. Противопожарная защита. Нормы проектирования» (далее — ВСН 12-87/ММФ) — документ, регламентирующий элементы методики гидравлического расчета водяных завес (далее — ВЗ).

Существуют два типа ВЗ: водяные завесы, в которых вода из оросителей поступает сверху вниз; водяные завесы, в которых вода подается снизу вверх. Для создания ВЗ первого типа используются оросители общего

назначения (например, розеточного типа либо специальные оросители для защиты проемов); для создания ВЗ второго типа, например, на причальных комплексах, применяются специальные оросители, формирующие сплошные вертикальные струи высотой 5–15 м.

Оросители. Дренчерные оросители общего назначения для водяных завес

Вода из рассматриваемых оросителей подается сверху вниз, расход может быть описан соотношениями:

$$q = 10k\sqrt{P}, \text{ или } q = k\sqrt{H}, \quad (1)$$

где:

q — расход воды через ороситель, л/с;

P — давление (избыточное) перед оросителем, МПа;

H — напор истечения [1] (пьезометрическая высота перед оросителем), м;

k — коэффициент производительности оросителя, принимается по технической документации, л/(с · МПа^{0,5}), или л/(с · м^{0,5}). Коэффициент производительности можно интерпретировать как расход жидкости через ороситель (л/с) при давлении перед ним 0,01 МПа или при напоре истечения — 1 м.

$$k = \mu \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2g} 10^3, \quad (2)$$

где:

μ — коэффициент расхода насадка;

D — диаметр насадка, м;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Специальные оросители для дренчерных завес со струями, направленными вертикально вверх

В этих случаях широко применяются оросители НП-I и НП-II для создания водяных завес на технологических площадках причалов (в соответствии с требованиями ВСН 12-87/ММФ), в резервуарных парках хранения нефтепродуктов, на объектах, где

требуется применение водяных завес высотой несколько метров и значительной протяженности. В отличие от оросителей НП-I, формирующих только вертикальные струи, из оросителей НП-II часть воды направляется вертикально вверх через коническое сопло, а другая часть через щелевые отверстия распыляется в свободные зоны между оросителями, образуя более плотную, без разрывов, водяную завесу, предотвращающую

проникновение тепловых и газовых потоков за счет подачи мелкодисперсной воды в пространство между насадками. У таких оросителей (насадков) имеются уже две ос-

новные характеристики: расходная и высотная (высота струи). Расходная характеристика, согласно ВСН 12-87/ММФ (приложение 8), описывается соотношением:

$$q = \sqrt{B_{\text{и}} H}, \quad (3)$$

где $B_{\text{и}} = k^2$.

Величина (коэффициент) $B_{\text{и}}$, как и коэффициент производительности (2), зависит от диаметра и коэффициента расхода насадка. $B_{\text{и}}$ можно интерпретировать как величину расхода (л/с) во второй степени при напоре перед насадком 1 м. В ВСН 12-87/ММФ коэффициент расхода принят равным единице, а для распылителей типа НП заводы-изготовители не приводят фактический коэффициент расхода, который должен быть существенно меньше (0,7–0,8), т. к. в распылителях типа НП имеется встроенный фильтр со значительным мест-

ным сопротивлением и на выходе — резкое сужение. Вследствие этого расчетные расходы через такие оросители получаются завышенными (на 20–30 %). В связи с этим возникает сомнение в корректности расчета насадков, которые имеют плавноизменяющееся или неизменное сечение по всей длине [2].

Второй важной характеристикой оросителей типа НП является зависимость высоты раздробленной вертикальной струи от напора (или давления), которая может быть описана формулой Люгера (1895 г.):

$$S = \frac{H}{1 + \varphi H}, \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{0,00025}{D + (1000D)^3},$$

где берем во внимание только правую ветвь гиперболы, D — диаметр насадка, м.

С достаточной для практики точностью заводская расходная характеристика для насадка типа НП-I и НП-II $D = 0,005$ м описывается формулой:

$$q = 0,109 + 0,0507\sqrt{H}. \quad (5)$$

Некоторые производители (например, ООО «Пожнефтехим») представляют расходные и высотные характеристики в виде графиков по результатам испытаний (рис. 1).

Из графика видно, что значения расхода по (3) существенно больше фактических — по (5) (на 25–35 %), а расходная характеристика по (1), аппроксимирующая завод-

скую характеристику, хоть и незначительно, но также отличается от (5). Полная аналогия наблюдается и по другим диаметрам оросителей данного типа. Таким образом, расходные характеристики дренчерных оросителей НП-I и НП-II с достаточной для практических расчетов точностью могут быть описаны соотношением вида:

$$q = a + b\sqrt{H}. \quad (6)$$

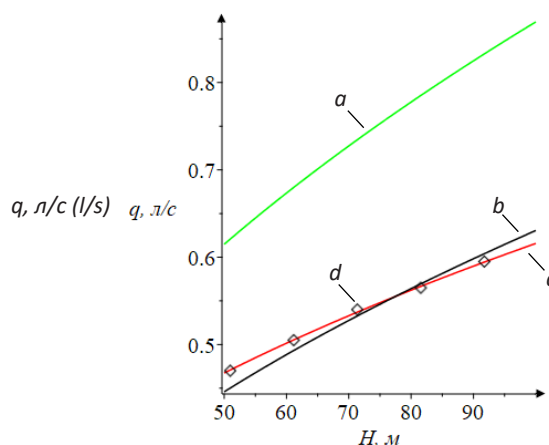


Рис. 1. Графики расходных характеристик оросителя НП-I $D = 0,005$ м:
 a — по формуле (3); b — аппроксимация заводской характеристики по формуле (1); c — аппроксимация заводской характеристики по формуле (5); d — точки с заводской характеристики

Fig. 1. Graphs of the flow characteristics of the NP-I sprinkler $d = 0,005$ m:
 a — according to formula (3); b — approximation of the factory characteristic according to formula (1); c — approximation of the factory characteristic according to formula (5); d — points from the factory characteristic

Коэффициенты a и b для различных диаметров оросителей НП-I (НП-II) приведены в табл. 1.

Таблица 1
Коэффициенты для уравнения (6)

Table 1
 Coefficients for equation (6)

$D, \text{ м}$	a	b
0,003	-0,082	0,0298
0,004	0,104	0,0277
0,005	0,109	0,0507
0,006	0,114	0,0815
0,007	0,236	0,0954

Высотные характеристики, представленные изготовителем (ООО «Пожнефтехим») и вычисленные по формуле Люгера, приведены для оросителя $D = 0,005$ м на рис. 2.

Как и для расходной характеристики, с достаточной для практики точностью, заводская высотная характеристика для насадки НП-I (и НП-II) $D = 0,005$ м в расчетном диапазоне описывается формулой:

$$S = 3,13 + 0,69\sqrt{H}. \quad (7)$$

Из графика видно (см. рис. 2), что значения высоты струи по (4) существенно больше фактических по (7), до 80 %. Зависимость (7) аппроксимирует фактические значения с погрешностью не более 1 %. Полная аналогия наблюдается

и по другим диаметрам оросителей данного типа. Таким образом, высотные характеристики дренчерных оросителей типа НП-I и НП-II, с достаточной для практических расчетов точностью, могут быть описаны соотношением вида:

$$S = a_1 + b_1 \sqrt{H}.$$

(8)

Коэффициенты для различных диаметров оросителей НП-I (НП-II) в формуле (8) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты для уравнения (8)

Table 2

Coefficients for equation (8)

<i>D</i> , м	<i>a</i> ₁	<i>b</i> ₂
0,003	3,66/3,16	0,33
0,004	2,13/1,63	0,69
0,005	3,13/2,63	0,69
0,006	1,82/1,32	1,01
0,007	2,82/2,32	1,01

Примечание. Значение коэффициента *a*₁: в числителе — для оросителей НП-I, в знаменателе — для НП-II.

Если необходима более точная аппроксимация высотной характеристики, то можно использовать зависимость вида

$$S = a_1 + b_1 \sqrt{H} + c_1 \sqrt[4]{H}.$$

(9)

В этом случае график аппроксимации заводской характеристики и график заводской характеристики визуально на графике (см. рис. 2) неразличимы в рабочем диапазоне.

С учетом (6) и (8) можно выразить явно зависимость высоты струи от расхода воды через ороситель, т. е. в окрестности требуемого расхода через ороситель высота струи линейно зависит от расхода воды через ороситель:

$$S = a_1 - \frac{ab_1}{b} + \frac{b_1}{b} q.$$

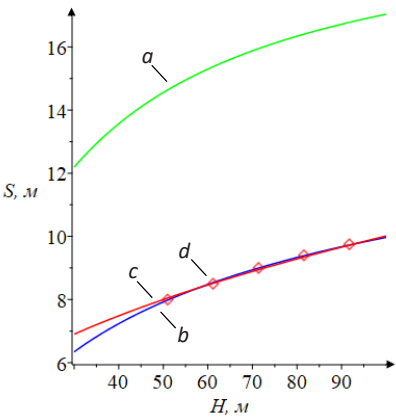


Рис. 2. Графики расходных характеристик оросителя НП-I *D* = 0,005 м:
a — по формуле (4); *b* — аппроксимация заводской характеристики по формуле (7); *c* — аппроксимация заводской характеристики по формуле (9); *d* — точки с заводской характеристики

Fig. 2. Graphs of the flow characteristics of the NP-I sprinkler *d* = 0,005 m:
a — according to formula (4); *b* — approximation of the factory characteristic according to formula (7); *c* — approximation of the factory characteristic according to formula (9); *d* — points from the factory characteristic

Из графика (рис. 3) видно, во-первых, что с увеличением диаметра оросителя высота струи при фиксированном расходе уменьшается, и наоборот. Кроме того, использование формулы Люгера приводит к существенной погрешности (расчетная высота струи выше не менее чем на 56 % фактической для $D = 0,005$ м). Для других диаметров погрешность приблизительно такая же.

И, во-вторых, при требуемых высоте струи, расходе через ороситель (диктующий) и минимальном напоре (давлении) перед оросителем достигнуть точного равенства между требуемыми и фактическими значениями по двум параметрам практически невозможно, т. е. всегда будут выполняться строгие неравенства по двум параметрам. Достигнуть равенства по двум параметрам возможно только в случае, если бы диаметры насадков менялись непрерывно (т. е. была бы возможность (согласие изготовителя) рассверливать выходное отверстие оросителя). Целесообразно, чтобы расход

через ороситель (диктующий) был максимально близок к требуемому.

Рассмотрим гидравлический расчет противопожарной (защитной) водяной завесы причального комплекса с использованием оросителей типа НП-I. В состав водяной завесы входят: закольцованные подводящий, распределительный и питающий трубопроводы, повысительная насосная станция, фильтр после насосов и узел управления, пожарные гидранты на питающих трубопроводах.

Заданными являются: удельный расход водяной завесы — расход, приходящийся на один погонный метр ширины завесы, л/(с·м), ширина и конфигурация ВЗ, расстояние между оросителями, минимальная (требуемая) высота струи, минимальный напор (давление) перед оросителями, длины и диаметры распределительного и питающих трубопроводов [2], давление в подводящем трубопроводе, коэффициенты местного сопротивления фильтра и сигнального клапана.

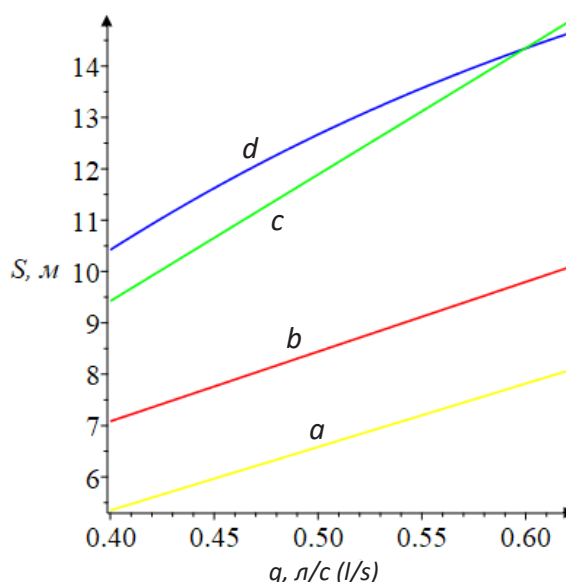


Рис. 3. График зависимости высоты струи от расхода воды через оросители типа НП-I:
 a — для $D = 6$ мм; b — для $D = 5$ мм; c — для $D = 4$ мм; d — для $D = 5$ мм по формулам (3), (4)

Fig. 3. Graph of the dependence of the jet height on the water flow rate through sprinklers of the NP-I type:
 a — for $D = 6$ mm; b — $D = 5$ mm; c — $D = 4$ mm; d — $D = 5$ mm according to formulas (3), (4)

Требуется определить: общий расход воды, необходимый для создания ВЗ, напор насоса, расходы воды через оросители и напоры перед ними, фактическую высоту струи и потери напора в распределительном и питающем трубопроводах.

Поставленная задача предполагает решение системы нелинейных алгебраических уравнений, которая описывает потокораспределение в водяной завесе (задача потокораспределения с нефиксированными узловыми расходами в произвольной трубопроводной системе [3, 4]) и имеет вид:

$$\sum_{j \in N(i)} a_{ij} x_{ij} = q_i, \quad i \in I_{\text{оп}} \cup I_{m_1} \cup I_{m_2}, \quad (10)$$

$$q_i = \begin{cases} a + b\sqrt{H_i}, & i \in I_{\text{оп}} \\ 0, & i \in I_{m_1} \\ q_0, & i \in I_{m_2} \end{cases}, \quad I_{\text{оп}} \cup I_{m_1} \cup I_{m_2} = I, \quad (11)$$

$$H_i - H_j = f_{ij}(x_{ij}), \quad (12)$$

$$S_i = c + d\sqrt{H_i}, \quad i \in I_{\text{оп}}. \quad (13)$$

Структура моделируемой гидравлической системы может быть описана ориентированным графом [5]. Пусть m — число узлов, n — число дуг этого графа, тогда в (1): $a_{ij} = 1$, если дуга ij выходит из узла i ; $a_{ij} = -1$, если дуга ij входит в узел i ; x_{ij} — расход жидкости по дуге ij . $N(i)$ — окружение узла i [5]. Функции q_i — заданные для узлов $i = 1, \dots, m$ функции, описывающие зависимость узлового расхода от напора (давления) в каждом узле, причем $\sum_{i=1}^m q_i = 0$. Если $q_i > 0$, то величина q_i является узловым расходом в систему в узле i . Если $q_i < 0$, то величина $|q_i|$ задает узловой расход (через ороситель, пожарный ствол) из системы в узле i . H_i — напор (пьезометрический) в узле i . $I_{\text{оп}}$ — множество узлов на распределительном трубопроводе, в которых установлены оросители; I_{m_1} — множество узлов соединений, в которых отсутствует приток либо отбор жидкости (воды); I_{m_2} — множество узлов с пожарными гидрантами, если они установлены на питательном трубопроводе. a, b — коэффициенты аппроксимации расходной характеристики установленного

(выбранного) типа оросителя. $f_{ij}(x_{ij})$ — зависимость потери напора от расхода на дуге ij . S_i — высота вертикальной сплошной струи в узле с оросителем i . c, d — коэффициенты аппроксимации высотной характеристики установленного типа оросителя. Кроме того, задан напор либо перед насосной установкой (если насос уже подобран), либо после (в зависимости от поставленной задачи), хотя напор можно задать и перед произвольным оросителем. Плоскость сравнения проходит через верх распределительного трубопровода.

Искомymi величинами являются: n расходов x_{ij} и $(m - 1)$ напор в узлах H_i , m_0 высот струи S_i , m_0 расходов через оросители q_i и суммарный расход после источника (подача насосной станции). Число искомых переменных равно числу уравнений $(m + n + 2m_0)$, где m_0 — число оросителей ВЗ), т. е. система уравнений (10)–(13) замкнута.

Обсуждение модели

В [6, 7] одновременно с поиском расходов через оросители и напоров в узлах

подбираются диаметры трубопроводов. В предлагаемой постановке задачи потокораспределения диаметры трубопроводов и оросителей, напор на источнике или у произвольного оросителя (т. к. диктующий ороситель определить до проведения расчета при кольцевой системе невозможно) должны быть определены предварительно, до проведения гидравлического расчета. Для этого можно предположить, что расходы через все оросители — постоянные величины, и определить диаметры питающего и распределительного трубопроводов ВЗ либо расчетом (например, с использованием описанного в [6] алгоритма), либо по таблице [7]. После выполнения поверочного гидравлического расчета (подобрана насосная установка) диаметры некоторых трубопроводов нужно изменить так, чтобы скорости движения жидкости в них были в допустимых пределах. Диаметр распределительного трубопровода ВЗ подбирается таким образом, чтобы расходы через оросители и высоты струй по всей ширине завесы были практически одинаковы, т. е. расходы отличались только во втором (третьем) знаке после

запятой, а высоты — в первом (втором) знаке после запятой. Такой выбор диаметра распределительного трубопровода приведет к существенному сокращению избыточных расходов и располагаемой мощности на источнике (мощности электродвигателя).

Решение задачи (10)–(13) должно удовлетворять следующим условиям: а) $q_i \geq q_{\text{уд}}/2$; б) $S_i \geq S_{\text{min}}$; в) $H_i \geq H_{\text{оп}}$, где $q_{\text{уд}}$ — удельный расход ВЗ (т. к. расстояние между оросителями равно 0,5 м), л/(с · м); S_{min} — необходимая (требуемая) высота вертикальной раздробленной струи, м; $H_{\text{оп}}$ — требуемый напор перед оросителями, м.

Потери напора по длине в распределительном трубопроводе между оросителями обычно составляют 0,1–0,01 м, а местные потери в тройниках (на проход) — не более 0,001 м, в связи с чем их можно не учитывать.

В общем случае, т. к. диаметры оросителей — дискретные величины, то получить равенства $q_i = q_{\text{уд}}/2$; $S_i = S_{\text{min}}$; $H_i = H_{\text{оп}}$ для любого i практически невозможно, а получить можно одновременно для всех узлов с оросителями только строгие неравенства:

$$q_i > q_{\text{уд}}/2; S_i > S_{\text{min}}; H_i > H_{\text{оп}}, \quad (14)$$

даже для диктующего узла, в котором осуществляется сход потоков на распределительном трубопроводе.

Можно отметить, что струя, вытекающая из оросителя, вернется на землю через 2–4 с, т. е. удельный расход ВЗ через это время уже составит чуть меньше $2q_{\text{уд}}$, за счет разбрызгивания струи.

Фактически сначала решается система уравнений (10)–(12), после чего найденные значения H_i подставляются в (13) и проверяется выполнение условий (неравенств) (14).

В итоге при выполнении гидравлического расчета необходимо добиться того, чтобы выполнялись условия (14) при минимальном напоре и подаче на источнике (насосной станции).

Вышеприведенная математическая модель потокораспределения в водяных завесах со струями, направленными вертикально вверх, реализована в программно-вычислительном комплексе (далее — ПВК) «ИСИГР» (Интернет Система для Гидравлических Расчетов). ПВК позволяет выполнять расчеты гидравлических режимов работы систем

водяного пожаротушения, включающие защитные водяные завесы произвольной конфигурации (древовидные, кольцевые, смешанные), при наличии:

- оросителей, работающих вертикально вверх и вниз (предусмотрены разные иконки в интерфейсе);
- насосных агрегатов (предусмотрен алгоритм аппроксимации заводской характеристики, а также выбор готовых характеристик из встроенной базы данных);
- фиксированных и нефиксированных узловых отборов (оросители и пожарные гидранты);
- множества независимых схем сетей.

Среди важных особенностей, в контексте пожаротушения, программой предусмотрено следующее:

- сопротивление трубопровода можно задать, используя встроенную базу данных, содержащую более 20 типов труб, встроенный список фиксированных параметров из СП 485.1311500.2020 или произвольное значение;
- возможность выбора формул расчета расхода и высоты струи оросителей типа НП, которые соответствуют заводским характеристикам или ВСН 12-87/ММФ;
- визуальное отображение диктующего оросителя в кольцах (контурах) согласно направлениям потока и ориентации участков в результате гидравлического расчета;
- пакетное изменение любого параметра по элементам схемы, например, диаметра трубопроводов, типа оросителя и пр.

Программа доступна в интернете по адресу 51.isem.irk.ru. Простота освоения

ПВК дает возможность инженерам проектных и эксплуатирующих организаций существенно сократить трудозатраты на гидравлический расчет схем сетей водяных завес [8].

На рис. 4 приведен пример фрагмента тестовой расчетной схемы водяной завесы, топологическая форма — кольцо, однако визуально она нарисована компактно и состоит из 256 шт. оросителей НП-II/5, 255 шт. участков соединения диаметром 211 мм и длиной 0,5 м (распределительный трубопровод), двух подводящих трубопроводов 162 и 200 м, узлапотребителя, имитирующего гидранты с фиксированным отбором 20 л/с на одном из подводящих трубопроводов, узла-источника с заданным давлением 25 м вод. ст. в подводящем трубопроводе и заглубленного на 2 м, насоса Д500-65 (в насосной станции), развивающего напор 60,08 м вод. ст. при подаче 157,7 л/с. В результате расчета определено: диктующий ороситель имеет расход 0,54 л/с (и все остальные имеют практически тот же расход), напор перед ним 71,5 м вод. ст., при этом высота струи 9,0 м. Полученные параметры говорят о том, что цель, в соответствии с нормативными ограничениями, достигнута. Суммарные потери напора по одной линии питательного трубопровода (по максимально длинной стороне кольца) от насоса до диктующего оросителя составили 5,24 м вод. ст.

Файл с данным примером доступен в списке демонстрационных примеров, прилагаемых к программе.

Расчет занял менее 1 с, значит, пользователь за короткое время путем выполнения многовариантных гидравлических расчетов может подобрать характеристики оборудования, опробовать одновременно неограниченное число разных конфигураций завесы в одном расчете, учесть отборы

на противопожарное водоснабжение из пожарных гидрантов и т. д.

При проведении гидравлических расчетов по таблицам Ф. А. Шевелева, А. Ф. Шевелева [9] и по таблицам СП 485.1311500.2020 [7] раз-

ница в расходах через оросители и высотами струй составляет не более 1 %, причем, расходы и высоты струй по Ф. А. Шевелеву получаются меньше, чем по СП 485.1311500.2020, т. е. с некоторым запасом.

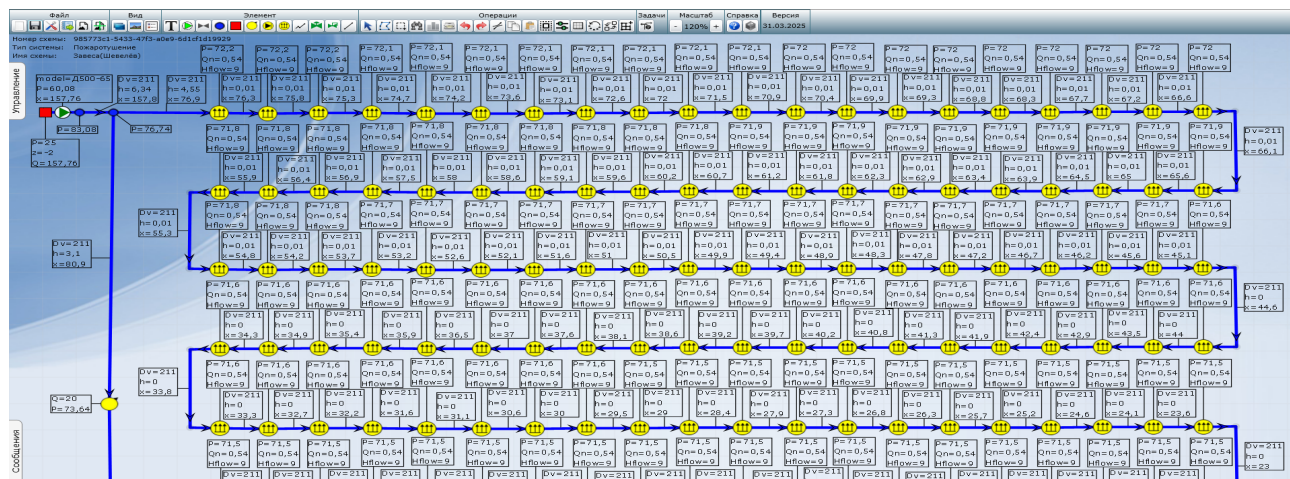


Рис. 4. Внешний вид графического интерфейса пользователя ПВК «ИСИГР» с примером схемы водяной завесы

Fig. 4. External view of the graphical user interface of the ISIGR PVC with an example of a water cur-tain diagram

Выводы

1. Предложенная математическая модель потокораспределения в водяных завесах (задача с нефиксированными отборами) в виде системы нелинейных алгебраических уравнений позволяет одновременно находить все искомые параметры функционирования водяных завес: расход воды, подаваемой в систему пожаротушения, напор на источнике, отборы, напоры и высоты струй у оросителей, расходы и потери напора на всех участках водяных завес.
2. При применении специальных оросителей в противопожарных водяных завесах необходимо использовать при гидравлических расчетах заводские

расходные и высотные характеристики, т. к. использование характеристик согласно ВСН 12-87/ММФ приводит к значительным погрешностям (завышение значений против фактических) при нахождении расхода и высоты струи через оросители.

3. Предложенная методика гидравлического расчета систем пожаротушения реализована в ПВК «ИСИГР». Такая методика может быть использована для гидравлического расчета одновременно нескольких дренчерных водяных завес, расположенных на разных технологических площадках с различными типами оросителей, различными требуемыми высотами вертикальных струй и постов с пожарными гидрантами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гидравлика и противопожарное водоснабжение : учебник / Ю. Г. Абросимов [и др.]. М., 2003. 392 с.
2. Болдырев В. В. Гидравлический расчет водяной завесы как трубопровода с попутным расходом // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 11. С. 64–68.
3. Епифанов С. П., Зоркальцев В. И. Задача потокораспределения с нефиксированными узловыми отборами // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 9. С. 30–35.
4. Гидравлический расчет установок автоматического пожаротушения, совмещенных с внутренним противопожарным водопроводом / Н. И. Баранчикова [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 10. С. 23–28.
5. Евстигнеев В. А., Касьянов В. Н. Толковый словарь по теории графов в информатике и программировании. Новосибирск, 1999. 288 с.
6. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения : учеб.-метод. пособие / Л. М. Мешман [и др.]; под общ. ред. Н. П. Копылова. М., 2002. 413 с.
7. СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : утв. приказом МЧС России от 31.08.2020 № 628 : введ. в действие 01.03.2021 // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://clck.ru/3QMGVj> (дата обращения: 24.06.2025).
8. Михайловский Е. А. Моделирование гидравлических режимов работы водяных систем пожаротушения в сети Интернет // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 5. С. 19–23.
9. Шевелев Ф. А., Шевелев А. Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб : справ. пособие. 8-е изд., перераб. и доп. М., 2008. 352 с.

REFERENCES

1. Hydraulics and Fire Water Supply : Textbook / Ju. G. Abrosimov et al. M., 2003. 392 p.
2. Boldyrev V. V. Hydraulic calculation of a water curtain as a pipeline with associated flow // Water supply and sanitary technique. 2016. № 11. Pp. 64–68.
3. Epifanov S. P., Zorkal'cev V. I. Flow rate distribution problem with unfixed node outflows // Water supply and sanitary technique. 2012. № 9. Pp. 30–35.
4. Hydraulic calculation of automatic fire extinguishing systems combined with an internal fire water pipeline / N. I. Baranchikova et al. // Water supply and sanitary technique. 2019. № 10. Pp. 23–28.
5. Evstigneev V. A., Kas'janov V. N. Explanatory Dictionary of Graph Theory in Computer Science and Programming. Novosibirsk, 1999. 288 p.
6. Design of water and foam automatic fire extinguishing systems / L. M. Meshman et al.; ed. N. P. Kopylova. M., 2002. 413 p.
7. SP 485.1311500.2020. Fire protection systems. Automatic fire extinguishing systems. Design standards and regulations : approved by Order № 628 of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 31.08.2020 : effective as of 01.03.2021 // Codex : electronic fund

of legal and normative-technical inform. URL: <https://clck.ru/3QMGVj> (date of application: 24.06.2025).

8. Mihajlovskij E. A. Modeling hydraulic operating modes of water fire extinguishing systems on the Internet // Water supply and sanitary technique. 2020. № 5. Pp. 19–23.

9. Shevelev F. A., Shevelev A. F. Tables for hydraulic calculation of water pipes : reference manual. 8th edition, revised and extended. M., 2008. 352 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Баранчикова Надежда Ивановна, канд. физ.-мат. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83); AuthorID: 17374; e-mail: nadin-0105@mail.ru

Кульков Виктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83); AuthorID: 730720; e-mail: vv@istu.edu

Корельштейн Леонид Бенционович, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора по новым разработкам и мировому рынку «НТП Трубопровод» (111141, Российская Федерация, г. Москва, ул. Плеханова, д. 7); ORCID 0000-0002-6780-7779; AuthorID: 350825; e-mail: korelstein@truboprovod.ru

Михайловский Егор Анатольевич, канд. техн. наук, научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130); ORCID 0000-0003-4342-9571; Author ID: 706132; Researcher ID: K-6048-2018; e-mail: egor.isem@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda I. Baranchikova, Cand. Sci. (Eng.), National Research Technical University (83, Lermontov St., Irkutsk, I-208, 664074, Russian Federation); e-mail: nadin-0105@mail.ru

Victor N. Kulkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research Technical University (83, Lermontov St., Irkutsk, I-208, 664074, Russian Federation); e-mail: vv@istu.edu

Leonid B. Korelstein, Deputy Director for Science, "NTPTruboprovod" LLC (7, Plekhanova St., Moscow, 111141, Russian Federation); e-mail: korelstein@truboprovod.ru

Egor A. Mikhailovsky, Cand. Sci. (Eng.), Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation); e-mail: egor.isem@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2025

Одобрена после рецензирования 28.07.2025

Принята к публикации 05.12.2025

УДК 621.039.586

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙ НА ОПАСНОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ОБЪЕКТЕ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Хусноярова Расуля Ильмаровна, Абдрахманова Карина Наилевна

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье рассматриваются ключевые аспекты возникновения аварийных ситуаций на взрывопожароопасных объектах хранения и переработки растительного сырья, таких как зернохранилища, элеваторы, мукомольные комбинаты, комбикормовые цеха. Авторами использованы данные ежегодных отчетов Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) за 2019–2023 гг. Объекты хранения и переработки растительного сырья характеризуются повышенной опасностью, связанной с образованием взрывоопасных пылевоздушных смесей, высокой концентрацией горючей мучной пыли, а также эксплуатацией устаревшего оборудования и несоблюдением технологических регламентов.

Обнаружено, что основными факторами, способствующими возникновению аварий, являются недостаточная квалификация и обучение персонала, нарушение технологических процессов, а также отсутствие своевременного технического обслуживания и модернизации оборудования. Особое внимание уделяется свойствам мучной пыли как горючей газовой смеси, способной при определенных условиях вызывать взрывы и пожары, что делает контроль ее концентрации ключевым элементом безопасности на таких производственных объектах.

Ключевые слова: промышленная безопасность, взрывопожароопасная среда, растительное сырье, оборудование, авария, опасный производственный объект

Для цитирования: Хусноярова Р. И., Абдрахманова К. Н. Организационные и технические причины возникновения аварий на опасном производственном объекте хранения и переработки растительного сырья // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 77–87.

ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL CAUSES OF ACCIDENTS AT A HAZARDOUS PRODUCTION FACILITY FOR STORAGE AND PROCESSING OF PLANT RAW MATERIALS

Rasulya I. Khusnoyarova, Karina N. Abdrakhmanova

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

Abstract. This article discusses the key aspects of emergencies at explosive and fire-hazardous facilities for the storage and processing of plant raw materials, such as grain silos, elevators,

flour mills, and feed mills. The authors use data from the annual reports of the Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor) for 2019–2023. Facilities for storage and processing of plant raw materials are characterized by increased danger associated with the formation of explosive dust-air mixtures, high concentration of combustible flour dust, as well as the operation of outdated equipment and non-compliance with technological regulations.

It is found that the main factors contributing to accidents are insufficient qualifications and training of personnel, violation of technological processes, as well as the lack of timely maintenance and modernization of equipment. Special attention is paid to the properties of flour dust as a combustible gas-air mixture that can cause explosions and fires under certain conditions, making its concentration control a key element of safety in such production facilities.

Keywords: industrial safety, explosive and fire-hazardous environment, vegetable raw materials, equipment, emergency, hazardous production facility

For Citation: Khusnoyarova R. I., Abdrakhmanova K. N. Organizational and technical causes of accidents at a hazardous production facility for storage and processing of plant raw materials // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 77–87.

Введение

Анализ статистических данных аварийности на объектах хранения и переработки растительного сырья играет важную роль в определении причин возникновения аварийных ситуаций. Основную опасность представляют образование взрывоопасных пылевоздушных смесей, продуктов, склонных к самовозгоранию и самосогреванию из-за повышения температуры сырья, а также наличие горючих и токсичных веществ в технологических процессах.

В качестве примера подобных аварий вспомним инцидент, произошедший 20 октября 2021 г. в г. Спасск-Дальний (Приморский край) на опасном производственном объекте «Элеватор» (III класс опасности) ООО «Мерси трейд». В зерносушилке элеваторного комплекса произошло возгорание загруженного для сушки растительного сырья. В результате пожара были повреждены кон-

струкции и оборудование зерносушилки. Пострадавших нет.

В сентябре 2023 г. произошла авария в АО «Уфимский комбинат хлебопродуктов» (Республика Башкортостан). В силосном корпусе (III класс опасности) комбикормового завода случилось воспламенение пылевоздушной смеси. В ходе расследования выяснилось, что причиной аварии послужило самовозгорание продуктов переработки подсолнечника, которые находились в силосе силосного корпуса. Тяжелые травмы получил сотрудник, были повреждены бункеры корпуса элеватора.

Так, в условиях современного производства аварии на взрывопожароопасных объектах хранения и переработки растительного сырья представляют собой одну из серьезнейших угроз для промышленной безопасности.

Далее будет проведен анализ причин возникновения аварий на опасных произ-

водственных объектах на основе данных отчетов и статистики по авариям.

Основная часть

В последнее время вопросы обеспечения промышленной безопасности на опасных производственных объектах (далее — ОПО) приобретают особую значимость. Это связано с ростом объемов производства и изменениями технологических процессов, которые требуют усиленного контроля и внедрения новых мер безопасности для предотвращения аварий и обеспечения защиты персонала.

К организациям, эксплуатирующим объекты хранения и переработки растительного сырья, относятся объекты, на которых образуются взрывоопасные пылевоздушные смеси, а также осуществляется хранение зерна, продуктов его переработки и комбикормового сырья, склонных к самосогреванию и самовозгоранию. Напомним, что зерно служит основным сырьем для производства хлебопродуктов и комбикормового комплекса.

Опасные производственные объекты, занимающиеся хранением и переработкой растительного сырья, относятся к III и IV классам опасности [1]. Сегодня в государственном реестре числится свыше 8 000 ОПО, специализирующихся на хранении и переработке растительного сырья.

Согласно классификации веществ и материалов по пожароопасности, растительное сырье относится к горючим веществам [2]. Опасность воспламенения сырья состоит в том, что при хранении в емкостях может начаться процесс окисления из-за недостаточной аэрации или переизбытка влаги, тем самым провоцируя процесс самосогревания.

Сушильные агрегаты (печи) представляют собой значительную опасность из-за высоких температур. При хранении сырья необходимо соблюдать температурный режим, уровень влажности и аэрацию. Зерно может подвергаться самосогреву, что в дальнейшем способно привести к самовозгоранию, особенно при неправильных условиях хранения. Во время сушки сырья необходимо поддерживать оптимальную температуру, характерную для каждого вида продукта, поскольку ее повышение может вызвать возгорание и последующий пожар. Эти устройства оснащены автоматическими системами контроля температуры, которые связаны с механизмами аварийного отключения [3].

Оборудование на данных объектах делится на основное и вспомогательное в зависимости от функций, которые оно выполняет. К основному оборудованию относятся машины и технологические линии, непосредственно задействованные в процессах дробления, измельчения и хранения сырья. Вспомогательное оборудование обеспечивает безопасные условия труда и включает аспирационные и вентиляционные системы, а также специализированные устройства для разряда взрывов.

Так как технологическая линия на таких объектах работает под избыточным давлением, существует риск возникновения взрывных процессов. Для снижения этого риска и защиты производственных помещений от разрушений используют взрыворазрядные устройства, которые разработаны с учетом методов расчета и рекомендаций, приведенных в инструкциях по проектированию и эксплуатации. Данная инструкция предназначена для оборудования опасных производственных объектов, связанных с хранением, переработкой растительного

сырья, и необходима для безопасной эксплуатации [4].

Нерегулярное ненадлежащее техническое обслуживание приводит к износу и поломкам оборудования, что может стать причиной аварийных ситуаций. Неисправное оборудование более подвержено перегреву, дефектам и нарушению технологического процесса, которые могут вызвать возгорание, взрыв и механические повреждения.

Отсутствие маркировки и технического паспорта, халатное отношение к технической документации создают ситуации, когда недостаточная информация о характеристиках, условиях и требованиях эксплуатации оборудования затрудняет обеспечение безопасности и своевременное обслуживание техники, а также регулярное обучение персонала и контроль за соблюдением правил безопасности.

Ненадлежащее техническое обслуживание, отсутствие марок и технического паспорта оборудования могут послужить факторами возникновения аварии.

Исходя из приказа Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (далее — Ростехнадзор) № 331 от 03.09.2020, при ведении технологических процессов на взрывопожароопасных объектах хранения и переработки растительного сырья не допускаются отклонения от технологического регламента (в т. ч. превышение установленных сроков хранения, температуры, влажности, сорности, зараженности вредителями, масличности), которые впоследствии могут инициировать очаги самосогревания и последующего самовозгорания [4].

В ходе технологических процессов, начиная с приемки зерна, заканчивая упаковкой, происходит образование мучной и зерновой пыли. Данная пыль представляет

собой серьезную опасность на объектах хранения и переработки растительного сырья. Обязательное требование при эксплуатации ОПО растительного сырья — это проведение аспирации.

Система аспирации — ключевой компонент обеспечения безопасности на объектах переработки растительного сырья. Она предназначена для удаления взрывоопасных пылевоздушных смесей, которые представляют собой основной источник опасности на рассматриваемых объектах. Установка аспирационных систем должна проводиться строго в соответствии с проектными требованиями. Монтаж может быть выполнен как собственными силами, так и с привлечением внешней организации. Требования к системам аспирации изложены в разделе VI [4].

Рассмотрим опасность мучной пыли и то, как она может повлиять на возникновение аварий, чтобы понять, насколько важна организация правильного обслуживания оборудования и систем вентиляции. Накопление пыли снижает эффективность работы оборудования, ускоряет коррозию и создает горючую среду, способную привести к взрывам при концентрации в воздухе и наличии источника воспламенения. Это обуславливает необходимость детального изучения причин аварий на объектах хранения и переработки растительного сырья, учитывая именно технологические и организационные факторы.

Для анализа проблемных ситуаций на этих объектах важны ежегодные отчеты Ростехнадзора за последние годы, в которых систематизированы данные о причинах аварий, включая случаи, связанные пылевыми взрывами, несоблюдением правил эксплуатации, недостаточным обслуживанием оборудования и нарушениями техники безопасности.

На основе ежегодных отчетов Ростехнадзора за период 2019–2023 гг. были выявлены основные причины возникновения аварий [5].

Организационные причины аварий на предприятиях могут иметь значительное влияние на промышленную безопасность и общую эффективность производства в целом. К таким факторам принадлежат управление, планирование и организация трудового процесса. Недостаточная квалификация персонала и отсутствие должностного обучения могут привести к ошибкам в работе и повысить риск возникновения аварийных ситуаций. К ним также относится нарушение порядка проведения работ и ведения технологических процессов, что может свидетельствовать об отсутствии должного контроля за соблюдением требований, изложенных в федеральных нормах и правилах в области промышленной безопасности, на поднадзорных предприятиях.

Нарушение периодичности проверок состояния устройств молниезащиты для зданий и сооружений I и II категорий на объектах хранения и переработки растительного сырья крайне опасно, т. к. эти объекты относятся к взрывопожароопасным и требуют усиленных мер безопасности.

Отсутствие надлежащего контроля молниезащиты увеличивает риск возгорания и взрывов, особенно учитывая наличие горючей мучной пыли и взрывоопасных пылевоздушных смесей.

Для обеспечения безопасности на таких объектах необходимо строго соблюдать требования по молниезащите и технике промышленной безопасности, а также своевременно обновлять и поддерживать всю нормативную документацию, регламентирующую эксплуатацию оборудования и процессы хранения и переработки растительного сырья.

Исходя из отчетов Ростехнадзора были выявлены нарушения правил промышленной безопасности, выражающиеся в ведении деятельности без соответствующей лицензии на эксплуатацию взрывопожароопасных и химических опасных производств I, II и III классов опасности, а также отсутствие разработанных мер по обеспечению безопасной эксплуатации зданий и сооружений указанных объектов.

Несмотря на то, что предприятия могут самостоятельно выбирать способ и организацию производственного контроля, основываясь на п. 18 [4], все же на данных предприятиях зафиксирован неудовлетворительный уровень производственного контроля.

К организационным причинам относятся регулярное отступление от технологических процессов, например, несоблюдение установленного порядка ведения работ, нарушение противопожарного режима — курение в неположенных местах, отсутствие локально-нормативной документации [3].

Проанализируем прочие причины возникновения аварийности на объектах хранения и переработки растительного сырья и сведем данные в таблицу.

Из данных таблицы мы видим, что аварии, связанные с нарушением порядка проведения работ и ведения технологических процессов, носят периодический характер.

В качестве примера приведем аварию, случившуюся в январе 2023 г. в Сорочинском городском округе (Оренбургская область). В зерносушильном отделении произошло воспламенение пылевоздушной смеси с последующим возгоранием соседних емкостей (рис. 1). В ходе расследования было выявлено, что первой причиной аварий послужили

технические неисправности. Возникло самовозгорание продуктов переработки подсолнечника, которые находились в силосе зерносушильного корпуса. Ко второй причине относилось отсутствие оснащения средствами дистанционного автоматизированного управ-

ления, блокировки, контроля и противоаварийной защиты, производственной и аварийной сигнализации, оповещения об аварийных ситуациях, а также отсутствие огнепреграждающих (пламеотсекающих) устройств системы локализации взрыва.

Таблица
Прочие причины возникновения аварий на ОПО хранения и переработки растительного сырья за 2019–2023 гг.

Table
Causes of accidents in the storage and processing of plant raw materials
in 2019–2023

Причины аварий Causes of accidents	Количество аварий (по годам) Number of accidents (years)				
	2019	2020	2021	2022	2023
Нарушение порядка проведения работ и ведения технологических процессов Violation of the order of work and maintenance of technological processes	2	1	2	3	1
Взрыв Explosion	1	0	0	0	1
Самосогревание Self-heating	0	0	0	0	1
Пожар, не связанный со взрывом пылевоздушной смеси или процессами самовозгорания зерна A fire unrelated to an explosion of a dust-air mixture or spontaneous combustion of grain	0	0	0	0	0
Загорание горючих материалов от источника пламенного горения Ignition of combustible materials from a source of flame gorenje	0	0	0	0	4
Короткое замыкание Short circuit	0	0	0	0	1
Неработоспособность молниезащиты Lightning protection failure	0	0	0	0	1
Всего Total	3	1	2	3	9



Рис. 1. Пожар в зерносушильном отделении

Fig. 1. Fire in the grain drying room

К техническим причинам возникновения аварий можно отнести неисправность оборудования, устаревшее оборудование и отсутствие регулярного технического обслуживания [6]. На каждое техническое устройство разрабатывается эксплуатационный паспорт изготовителя. Технические устройства и обо-

рудование должны соответствовать требованиям Технического регламента Таможенного союза от 18.10.2011 № 823 «О безопасности машин и оборудования».

На рис. 2 представлены основные технические причины аварий на ОПО хранения и переработки растительного сырья.

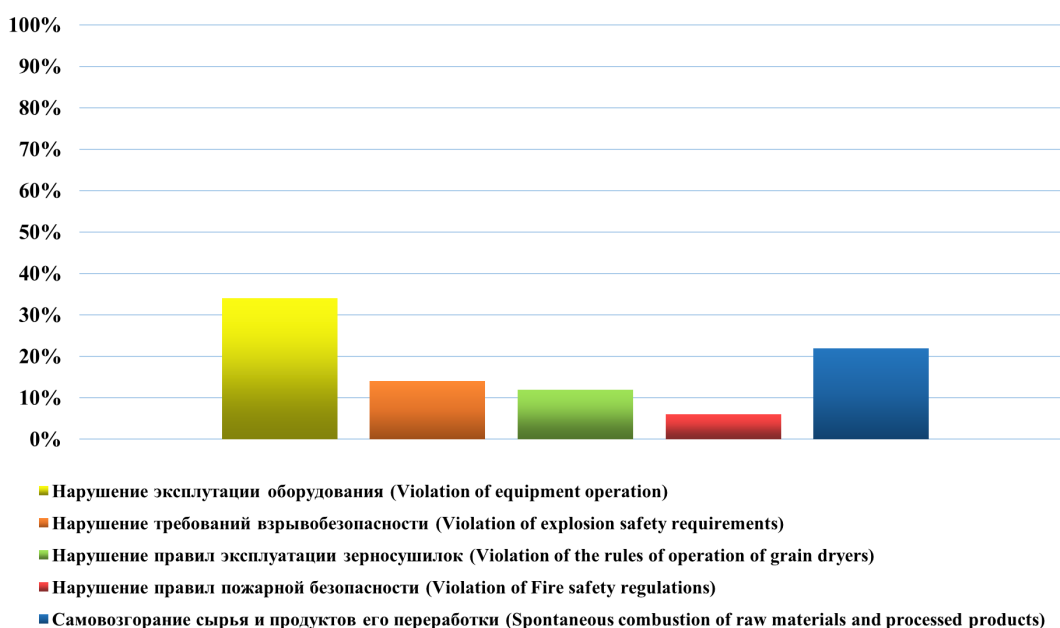


Рис. 2. Основные технические причины аварий на ОПО хранения и переработки растительного сырья

Fig. 2. The main technical causes of accidents in the storage and processing of plant raw materials

Из данных рис. 2 следует, что наибольший процент аварийности приходится на нарушение правил эксплуатации оборудования и самовозгорание сырья и продуктов его переработки.

Группа технических причин аварий на ОПО хранения и переработки растительного сырья включают несколько ключевых причин, которые напрямую способствуют возникновению аварийных ситуаций:

- эксплуатация устаревшего и изношенного оборудования, часто работающего под избыточным давлением: такие машины и линии имеют повышенный риск отказов и поломок, что может привести к выбросу горючих веществ или аварийным ситуациям;
- износ деталей, вибрации, коррозия и трещины в металле;
- накопление горючей мучной пыли внутри технологических помещений и оборудования, а также в аспирационных и вентиляционных системах: пыль, смешиваясь с воздухом, формирует взрывоопасные пылевоздушные смеси, которые при наличии источников воспламенения (искры, перегрев, электрические разряды) могут привести к взрывам и пожарам;
- отсутствие или неправильная работа систем взрывозащиты, включая взрыворазрядные устройства, системы пассивной и активной вентиляции, аспирации и молниезащиты: нарушения в этих системах ведут к росту вероятности аварий благодаря невозможности своевременно сбросить избыточное давление или предотвратить распространение пламени;
- нарушение регламентов технического обслуживания и периодичности планово-предупредительного ремонта оборудования: несвоевременная очистка, диагностирование неисправностей и замена изношенных элементов способствуют накоплению условий для аварии;
- ошибки монтажа, проектирования или несоответствие оборудования условиям производства: неверно выбранные материалы, неправильно

рассчитанные параметры технических устройств ухудшают общую надежность объектов;

- несоблюдение требований, предъявляемых к приводам, используемых в оборудовании для переработки растительного сырья, работающем на электрической энергии;
- неисправность подшипников валов может приводить к их перегреву, который в свою очередь может быть вызван такими факторами, как недостаточная смазка трущихся поверхностей, загрязнение, перегрузка оборудования и др.

Все перечисленные технические причины тесно связаны между собой и обуславливают высокий риск аварий на ОПО хранения и переработки растительного сырья. Для снижения риска важно проводить систематический контроль состояния оборудования, своевременный ремонт, обновление защитных систем и строгий контроль соблюдения технологических регламентов и правил промышленной безопасности.

Так, на объектах растительного сырья чаще всего организуют трехступенчатый производственный контроль. Система производственного контроля имеет весомое значение для обеспечения стабильности промышленной безопасности. Однако данная область имеет слабые стороны, что, соответственно, приводит к снижению уровня безопасности, особенно на опасных производственных объектах IV класса опасности, которые вовсе не подлежат плановым проверкам, а также на опасных производственных объектах III класса, для которых проверки проводятся не чаще одного раза в три года.

Выводы

В заключение отметим, что аварии на объектах, занимающихся хранением и переработкой растительной продукции, возникают по причинам, которые мы объединили в группы: организационные и технические.

К организационным причинам относятся низкая профессиональная подготовка сотрудников, несоблюдение установленных нормативных правовых форм и регламентов, слабое наблюдение за выполнением мер безопасности, а также несвоевременная оценка рисков и принятие необходимых решений.

Технические причины связаны с устаревшим или неисправным оборудованием, несоблюдением технологических процессов, недостаточной автоматизацией систем безопасности и ошибками в проектировании технологических линий.

Для предотвращения аварий необходимо комплексное улучшение организационной структуры, повышение уровня обучения и ответственности персонала, а также модернизация технологического оборудования и процессов. Такой подход позволит значительно снизить вероятность возникновения аварий и обеспечить безопасную эксплуатацию объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федер. закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ : принят Государственной Думой 20.06.1997 // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. URL: <https://clck.ru/3QS3tB> (дата обращения: 24.10.2025).
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон № 123 : принят Государственной Думой 04.07.2008 : одобрен Советом Федерации 11.07.2008 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 24.10.2025).
3. Бутин В. В., Антонов А. В., Шубкин Р. Г. Вероятностные аспекты возникновения и развития аварии на предприятиях хранения и переработки растительного сырья // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 1 (46). URL: <https://clck.ru/3QC9n8> (дата обращения: 24.10.2025).
4. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности взрывопожароопасных производственных объектов хранения и переработки растительного сырья» : приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.09.2020 № 331 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://clck.ru/3QC9Mh> (дата обращения: 23.10.2025).
5. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору // Ростехнадзор : офиц. сайт. URL: <https://clck.ru/3QCCTU> (дата обращения: 24.10.2025).
6. Фомин А. А. Анализ переработки сельскохозяйственной продукции в России и законодательное обеспечение развития отрасли // Московский экономический журнал. 2017. № 3. URL: <https://clck.ru/3QCCWN> (дата обращения: 24.10.2025).

REFERENCES

1. On Industrial Safety of hazardous Production Facilities : Federal Law dated 21.07.1997 № 116-FZ : adopted by the State Duma on 20.06.1997 // ConsultantPlus. URL: <https://clck.ru/3QS3tB> (date of application: 24.10.2025).
2. Technical Regulations on Fire Safety Requirements : Federal Law № 123 : adopted by the State Duma on 04.07.2008 : approved by the Federation Council on 11.07.2008 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (date of application: 24.10.2025).
3. Butin V. V., Antonov A. V., Shubkin R. G. Probabilistic aspects of the occurrence and development of accidents at enterprises storing and processing plant raw materials // Modern problems of civil protection. 2023. № 1 (46). URL: <https://clck.ru/3QC9n8> (date of application: 24.10.2025).
4. Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules for explosive and fire-hazardous production facilities for storage and processing of plant raw materials" : order of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated 03.09.2020 № 331 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://clck.ru/3QC9Mh> (date of application: 23.10.2025).
5. Annual reports on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Supervision // Rostekhnadzor : official website. URL: <https://clck.ru/3QCEiP> (date of application: 24.10.2025).
6. Fomin A. A. Analysis of agricultural processing in Russia and legislative support for the development of the industry // Moscow Economic Journal. 2017. № 3. URL: <https://clck.ru/3QCCWN> (date of application: 24.10.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хусноярова Расуля Ильмаровна, магистрант технологического факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); e-mail: Rarasulya2001@yandex.ru

Абдрахманова Карина Наилевна, канд. техн. наук, преподаватель кафедры промышленной безопасности и охраны труда Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); e-mail: akarinan@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rasulya I. Khusnoyarova, Master's student at the Faculty of Technology, Ufa State Petroleum Technical University (1 Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russian Federation); e-mail: Rarasulya2001@yandex.ru

Karina N. Abdrakhmanova, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer of Department of Industrial Safety and Labor Protection, Ufa State Petroleum Technical University (1 Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russian Federation); e-mail: akarinan@mail.ru

Поступила в редакцию 17.06.2025
Одобрена после рецензирования 16.07.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 614.846

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЖАРНОЙ НАСОСНО-РУКАВНОЙ СИСТЕМЫ СО ВСАСЫВАЮЩЕЙ ЛИНИЕЙ ДЛЯ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ

Савин Михаил Александрович¹, Егоров Григорий Иванович², Опарин Иван Дмитриевич¹, Жученко Сергей Андреевич¹

¹ Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² ООО «ГРЕГОР», г. Челябинск, Российская Федерация

Аннотация. Настоящая статья является продолжением публикации, представленной в журнале «Техносферная безопасность» (№ 3 (44) 2024 г.). Мы рассуждали о том, что в осенне-зимний период года серьезно ухудшаются показатели работы и надежность пожарных насосно-рукавных систем. Это увеличивает продолжительность тушения пожаров и потери от них. Отечественные спецагрегаты и их системы к низкотемпературным условиям эксплуатации приспособлены недостаточно. Следовательно, важны любые новые разработки, повышающие адаптивность агрегатов и пожарных насосно-рукавных систем, пожарного оборудования к низким температурам.

Для повышения надежности эксплуатации пожарных насосов и их всасывающих систем в ходе проведенного патентного поиска были рассмотрены несколько интересных прототипов. Среди них определено наиболее перспективное техническое решение — Патент № 2183975 «Способ подогрева воды, подаваемой по рукавным пожарным линиям» — как самое бюджетное, энергонезависимое, компактное устройство, позволяющее минимизировать темп льдообразования во всасывающей рукавной линии пожарного насоса, в т. ч. в его всасывающем патрубке.

Предлагаемая рукавная вставка во всасывающей линии пожарного насоса участвует во второй стадии процесса подогрева воды, поступающей из открытого водоисточника в спецагрегат. Положительный эффект достигается сначала как следствие известного относительно низкого КПД работающего центробежного пожарного насоса (т. е. самоподогрев воды дросселированием в спецагрегате), а затем — благодаря конструктивным особенностям вставки, позволяющим несколько уменьшить величину вакуума во всасывающей рукавной линии и, соответственно, снизить скорость роста льда на ее стенках.

Результаты предэксплуатационных тестирований рукавной вставки во всасывающей линии пожарного насоса предложенной конструкции, проведенных в январе 2025 г. в ходе Межведомственных опытно-исследовательских учений «Безопасная Арктика — 2025», свидетельствуют об ее эффективности.

Ключевые слова: насосы пожарные центробежные, разрежение, всасывающая рукавная линия, льдообразование, вставка рукавная

Для цитирования: Результаты экспериментальных исследований эффективности пожарной насосно-рукавной системы со всасывающей линией для зимних условий / М. А. Савин [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 88–110.

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFECTIVENESS OF THE FIRE PUMP AND HOSE SYSTEM WITH A SUCTION LINE FOR WINTER CONDITIONS

Mikhail A. Savin¹, Grigory I. Egorov², Ivan D. Oparin¹, Sergey A. Zhuchenko¹

¹ Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

² GREGOR LLC, Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract. This article is a continuation of a publication published in the journal "Technosphere Safety" (No. 3 (44), 2024). We discussed how the performance and reliability of fire pumping and hose systems are significantly reduced during autumn and winter. This increases firefighting time and fire losses. Domestic specialized units and their systems are not adequately adapted to low-temperature operating conditions. Therefore, any new developments that improve the adaptability of units, fire pumping and hose systems, and fire-fighting equipment to low temperatures are important.

To improve the operational reliability of fire pumps and their suction systems, several interesting prototypes were considered during the patent search. Among these, the most promising technical solution — Patent No. 2183975, "Method for Heating Water Supplied through Fire Hose Lines" — was identified as the most cost-effective, energy-independent, and compact device for minimizing the rate of ice formation in the suction hose line of a fire pump, including its suction nozzle.

The proposed hose insert in the suction line of a fire pump is used in the second stage of the heating process for water supplied from an open water source to a dedicated unit. This positive effect is achieved initially due to the relatively low efficiency of a centrifugal fire pump (i.e., self-heating of water by throttling in the dedicated unit), and then due to the insert's design features, which allow for a slight reduction in the vacuum in the suction hose line and, consequently, a slower rate of ice formation on its walls.

The results of pre-commissioning tests of the hose insert in the suction line of the fire pump of the proposed design, conducted in January 2025 during the Interdepartmental experimental research exercise "Safe Arctic — 2025", demonstrate its effectiveness.

Keywords: centrifugal fire pumps, vacuum, suction hose line, ice formation, hose insert

For Citation: The results of experimental studies on the effectiveness of the fire pump and hose system with a suction line for winter conditions / M. A. Savin et al. // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 88–110.

Введение

Из практики противопожарной службы известно, что длительное перекачивание

воды в условиях сурового климата может привести к образованию льда на внутренних стенках всасывающего патрубка и в рукавной линии пожарного насоса (далее — ПН)

из-за разрежения. Это явление существенно снижает пропускную способность и интенсивность подачи жидкого огнетушащего вещества (далее — ОТВ) в очаг пожара. Следовательно, конструктивно-технологическая адаптация элементов пожарно-спасательной техники к условиям низких температур — одно из стратегических направлений ее совершенствования в ближайшей перспективе.

В статье описана научно-исследовательская работа, цель которой — повышение уровня пожарной безопасности населения, объектов экономики и инфраструктуры высокоширотных территорий посредством анализа технических решений и технологий, обеспечивающих надежность спецагрегатов и пожарного оборудования в низкотемпературных условиях. Анализ необходим для разработки конструкции и проведения экспериментального исследования эффективности предлагаемой рукавной вставки во всасывающую линию для минимизации темпа льдообразования в ней.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) критически проанализированы патентные решения конструкций пожарных насосно-рукавных систем, предназначенных для работы в суровых условиях;
- 2) выбрано наиболее экономичное, простое по конструкции и в эксплуатации энергонезависимое устройство, полностью либо частично устраняющее льдообразование во всасывающей линии насоса, причем без применения каких-либо внешних теплоисточников и энергоносителей;
- 3) после обработки и интерпретации результатов исследований намечен необходимый перечень решений по до-

работке конструкции устройства и его повторного испытания.

В ходе работы был применен сравнительный эмпирический метод исследования, при котором производились измерения косвенных величин и их последующее сравнение, а именно сравнение величин разряжения/вакуума, имеющих место во всасывающей линии ПН при ее штатной комплектации и в случае добавления к ней предлагаемой рукавной вставки и ее включения в работу.

Актуальность темы определяется необходимостью повышения надежности насосно-рукавных систем (далее — НРС) при тушении крупных пожаров и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации.

Научная новизна работы заключается в разработке, конструировании и экспериментальной проверке на эффективность устройства, минимизирующего темп прироста льда на внутренних стенках элементов всасывающей рукавной линии и всасывающем патрубке пожарного насоса и без внешних теплоисточников, с возможностью его применения в Арктической зоне Российской Федерации.

Тестирование рукавной вставки во всасывающей линии ПН было проведено в январе 2025 г. в ходе Межведомственных опытно-исследовательских учений «Безопасная Арктика — 2025», во время отработки вводной № 11 «Ликвидация открытого фонтана нефтегазовой скважины (с возгоранием) в условиях Арктической зоны с последующей локализацией и ликвидацией разлива нефти» (далее — Вводная № 11) на испытательном полигоне ТПП «ЛУКОЙЛ-Усинскнефтегаз» (Республика Коми, г. Усинск). Результаты показали эффективность предложенной конструкции.

Так, при температуре окружающего воздуха в тестированиях -18°C , при диаметре

спрыска рукавной вставки \varnothing 13 мм и давлении воды в коллекторе насоса 0,93 МПа указанные разницы (дельты) величин разряжений во всасывающей линии ПН при нагнетании воды во вставку и отключении ее подачи находились в диапазоне 6–9 кПа.

Аналогично при диаметре spryska вставки \varnothing 19 мм и давлении воды в коллекторе насоса 0,98 МПа соответствующий диапазон разниц величин разряжений составил 5–8 кПа.

Таким образом, очевидно, что диапазоны разниц величин разряжений во всасывающей линии ПН в обоих экспериментах практически одинаковы, хотя имели место разные диаметры spryskov и, соответственно, различные величины расходов воды, нагнетаемых во вставку.

Практическая значимость заключалась в том, что результаты исследования направлены на формирование перспективного облика и основных характеристик пожарных насосных установок для их эффективного применения в низкотемпературных условиях.

Предполагалось, что в ходе испытаний будет установлено подтверждение эффективности конструктивных решений, примененных в устройстве, предназначенном для снижения темпа льдообразования на внутренних поверхностях всасывающей рукавной линии при тушении пожаров в условиях низких температур.

Аналитическая часть

Запатентованный способ и конструкция рукавной вставки подогрева воды во всасывающей линии ПН

Тушение пожаров в северных широтах страны сопряжено с рядом уникальных трудностей. Среди них выделяются значи-

тельная разобщенность городских поселений и производственных объектов, малая освоенность обширных территорий, отсутствие источников воды для нужд пожаротушения в холодное время года, а также высокие снежные покровы, из-за которых пожарной технике сложно не только приблизиться к месту возгорания, но и свободно маневрировать на пожаре.

В связи с этим в ходе проведенного исследования основной акцент в поиске и приоритезации технических решений делался на поступательное улучшение наиболее уязвимых по тактико-техническим характеристикам параметров пожарной насосной установки (ПН). Особое внимание уделялось повышению надежности ее всасывающей магистрали, учитывая работу в экстремальных климатических условиях севера.

Выбор был остановлен на Патенте РФ № 2183975 [1] как самом бюджетном, энергонезависимом, компактном устройстве, позволяющем минимизировать темп льдообразования во всасывающей рукавной линии ПН, в т. ч. в его всасывающем патрубке.

Цель решения, заложенного в изобретение «Способ подогрева воды, подаваемой по рукавным пожарным линиям» [1], заключается в увеличении протяженности магистральных рукавных линий в холодных климатических условиях без риска их замерзания. Это достигается за счет подогрева воды путем многократной рециркуляции части водяного потока насосом по «большому» и «малому» кругам как до начала, так и в течение всего процесса тушения пожара.

На рис. 1–4 представлены структурные схемы подключения гидравлического оборудования и рукавной вставки к центробежному пожарному насосу.

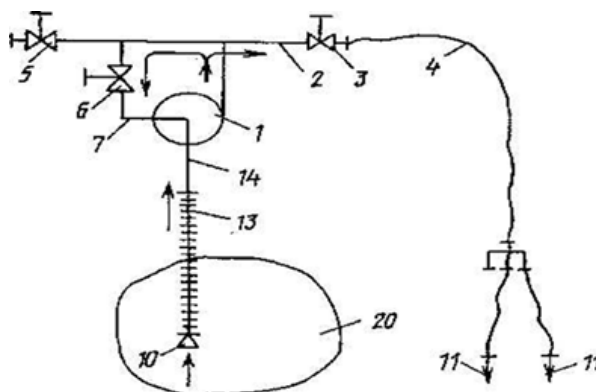


Рис. 1. Схема подключения гидравлического оборудования к пожарному центробежному насосу для подогрева воды за счет рециркуляции (перепуска) ее части по «малому» кругу (через коммуникации стационарного пеносмесителя ПН) [1]:

1 — пожарный насос; 2 — напорный коллектор; 3 — подводящий патрубкок; 4 — магистральная рукавная линия; 5, 6 — запорный кран; 7 — стационарный байпасный трубопровод; 10 — всасывающая пожарная сетка; 11 — ствол пожарный ручной; 13 — всасывающий рукав; 14 — всасывающий патрубкок

Fig. 1. Diagram of the hydraulic equipment connection to the fire centrifugal pump for water heating by recirculating (bypassing) part of it through the "small" circuit (via the stationary foam mixer FP communications) [1]:

1 — fire pump; 2 — pressure manifold; 3 — supply pipe; 4 — main hose line; 5, 6 — shut-off valve; 7 — stationary bypass pipeline; 10 — suction fire net; 11 — hand fire nozzle; 13 — suction hose; 14 — suction pipe

Так, на рис. 1 изображена схема, где напорный коллектор 2 насоса 1 соединяется с его всасывающим патрубком 14 через стационарный байпасный трубопровод 7 и запорную арматуру 6. Такие конструкции применяются, например, в стационарных пеносмесителях центробежных насосов.

Подогрев ОТВ внутри спецагрегата по «малому» байпасному контуру осуществляется с помощью стационарного трубопровода 7, который соединяет напорный коллектор 2 пожарного насоса 1 напрямую со всасывающим патрубком 14. Для этого достаточно открыть запорный кран 6, установленный на стационарном струйном пеносмесителе ПС-5 насоса типоразмера ПН-40. При этом кран, связывающий пенобак с пеносмесителем ПС-5, должен быть закрыт.

Благодаря диаметру сопла пеносмесителя ПС-5, равному 13 мм, и работе рабочего колеса на частоте вращения 2700 об/мин, насос создает напор 1,0 МПа, а расход воды через пеносмеситель достигает 6 л/с [2]. В такой ситуации на насос ПН-40УВ ложится рабочая нагрузка — он уже функционирует

не на холостом ходу, а мощность, потребляемая агрегатом, возрастает с 4 до примерно 29 кВт (см. рис. 1). Для насоса НЦПН-70/100М потребление электроэнергии в аналогичном режиме увеличивается с 51 до ориентировочно 55 кВт [3].

Возникающее тепло, которое образуется в результате преобразования указанной механической мощности, идет на подогрев воды как внутри самого спецагрегата, так и по всей длине пожарных рукавов. Здесь необходимо отметить, что потери энергии при переходе механической работы в тепловую, на примере насоса ПН-40УВ [4], составляют наибольшую долю эксергетических потерь — порядка 92,9–94,2 %. Отсюда следует, что в данном случае можно рассчитывать лишь на величины тепловой мощностей у насоса ПН-40УВ, это порядка 2 кВт, а у насоса НЦПН-70/100М — ~3,9 кВт.

Рециркуляция (перепуск) части огнетушащей жидкости по «большому» кругу достигается установкой предлагаемой вставки, размещенной между сеткой всасывающей 10 и всасывающим рукавом 13 (рис. 2).

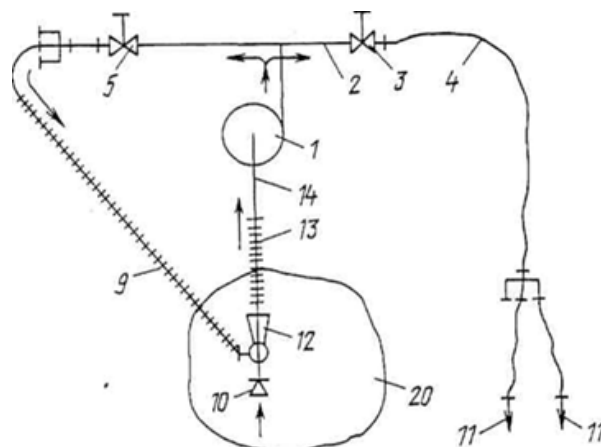


Рис. 2. Схема подключения гидравлического оборудования к пожарному центробежному насосу

для осуществления подогрева воды за счет рециркуляции (перепуска) ее части по «большому» кругу [1]:

- 1 — пожарный насос; 2 — напорный коллектор; 3 — подводящий патрубок; 4 — магистральная рукавная линия; 5 — запорный кран; 9 — байпасная линия; 10 — всасывающая пожарная сетка; 11 — ствол пожарный ручной; 12 — рукавная вставка; 13 — всасывающий рукав; 14 — всасывающий патрубок

Fig. 2. Diagram of the hydraulic equipment connection to the fire centrifugal pump for water heating by recirculating (bypassing) part of it through the "large" circuit [1]:

- 1 — fire pump; 2 — pressure manifold; 3 — supply pipe; 4 — main hose line; 5 — shut-off valve; 9 — bypass line; 10 — suction fire net; 11 — hand fire nozzle; 12 — hose insert; 13 — suction hose; 14 — suction pipe

Рукавная вставка выполнена из металла и по своей конструкции представляет собой струйный насос (рис. 3). Корпус вставки изготовлен в виде трубы соответствующего диаметра, по концам которой размещены муфтовые соединительные головки для интеграции в рукавную магистраль.

В центральной части корпуса жестко установлен подводящий патрубок 3: на одном его конце размещена рукавная арматура для подключения напорного гибкого байпасного рукава, а на другом — установлено

одноструйное сопло, на которое может быть установлена одна из двух сменных насадок 4. Важно отметить, что сопло ориентировано строго по оси вставки.

Комплект вставки предусматривает наличие двух сменных насадок — благодаря этому можно плавно регулировать диаметр струи, выбирая между отверстиями 13, 17 и 19 мм (см. рис. 3). Такой подход обеспечивает гибкость и универсальность применения устройства в зависимости от условий эксплуатации.

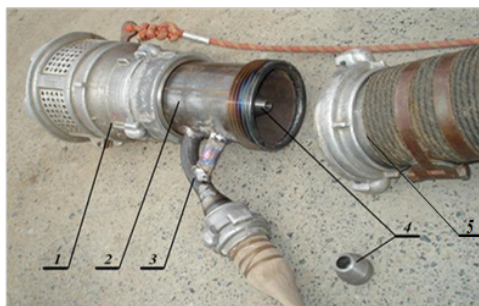


Рис. 3. Рукавная вставка для подогрева воды во всасывающей линии пожарного насоса:

- 1 — сетка всасывающая СВ 125; 2 — вставка в сборе; 3 — подводящий патрубок для присоединения напорного рукава; 4 — две сменные насадки; 5 — рукав всасывающий

Fig. 3. Hose insert for water heating in the suction line of the fire pump:

- 1 — suction grid SV 125; 2 — assembled insert; 3 — inlet pipe for connecting the pressure hose; 4 — two interchangeable nozzles; 5 — suction sleeve

Таким образом, весь «большой» байпасный контур, включающий подачу воды через рукавную вставку, будет находиться под давлением, точное значение которого может быть определено только в ходе экспериментальных испытаний. Эта мера направлена на снижение интенсивности образования льда во всасывающем трубопроводе насоса ПН [5, 6]. Строго говоря, здесь будет иметь место двухстадийный теплофизический процесс, а именно сначала вода, содержащаяся в полости спецагрегата (к примеру, в насосе типоразмера ПН-40 это порядка 18 литров), самоподогревается за счет трения о вращающееся рабочее колесо и стенки корпуса спецагрегата, а также его крышки со всасывающим патрубком. Затем некоторая ее часть под напором нагнетается во вставку для максимального понижения величины разряжения/вакуума во всасывающей рукавной линии. Это является второй стадией комбинированного процесса минимизации

льдообразования во всасывающей линии ПН.

Естественно, для определения, насколько аддитивен данный двухстадийный процесс либо здесь имеют место кумулятивные проявления, необходим соответствующий эксперимент.

Процесс подогрева воды в НРС реализуется следующим образом.

В зимний период, после забора воды из открытого источника 20 и наполнения ею внутренних полостей (см. рис. 4) всасывающего рукава 13 и ПН 1, запускается вращение рабочего колеса насоса. Затем полностью открывают задвижку 5 (или обе задвижки 5 и 6), и некоторое время огнетушащая жидкость циркулирует (перепускается) по следующему контуру: насос 1 → напорный коллектор 2 → байпасная линия 9 (или линии 9 и 7) → рукавная вставка 12 → всасывающий рукав 13 → пожарный насос 1. За счет этого цикла вода постепенно подогревается.

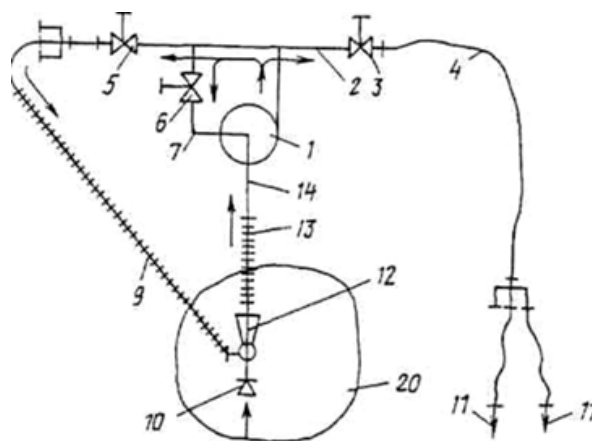


Рис. 4. Схема подключения гидравлического оборудования к пожарному центробежному насосу для осуществления комбинированного способа подогрева воды за счет рециркуляции (перепуска) ее части по «большому» и «малому» кругу [1]:

- 1 — пожарный насос; 2 — напорный коллектор; 3 — подводящий патрубок; 4 — магистральная рукавная линия; 5, 6 — запорный кран; 7 — стационарный байпасный трубопровод; 9 — байпасная линия; 10 — всасывающая пожарная сетка; 11 — ствол пожарный ручной; 12 — рукавная вставка; 13 — всасывающий рукав; 14 — всасывающий патрубок; 20 — открытый водоисточник

Fig. 4. Diagram of hydraulic equipment connection to the fire centrifugal pump for implementing a combined method of water heating by recirculating (bypassing) part of it through the "large" and "small" circuits [1]:

- 1 — fire pump; 2 — pressure manifold; 3 — supply pipe; 4 — main hose line; 5, 6 — shut-off valve; 7 — stationary bypass pipeline; 9 — bypass line; 10 — suction fire net; 11 — hand fire nozzle; 12 — hose insert; 13 — suction hose; 14 — suction pipe; 20 — open water source

Во время подогрева воды насос необходимо эксплуатировать на полной мощности двигателя внутреннего сгорания. Такой предварительный прогрев жидкости предотвращает образование пастообразной массы («шуги») при подаче первых порций воды через предварительно охлажденную напорную магистральную рукавную линию 4, когда открывают напорную задвижку 3. Без этого часто возникает закупорка пожарных стволов 11 и происходит промерзание всей основной напорной рукавной линии 4.

В дальнейшем поддержание необходимой температуры огнетушащей жидкости с помощью байпасной линии/линий продолжает осуществляться на протяжении всего времени тушения пожара.

Применение этого запатентованного технического решения значительно повышает надежность и адаптивность пожарного оборудования (в частности, НРС), позволяет устранить существующие недостатки и обеспечить выполнение всех требований, предъявляемых к специальным агрегатам и пожарной технике в данных условиях эксплуатации.

Из изложенного следует, что потребности практики требуют эффективного науч-

но-технического обеспечения в указанной области.

Изменение температуры воды при работе ПН от открытых водоисточников зимой

В экстремально низких метеорологических условиях температура воды в водопроводах опускается до $0,5\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$, в открытых водоисточниках, реках, озерах и прудах до $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (у зеркала воды) и до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на глубине). Примерные эпюры температур во всасывающей рукавной системе пожарного насоса при работе с открытого водоисточника зимой приведены на рис. 5.

На рис. 5 пунктирные линии графиков соответствуют случаю забора воды от поверхностных слоев, а сплошные — при работе спецагрегата с глубины открытого водоисточника. Дело в том, что в озерах и прудах умеренных широт термический режим определяется температурной стратификацией [7]. При этом поверхностный слой воды имеет температуру близкую к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а вблизи дна температура составляет порядка $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует ее максимальной плотности. Таким образом, вода в спокойных водоемах представляет собой слоеный пирог и с глубиной ее температура повышается скачкообразно.

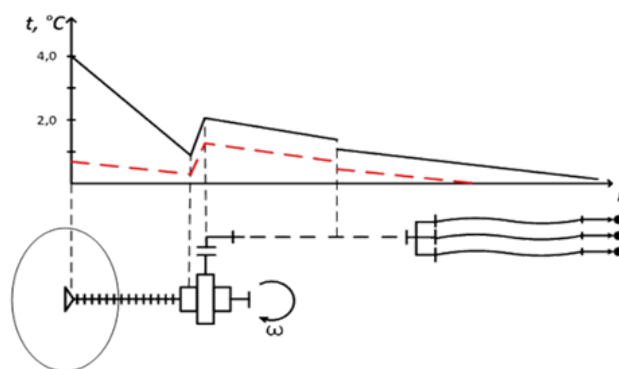


Рис. 5. Примерные эпюры температур в пожарной насосно-рукавной системе при работе от открытого водоисточника зимой

Fig. 5. Approximate temperature profiles in the fire pump-hose system when operating from an open water source in winter

Следовательно, при работе спецагрегата с глубины открытого водоисточника один из всасывающих рукавов (либо почти полностью оба) со всех сторон окружен холодной плотной средой и ею интенсивно охлаждается. Фрагменты всасывающей рукавной линии, находящиеся выше зеркала воды, омываются еще более холодным

воздухом. Имеют место ситуации невозможности выезда пожарного автомобиля (далее — ПА) на лед из-за его малой толщины и т. п. Поэтому всасывающую рукавную линию удлиняют за счет других ПА (рис. 6), в результате возрастают и площадь ее наружной поверхности, и диссипация теплоты.



Рис. 6. Межведомственные опытно-исследовательские учения «Безопасная Арктика — 2025». На переднем плане — сетка всасывающая, а сразу за ней просматриваются конструктив предлагаемой рукавной вставки и четыре всасывающих рукава

Fig. 6. Inter-agency experimental research exercises "Safe Arctic — 2025". In the foreground, the intake grid is visible, and just behind it, the design of the proposed hose insert and four suction hoses can be seen

Этот вывод коррелирует с мнением М. В. Алешкова [8] о том, что потери теплоты в окружающую среду от всасывающих рукавных (сравнительно коротких) систем при работе ПН от открытого водоисточника в низкотемпературных условиях сопоставимы с величинами теплопотерь от 100 метров пожарных напорных линий.

Таким образом, процессы эксплуатации пожарных всасывающих рукавных систем ПН зимой происходят в весьма сложных теплофизических условиях.

Методика и программа эксперимента

Для проведения эмпирических исследований были разработаны Методика [9],

программа и соответствующая экспериментальная установка.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка позволяет определить эффективность предлагаемой конструкции вставки во всасывающей рукавной линии спецагрегата.

Комплект оборудования включает ПА, оснащенный центробежным пожарным насосом типоразмера ПН-40, который укомплектован стандартными приборами для контроля давления — манометром и мановакууметром с классом точности 1,5.

На месте водозабора, согласно схеме (рис. 7), ПА подключается к необходимому

гидравлическому оборудованию, включая: всасывающую рукавную линию, собранную из одного всасывающего рукава, фильтрующей сетки СВ-125 и специальной рукавной вставки собственной конструкции (подробнее — на фото, рис. 6); два разветвления

РТ-80 с тремя выходами, оборудованных мерными шайбами: центральные выходные патрубки — с отверстиями $\varnothing 19$ мм, боковые штуцеры — $\varnothing 13$ мм; две напорные пожарные рукавные линии с рукавами $\varnothing 77$ мм (DN80) и четыре $\varnothing 51$ мм (DN50).

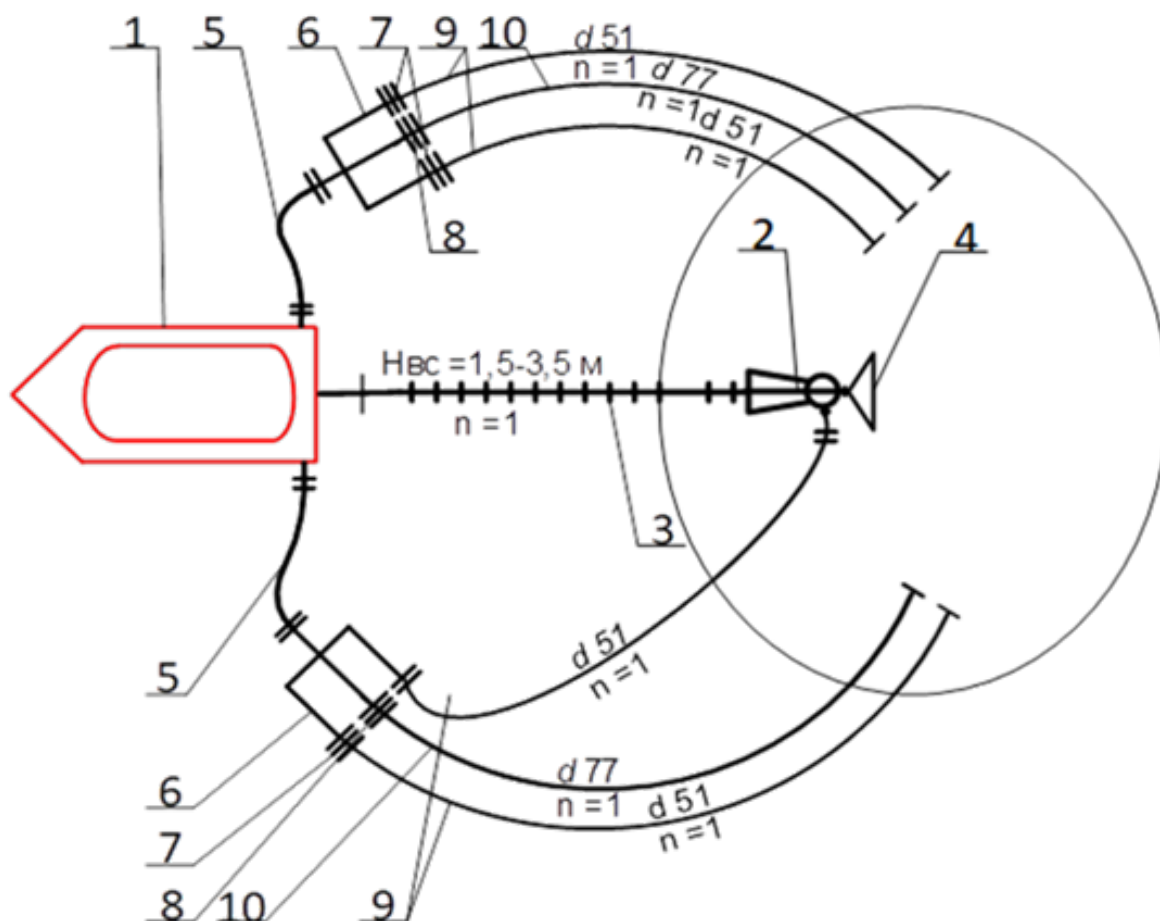


Рис. 7. Схема экспериментальной установки для тестирования рукавной вставки во всасывающей линии спецагрегата: 1 — автоцистерна пожарная с насосом типоразмера ПН-40; 2 — вставка в рукавную линию; 3 — рукав всасывающий $\varnothing 125$ мм (DN125); 4 — сетка всасывающая СВ-125; 5 — рукав напорный $\varnothing 77$ мм (DN80) длиной 4 м (2 шт.); 6 — разветвление трехходовое РТ-80 (2 шт.); 7 — шайба дросселирующая с отверстием $\varnothing 13$ мм (3 шт.); 8 — шайба дросселирующая с отверстием $\varnothing 19$ мм (2 шт.); 9 — рукав напорный $\varnothing 51$ мм (DN50) длиной 20 м (2 шт.); 10 — рукав напорный $\varnothing 77$ мм (DN80) длиной 20 м (2 шт.)

Fig. 7. Scheme of the experimental setup for testing the hose insert in the suction line of the special unit: 1 — fire truck with a PN-40 size pump; 2 — insert in the hose line; 3 — suction hose $\varnothing 125$ mm (DN125); 4 — suction grid SV-125; 5 — pressure hose $\varnothing 77$ mm (DN80) with a length of 4 m (2 units); 6 — three-way branch RT-80 (2 units); 7 — throttling washer with a $\varnothing 13$ mm hole (3 units); 8 — throttling washer with a $\varnothing 19$ mm hole (2 units); 9 — pressure hose $\varnothing 51$ mm (DN50) with a length of 20 m (2 units); 10 — pressure hose $\varnothing 77$ mm (DN80) with a length of 20 m (2 units)

Произвести объективную оценку эффективности конструктивно-технического решения согласно [1] представлялось до-

статочно затруднительным. Явление образования льда зимой на внутренних стенках трубопровода обусловлено наличием в нем

разряжения/вакуума, однако известно, что внутреннее льдообразование также имеет место и в напорных рукавах.

В то же время полагаем, что экспериментально проблематично непосредственно измерить зависимость темпа прироста слоя льда во всасывающей линии ПН в функции от величины вакуума в ней и ввиду других факторов, таких как ее диаметр, величины подач ПН, температура воздуха, наличие/отсутствие ветра, его скорость, время экспозиции и др.

Известно, что коэффициент теплопроводности чистого льда при 0 °С составляет 2,22 Вт/м·К, а у свежевывающего снега величина данного коэффициента — 0,1–0,15 Вт/м·К. По этому параметру снег можно отнести к теплоизоляторам, что и используется зимой на пожарах для защиты пожарной арматуры. Однако по мере слеживания снега коэффициент теплопроводности вырастает до 0,6–0,7 Вт/м·К [10]. Но даже в этом случае лед проводит и тепло, и холод в ~3 раза быстрее, чем снег.

Таким образом, без знания зависимости темпа нарастания слоя льда от величины разряжения/вакуума сложно спрогнозировать толщину слоя льда или соответствующий оставшийся просвет во всасывающей линии и патрубке ПН в функции времени, т. к. не понятно, как экспериментально реализовать методику непосредственного измерения этого параметра и во всей линии? Естественно, также весьма важно установить характер поведения функции. Действительно она носит линейный характер? Или это некая квадратичная нелинейность?

На основании изложенного было решено оценку эффективности конструк-

тивно-технического решения согласно [1] в процессе тестирований и по их итогам производить по косвенному параметру, а именно посредством измерения величины разряжения во всасывающей линии функционирующего ПН. Причем согласно [9] для реализации сравнительного эксперимента то воду нагнетали под постоянным давлением в рукавную вставку, то ее подачу перекрывали. Кроме того, согласно [9] также предусматривалось дискретное изменение величин напоров и подач от ПН при различных диаметрах sprысков вставки и при применении в экспериментальной установке одного всасывающего рукава.

До начала испытаний пожарный автомобиль прошел плановое сезонное техническое обслуживание. Кроме того, перед проведением эксперимента в Центральной базе инструментального тестирования МЧС России была выполнена поверка штатных измерительных приборов — манометра и мановакуумметра, установленных на спецагрегате.

В ходе эксперимента в протоколе фиксировалась температура окружающей среды. Для достижения требуемого уровня надежности ($N = 0,9–0,95$) каждый опыт проводили как минимум два-три раза.

Методика эксперимента

Дальнейшие испытания проходили согласно утвержденной Методике [9]. Результаты испытаний рукавной вставки во всасывающей линии предложенной конструкции, проведенных в рамках Межведомственных опытно-исследовательских учений «Безопасная Арктика — 2025», представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1
Сводный протокол испытаний рукавной вставки во всасывающей линии пожарного насоса
с диаметром срыска вставки Ø 13 мм (температура воздуха –18 °С) « » января 2025 г.
Table 1

Summary test report for a hose insert in the suction line of a fire pump with a spray
insert diameter of Ø 13 mm (air temperature minus 18 °C) « » January 2025

№ опыта Test №	Условия эксперимента Experimental conditions	Давление воды в коллекторе ПН Water pressure in collector FP		Вода на вставку подается Water supplied to insert		Вода на вставку не подается Water not supplied to insert	
		МПа MPa	м вод. ст. m w. c	Разряжение во всасыв. патрубке ПН Vacuum in FP suction pipe	Суммарная подача ПН Total supply of FP	Разряжение во всасыв. патрубке ПН Vacuum in FP suction pipe	Суммарная подача ПН Total supply of FP
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Пожарный насос работает «на себя» Fire pump operates «on yourself»	0,93	93	0	5,6	-20	0
2	Открыт центральный вентиль правого РТ-80 Central valve of right RT-80 opened	0,93	93	-27	17,5	-36	11,8
3	Открыты центральные вентили обоих РТ-80 Central valves of both RT-80s opened	0,93	93	-44	29,3	-52	23,6
4	Дополнительно открыт боковой вентиль правого РТ-80 Additional side valve of right RT-80 opened	0,93	93	-57	35,0	-63	29,3
5	Открыты центральные и правые вентили обоих РТ-80 Central and right valves of both	0,93	93	-66	40,7	-72	35,0
6	Открыты центральные и правые вентили обоих РТ-80, а также левый вентиль правого РТ-80 Central and right valves of both RT-80s opened, as well as left valve of right RT-80	—	—	—	—	—	—

Таблица 2

Сводный протокол испытаний рукавной вставки во всасывающей линии пожарного насоса с диаметром sprays вставки Ø 19 mm (температура воздуха -18 °C) « » января 2025 г.

Table 2

Summary test report for a hose insert in the suction line of a fire pump with a spray insert diameter of Ø 19 mm (air temperature minus 18 °C) « » January 2025

№ опыта Test №	Условия эксперимента Experimental conditions	Давление воды в коллекторе ПН Water pressure in collector FP		Вода на вставку подается Water supplied to insert		Вода на вставку не подается Water not supplied to insert	
				Разряжение во всасыв. патрубке ПН Vacuum in FP suction pipe	Суммарная подача ПН Total supply of FP	Разряжение во всасыв. патрубке ПН Vacuum in FP suction pipe	Суммарная подача ПН Total supply of FP
		МПа MPa	м вод. ст. m w. c	кПа kPa	л·с ⁻¹ l·s ⁻¹	кПа kPa	л·с ⁻¹ l·s ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Пожарный насос работает «на себя» Fire pump operates «on yourself»	0,98	98	0	12,3	-20	0
2	Открыт центральный вентиль правого РТ-80 Central valve of right RT-80 opened	0,98	98	-28	24,6	-36	12,3
3	Открыты центральные вентили обоих РТ-80 Central valves of both RT-80s opened	0,98	98	-45	30,6	-52	24,6
4	Дополнительно открыт боковой вентиль правого РТ-80 Additional side valve of right RT-80 opened	0,98	98	-71	36,6	-76	30,6
5	Открыты центральные и правые вентили обоих РТ-80 Central and right valves of both	—	—	—	—	—	—
6	Открыты центральные и правые вентили обоих РТ-80, а также левый вентиль правого РТ-80 Central and right valves of both RT-80s opened, as well as left valve of right RT-80	—	—	—	—	—	—

1. Для выполнения эксперимента ПА с насосом ПН-40 был развернут по схеме, представленной на рис. 6. Для управления разветвителями РТ-80 и регистрации параметров работы насоса к проведению испытания было привлечено пять участников.

2. Из резервуара автоцистерны заполнялась полость специального агрегата водой, после чего запускался его двигатель.

3. Затем осуществлялось включение коробки отбора мощности и сцепления ПА.

4. При постоянном напоре на коллекторе ПН снималась гидравлическая характеристика вставки посредством поочередного открытия/прикрытия вентилях штуцеров обоих разветвлений РТ-80 и соответствующих изменений расходов воды от насоса, с учетом подачи воды либо, напротив, полного прекращения ее подачи во вставку (не менее пяти-шести точек). Для чего необходимо:

4.1. При давлении порядка 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) плавно полностью открыть правую напорную задвижку на коллекторе спецагрегата, а затем аналогично левую. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды до ~1,0 МПа (10 атм) по манометру. Затем зарегистрировать в протоколе (первая строка) значения показателей манометра и мановакуумметра насоса (столбцы 3, 4, а также 7 и 8).

Далее уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть боковой вентиль

левого РТ-80, предназначенный для управления подачей воды на испытываемую рукавную вставку. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды до 1,0 МПа (10 атм) по манометру, зарегистрировать в протоколе (в первой строке столбцы 5, 6) показания мановакуумметра насоса.

Затем снизить давление на насосе и перекрыть подачу воды на вставку.

4.2. Далее уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть центральный вентиль правого РТ-80. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды до 1,0 МПа (10 атм) по манометру, зарегистрировать его в протоколе (во второй строке столбцы 3, 4). Также зарегистрировать в протоколе (во второй строке столбцы 7, 8) значения мановакуумметра.

Далее уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть боковой вентиль левого РТ-80, предназначенный для управления подачей воды на испытываемую рукавную вставку. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды до 1,0 МПа (10 атм) по манометру, зарегистрировать в протоколе (во второй строке столбцы 5, 6) значения мановакуумметра.

Снизить давление на насосе и перекрыть подачу воды на вставку.

4.3. Далее снова уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть центральный вентиль левого РТ-80. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды до 1,0 МПа (10 атм) по манометру, зарегистрировать его в протоколе (в третьей строке столбцы 3, 4). Также зарегистрировать в протоколе (в третьей строке столбцы 7, 8) значения мановакуумметра.

Далее уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть боковой вентиль левого РТ-80, предназначенный для управления подачей воды на испытываемую рукавную вставку. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса, довести давление воды по манометру до 1,0 МПа (10 атм), зарегистрировать в протоколе (в третьей строке столбцы 5, 6) значения мановакуумметра.

Снизить давление на насосе, перекрыть подачу воды на вставку.

4.4. Далее снова уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру и плавно полностью открыть боковой вентиль правого РТ-80. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса, довести давление воды до 1,0 МПа (10 атм) по манометру, зарегистрировать его в протоколе (в четвертой строке столбцы 3, 4).

Также зарегистрировать в протоколе (в четвертой строке столбцы 7, 8) значения мановакуумметра.

Далее уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть боковой вентиль правого РТ-80, предназначенный для управления подачей воды на испытываемую рукавную вставку. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды по манометру до 1,0 МПа (10 атм), зарегистрировать в протоколе (в четвертой строке столбцы 5, 6) значения мановакуумметра.

Снизить давление на насосе, перекрыть подачу воды на вставку.

4.5. Далее снова уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть 2-й боковой вентиль правого РТ-80. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды до 1,0 МПа (10 атм) по манометру, зарегистрировать его в протоколе (в пятой строке столбцы 3, 4). Также зарегистрировать в протоколе (в пятой строке столбцы 7, 8) значения мановакуумметра.

Далее уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть боковой вентиль правого РТ-80, предназначенный для управления подачей воды на испытываемую рукавную вставку.

Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды по манометру до 1,0 МПа (10 атм), зарегистрировать в протоколе (в пятой строке столбцы 5, 6) значения мановакуумметра.

Снизить давление на насосе, перекрыть подачу воды на вставку.

4.6. Далее снова уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть боковой вентиль левого РТ-80. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды до 1,0 МПа (10 атм) по манометру, зарегистрировать его в протоколе (в шестой строке столбцы 3, 4). Также зарегистрировать в протоколе (в шестой строке столбцы 7, 8) значения мановакуумметра.

Далее уменьшить количество оборотов вала рабочего колеса насоса и довести давление до 0,15–0,2 МПа (1,5–2 атм) по манометру, плавно полностью открыть боковой вентиль правого РТ-80, предназначенный для управления подачей воды на испытываемую рукавную вставку. Затем увеличить частоту вращения вала рабочего колеса насоса и довести давление воды по манометру до 1,0 МПа (10 атм), зарегистрировать в протоколе (в шестой строке столбцы 5, 6) значения мановакуумметра.

Снизить давление на насосе, перекрыть подачу воды на вставку.

5. Повторить действия пп. 4.1–4.6, но только в противоположном направлении, дискретно, т. е. перекрывая вен-

тили на разветвлениях РТ-80 при одинаковом давлении на ПН по манометру. Результаты измерений величин напоров по манометру и разрежений по мановакууметру с подачей воды на рукавную вставку и без ее подачи занести в протокол. Таким образом, в каждой ячейке протокола, кроме шестой строки, будут проставлены результаты двух измерений величин.

6. Далее согласно Методике (см. пп. 4–5) [9] необходимо провести серию экспериментов при том же диаметре spryska вставки 19 мм и напорах на ПН и вставке 0,9 МПа, 0,8 МПа, а также 0,7 МПа. Результаты занести в протокол, представленный в виде табл. 1.

7. Внести изменения в конструкцию рукавной вставки, а именно заменить sprysk \varnothing 19 мм на sprysk \varnothing 13 мм, и провести соответствующую серию экспериментов согласно Методике (см. пп. 4–5). Результаты занести в протокол, представленный в виде табл. 2.

Результаты опытов и их обсуждение

Обработка опытных данных позволила получить выводы и рекомендации, составившие инжиниринг.

Полученные в экспериментах величины были занесены в сводные протоколы (см. табл. 1, 2). Зарегистрированные величины параметров были определены как среднее арифметическое результатов соответствующих измерений в экспериментах сначала с восходящим, а затем — с нисходящим трендом изменения величин расходов воды от ПН, на фоне наличия либо отсутствия движения воды по «большому» байпасному кругу, т. е. через рукавную вставку в его

всасывающую линию. Так, расход воды через рукавную вставку определялся по известным диаметрам ее sprысков $\varnothing 19$ мм и $\varnothing 13$ мм, давлению на коллекторе ПН и справочным числовым данным [2].

В процессе тестирований фиксировался такой весьма важный показатель, как величина разряжения/вакуума во всасывающей линии спецагрегата. Данный параметр — косвенный признак темпа льдообразования в ней. Причем, поскольку согласно Методике проводился сравнительный эксперимент, то данный параметр определялся как при наличии, так и при отсутствии подачи воды через рукавную вставку во всасывающую линию ПН. Априори предполагалось, что нагнетание жидкого ОТВ во вставку должно понизить величину разряжения/вакуума во всасывающей линии спецагрегата. Следствием этого является минимизация темпа льдообразования [5, 6] прежде всего на внутренних стенках всасывающего патрубка ПН, что в конечном счете повысит надежность пожарных насосно-рукавных систем в низкотемпературных условиях. Другими словами, чем больше разница (дельта) регистрируемых величин разряжений с включенной вставкой и без подачи в нее воды, тем эксплуатация пожарных насосно-рукавных систем зимой будет более надежной и эффективной.

На основании результатов экспериментов, отраженных в сводных протоколах (табл. 1 и 2), были построены графики (рис. 8).

Действительно, при температуре окружающего воздуха в тестированиях -18°C при диаметре sprыска рукавной вставки $\varnothing 13$ мм и давлении воды в коллекторе насоса 0,93 МПа указанные дельты величин разряжений находились в диапазоне 6–9 кПа. При подаче воды в рукавную вставку ее расход составлял $5,6 \text{ л}\cdot\text{с}^{-1}$.

Аналогично при диаметре sprыска вставки $\varnothing 19$ мм и давлении воды в коллекторе насоса 0,98 МПа соответствующий диапазон разряжений составил 5–8 кПа. При этом величина подачи ОТВ на вставку соответствовала $12,3 \text{ л}\cdot\text{с}^{-1}$.

Очевидно, что диапазоны разниц величин разряжений в обоих экспериментах практически одинаковы, хотя имели место разные диаметры sprысков и, соответственно, различные величины расходов воды, нагнетаемых во вставку.

Таким образом, результаты предэксплуатационных тестирований рукавной вставки во всасывающей линии предложенной конструкции, проведенных в рамках Межведомственных опытно-исследовательских учений «Безопасная Арктика — 2025» по Вводной № 11 на испытательном полигоне ТПП «ЛУКОЙЛ-Усинскнефтегаз» (Республика Коми, г. Усинск) свидетельствуют об ее эффективности (см. табл. 1, 2, рис. 8).

Модернизация рукавной вставки

Величины эффективных мощностей струй, истекающих из sprысков рукавной вставки, составляли:

$$N_{\text{эфф}} = \rho \cdot \gamma \cdot Q \cdot H = 9,81 \cdot 1000 \cdot 5,6 \cdot 1000^{-1} \cdot 93 \cdot 1000^{-1} = 5,11 \text{ кВт.}$$

$$N_{\text{эфф}} = \rho \cdot \gamma \cdot Q \cdot H = 9,81 \cdot 1000 \cdot 12,3 \cdot 1000^{-1} \cdot 98 \cdot 1000^{-1} = 11,82 \text{ кВт.}$$

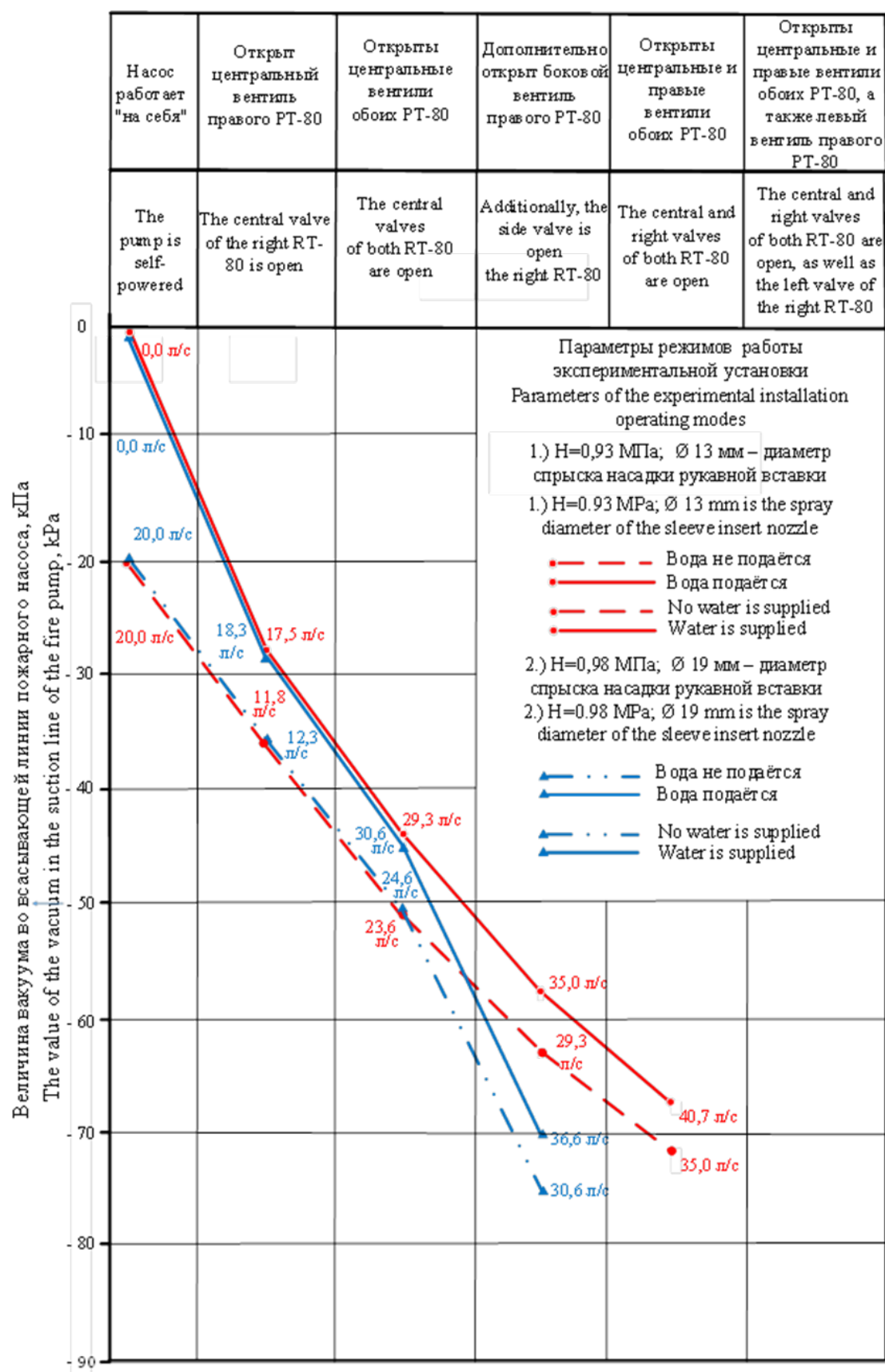


Рис. 8. Графики параметров всасывающей линии насоса типоразмера ПН-40 экспериментальной установки на различных режимах его работы

Fig. 8. Graphs of parameters of the suction line of the PN-40 size pump in the experimental setup under various operating modes

Достижение минимизации величины разряжения во всасывающей линии ПН (а в идеале — создания избыточного давления в ней) возможно повышением эффективных мощностей струй, истекающих

из вставки посредством возрастания их подачи. Последнее предлагалось обеспечить через увеличение диаметра подводящего патрубка 51 мм (DN50) вставки и ее сменных насадок (рис. 9).



Рис. 9. Вставка рукавная модернизированная в комплекте со сменными насадками

Fig. 9. Upgraded hose insert complete with interchangeable nozzles

Однако проведенные эксперименты с модернизированной рукавной вставкой успеха не имели: никаких изменений разниц (дельт) величин разряжений во всасывающей линии спецагрегата типоразмера ПН-40 при напоре 0,9 МПа как с подключенной, а также при отключенной вставке и отдельно с каждой из сменных насадок зарегистрировано не было.

Осмысление полученного отрицательного результата с позиции уравнения Бернулли и новых конструктивных особенностей вставки все объясняет.

Действительно, подводимый к вставке поток ОТВ, ранее уже несколько подогретый в ПН и обладающий большей эффективной мощностью, истекающий из ее насадки, обеспечивал определенный положительный

результат, т. е. понижение величины разряжения во всасывающей линии ПН.

Однако применение в конструкции модернизированной вставки подводящего патрубка \varnothing 51 мм (DN50) вместо предыдущего \varnothing 23 мм (DN25) привело к существенному уменьшению площади сечения, по которому движется ОТВ в корпусе вставки, и, соответственно, к увеличению скорости его движения. Но это автоматически приводит к возрастанию величины разряжения в данном сечении, что в итоге и обеспечивает нулевой эффект от предложенных и реализованных конструктивно-технических решений по модернизации вставки. Последнее полностью нивелирует эффект, достигнутый на первой стадии процесса, и прямо противоречит цели исследования — понижение

темпа льдообразования во всасывающей линии ПН.

Заключение

1. В процессе проработки задач исследования критически проанализированы шесть патентных решений конструкций ПНРС и их элементов, а также ряд организационно-технических решений, призванных обеспечить повышение эффективности и надежности ПН и элементов их всасывающих систем линий при работе в низкотемпературных климатических условиях.

2. Выбор был остановлен на Патенте № 2183975 «Способ подогрева воды, подаваемой по рукавным пожарным линиям» [1]. Задача данного изобретения — увеличить длину магистральной рукавной линии в условиях низких температур без перемерзания путем подогрева жидкого ОТВ, подаваемого по рукавным линиям, посредством повторной многократной рециркуляции (перепуска) части потока воды ПН по «малому» и/или «большому» байпасным кругам как перед началом, так и в течение всего периода пожаротушения.

Полагаем целесообразным рекомендовать практическим работникам осуществлять предварительный самоподогрев ОТВ в агрегате перед подачей в напорную линию посредством «малого» байпасного круга, т. е. рециркуляцией (перепуском) воды через коммуникации пеносмесителя ПС-5 (причем кран, соединяющий пенобак с пеносмесителем, должен оставаться закрытым). Таким образом, агрегат уже будет работать не на холостом ходу, т. к. у него

появилась нагрузка и к нему дополнительно поступает механическая энергия от ДВС, часть которой преобразуется в теплоту, подогревая находящуюся в нем воду.

Согласно [1] рециркуляция части жидкого ОТВ по «большому» кругу достигается установкой вставки предлагаемой конструкции между сеткой всасывающей и всасывающим рукавом. Рукавная вставка представляет собой струйный насос. Таким образом, предполагается, что весь «большой» байпасный круг, т. е. с подачей воды через рукавную вставку, должен будет находиться под напором, что призвано обеспечить падение темпа льдообразования во всасывающей линии ПН.

Вставка является простым по конструкции и в эксплуатации энергонезависимым компактным, экономичным устройством, которое призвано полностью либо частично устранить льдообразование во всасывающей линии ПН, причем без применения каких-либо внешних теплоисточников и энергоносителей.

Результаты проведенных предэксплуатационных тестирований рукавной вставки во всасывающей линии предложенной конструкции, проведенных в рамках Межведомственных опытно-исследовательских учений «Безопасная Арктика — 2025» по Вводной № 11 на испытательном полигоне ТПП «ЛУКОЙЛ-Усинскнефтегаз» (Республика Коми, г. Усинск), свидетельствуют об его эффективности (см. табл. 1, 2, рис. 8).

Действительно, при температуре окружающего воздуха в тестированиях -18°C при диаметре sprays рукавной вставки $\varnothing 13$ мм и давлении воды

в коллекторе насоса 0,93 МПа указанные разницы (дельты) величин разряжений во всасывающей линии ПН при нагнетании воды во вставку и отключении ее подачи находились в диапазоне 6–9 кПа.

Аналогично при диаметре spryska вставки \varnothing 19 мм и давлении воды в коллекторе насоса 0,98 МПа соответствующий диапазон разниц величин разряжений составил 5–8 кПа.

Таким образом, очевидно, что диапазоны разниц величин разряжений во всасывающей линии ПН в обоих экспериментах

практически одинаковы, хотя имели место разные диаметры spryskov и, соответственно, различные величины расходов воды, нагнетаемых во вставку.

3. После обработки и интерпретации результатов проведенных эмпирических исследований намечены решения по доработке конструкции вставки в рукавную всасывающую линию ПН, которые, с учетом результатов последующих испытаний, предстоит оформить в виде заявки на Патент РФ на полезную модель.

Таким образом, задачи исследования решены, цель исследования достигнута.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 2183975 С2 Российская Федерация, МКИ А 62 С 31/00. Способ подогрева воды, подаваемой по рукавным пожарным линиям : № 2000112246/12 : заявл. 15.05.2000 : опубл. 27.06.2002 / М. А. Савин [и др.] // Роспатент : сайт. URL: <https://clck.ru/3QKqC3> (дата обращения: 13.10.2025).

2. ГОСТ 34350–2017. Техника пожарная. Основные пожарные автомобили. Общие технические требования. Методы испытаний : утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25.09.2018 № 650-ст : введен впервые // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://clck.ru/3QKqbn> (дата обращения: 24.10.2025).

3. Синельникова Е. А., Майоров В. Е., Бурдин А. М. Высокопроизводительные пожарные насосы — новое конструктивное исполнение // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы Международной науч.-практ. конф. М., 2008. Ч. 2. С. 67–71.

4. Белоусов В. С., Савин М. А., Саркисов С. В. Эксергетическая оценка эффективности использования теплоты для самоподогрева воды насосом пожарного автомобиля // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22, № 2. С. 65–72.

5. Егоров Г. И. Повышение работоспособности систем насосных установок пожарных автомобилей : дис. ... канд. техн. наук. М., 1993. 170 с.

6. Маэно Н. Наука о льде. М., 1988. 231 с.

7. Михайлов В. Н., Михайлова М. В. Температурная стратификация // Вода России: научно-популярная энциклопедия. URL: <https://clck.ru/oYgvG> (дата обращения: 25.11.2025).

8. Алешков М. В. Методы оценки эффективности применения сил и средств для тушения пожаров критически важных для национальной безопасности страны объектов при экстремальных

метеорологических условиях // Научно-технический сборник соискателей, докторантов и адъюнктов Академии ГПС МЧС России. 2012. № 2. С. 12–23.

9. Методика апробации устройства для снижения обледенения всасывающей линии пожарного насоса. Межведомственные опытно-исследовательские учения «Безопасная Арктика — 2025» / Уральский институт ГПС МЧС России. Екатеринбург, 2025. 10 с.

10. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М., 1973. 320 с.

REFERENCES

1. Patent № 2183975 C2 Russian Federation, IPC A 62 C 31/00. Method for heating water supplied through fire hose lines : № 2000112246/12 : application 15.05.2000 : published 27.06.2002 / М. А. Savin [et al.] // Rospatent : website. URL: <https://clck.ru/3QKqC3> (date of application: 13.10.2025).

2. GOST 34350–2017. Fire fighting equipment. The main fire trucks. General technical requirements. Test methods : approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 25.09.2018 № 650-st : introduced for the first time // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://clck.ru/3QKqbn> (date of application: 24.10.2025).

3. Sinelnikova E. A., Mayorov V. E., Burdin A. M. High-performance fire pumps — a new design implementation // Current issues of fire safety : Materials of the International Scientific Practical Conference. М., 2008. Part 2. Pp. 67–71.

4. Belousov V. S., Savin M. A., Sarkisov S. V. Exergy assessment of the efficiency of using heat for self-heating of water by a fire engine pump // Fire explosion safety. 2013. Vol. 22, № 2. Pp. 65–72.

5. Egorov G. I. Improving the performance of pump systems of fire engines : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. М., 1993. 170 p.

6. Maeno N. The Science of Ice. М., 1988. 231 p.

7. Mikhailov V. N., Mikhailova M. V. Temperature Stratification // Water of Russia: popular science encyclopedia. URL: <https://clcl.li/oYgvG> (date of application: 25.11.2025).

8. Aleshkov M. V. Methods for assessing the effectiveness of using forces and means to extinguish fires at facilities critical to the country's national security under extreme meteorological conditions // Scientific and technical collection of applicants, doctoral students, and adjuncts of the Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2012. № 2. Pp. 12–23.

9. Methodology for testing a device for reducing icing of the suction line of a fire pump. Interdepartmental experimental research exercise «Safe Arctic — 2025» / Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Yekaterinburg, 2025. 10 p.

10. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Fundamentals of Heat Transfer. Moscow, 1973. 320 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савин Михаил Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС

МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 426337; e-mail: m.savin50@mail.ru

Егоров Григорий Иванович, канд. техн. наук, инженер пожарной безопасности, директор ООО «ГРЕГОР» (454112, Российская Федерация, г. Челябинск, просп. Победы, д. 296-15); e-mail: egorovgrig17@mail.ru

Опарин Иван Дмитриевич, канд. экон. наук, инженер пожарной безопасности, доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 793882; e-mail: oparinivan@mail.ru

Жученко Сергей Андреевич, курсант факультета пожарной и техносферной безопасности Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); e-mail: serezazucenko@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail A. Savin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Associate Professor of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment, and Specialized Technical Means, Ural Institute of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); RSCI ID: 426337; e-mail: m.savin50@mail.ru

Grigory I. Egorov, Cand. Sci. (Eng.), Fire Safety Engineer, Director of GREGOR LLC (296-15 Pobedy Ave., Chelyabinsk, 454112 Russian Federation); e-mail: egorovgrig17@mail.ru

Ivan D. Oparin, Cand. Sci. (Econ.), Fire Safety Engineer, Associate Professor of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment, and Specialized Technical Means at the Ural Institute of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); RSCI ID: 793882; e-mail: oparinivan@mail.ru

Sergey A. Zhuchenko, Cadet of the Faculty of Fire and Technosphere Safety, Ural Institute of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); e-mail: serezazucenko@gmail.com

Поступила в редакцию 21.05.2025
Одобрена после рецензирования 04.07.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 614.841.1

ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЯ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ С ДВУМЯ КАТУШКАМИ И ПРИВОДОМ ОТ КАРДАННОЙ ПЕРЕДАЧИ В ПОЖАРНУЮ АВТОЦИСТЕРНУ

Турков Владислав Александрович¹, Елфимова Марина Владимировна², Монахов Дмитрий Игоревич³, Зыбин Антон Олегович⁴

¹ Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

³ ООО «Пожинтех», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлены результаты разработки и экспериментальной отработки нового модуля и ствола ручного пожаротушения с применением технологии тонкораспыленной воды. Целью исследования являлось повышение эффективности локализации и тушения очагов возгорания при одновременном снижении расхода огнетушащего вещества и минимизации вторичных повреждений от воды. Проведен анализ существующих конструкций стволов и модулей подачи воды, выявлены их ограничения при тушении пожаров в замкнутых пространствах и на объектах с чувствительным оборудованием. На основе результатов исследований создан прототип ствола, обеспечивающий формирование устойчивого факела с регулируемой дисперсностью капель и равномерным распределением водяного аэрозоля. Экспериментальные испытания подтвердили, что применение тонкораспыленной воды позволяет повысить охлаждающую и инерционную эффективность тушения на 25–30 % при снижении расхода воды до 40 % по сравнению с традиционными системами. Разработанный модуль может быть интегрирован в комплексы мобильного и переносного пожарно-спасательного оборудования, что повышает оперативные возможности подразделений МЧС России при ликвидации возгораний различной категории сложности.

Ключевые слова: тонкораспыленная вода, ручное пожаротушение, ствол пожарный, модуль пожаротушения, эффективность тушения, инновационные технологии МЧС России

Для цитирования: Интеграция модуля тонкораспыленной воды с двумя катушками и приводом от карданной передачи в пожарную автоцистерну / В. А. Турков [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 111–125.

INTEGRATION OF A DUAL-REEL, CARDAN-DRIVEN WATER MIST MODULE INTO A FIRE TRUCK

Vladislav A. Turkov¹, Marina V. Yelfimova², Dmitriy I. Monakhov³, Anton O. Zybin⁴

¹ Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation

² Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

³ LLC "Pozhintech", Saint Petersburg, Russian Federation

⁴ Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This paper reports the design and experimental validation of a new handheld water-mist nozzle and suppression module. The goal was to improve fire localization and extinguishment while simultaneously reducing agent consumption and limiting secondary water damage. The analysis of existing nozzle and water delivery module designs was conducted, identifying their limitations when extinguishing fires in confined spaces and at facilities with sensitive equipment. Based on these findings prototype nozzle was developed that generates a stable spray plume with tunable droplet-size distribution and uniform mist dispersion. Experimental tests confirmed that the use of finely atomized water increases the cooling and inertial extinguishing efficiency by 25–30 % while reducing water consumption by up to 40 % compared to traditional systems. The designed module can be integrated into portable and vehicle-mounted fire-and-rescue equipment, enhancing the operational capability of EMERCOM of Russia units in extinguishing fires of varying complexity.

Keywords: water mist, handheld firefighting, fire nozzle, suppression module, extinguishing efficiency, innovative technologies, EMERCOM of Russia

For Citation: Integration of a dual-reel, cardan-driven water mist module into a fire truck / V. A. Turkov et al. // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 111–125.

Введение

Современные условия тушения пожаров требуют от пожарно-спасательных подразделений высокой мобильности, экономичности и универсальности применяемых средств. Традиционные системы подачи воды, несмотря на проверенную эффективность, характеризуются значительным расходом огнетушащего вещества, высоким гидравлическим сопротивлением и ограниченной маневренностью при работе в стесненных условиях. Эти факторы существенно снижают оперативные возможности расчетов, особенно при ликвидации очагов возгорания в зданиях сложной планировки, на транспорте и промышленных объектах.

Применение технологии тонкораспыленной воды (далее — ТРВ) открывает новые

возможности повышения эффективности ручного пожаротушения. Формирование струи с оптимальной дисперсностью капель позволяет достичь высокой интенсивности охлаждения зоны горения и снижения температуры продуктов пиролиза при значительно меньшем расходе воды. Это обеспечивает экономию водных ресурсов, сокращает объем вторичных повреждений имущества и повышает экологическую безопасность тушения [1, 2].

Кроме того, разработка новых конструктивных решений стволов и модулей подачи ТРВ способствует увеличению длины эффективной струи, что расширяет тактические возможности личного состава при работе в условиях ограниченного доступа к очагу пожара. Компактность и малая масса оборудования повышают маневренность пожарных,

снижая физическую нагрузку и повышая безопасность их действий.

Таким образом, совершенствование ручных средств пожаротушения на основе технологии тонкораспыленной воды представляет собой актуальное научно-техническое направление, ориентированное на повышение эффективности и устойчивости пожарно-спасательных операций в современных условиях.

Целью исследования является создание модулей и оценка их эффективности ТРВ: два трехплунжерных насоса UDOR VXX-B160/180 R, разгрузочные PA VB 200/150 и предохранительные PA VS200/180 клапаны, манометр ТМ-321Т.10 (0–25 МПа), входная фильтрация IS ADL Dy42, две рукавные катушки «Катушка под РВД 1/2 V3», трубная обвязка $42 \times 2/22 \times 2/25$ $2/20 \times 2$ и силовая рама на уголке $60 \times 60 \times 3$ и швеллере 8У. Отдельная задача — увязать эту спецификацию с требованиями к приводной части и показать, какие уставки и геометрические решения минимально достаточны для устойчивой работы.

Вместо абстрактной «схемы» рассмотрим последовательность узлов в том виде, как она реализуется на раме. Заборная линия через фильтр IS ADL Dy42 подает воду на всасывание двух трехплунжерных насосов, установленных параллельно на общую плиту с виброопорами. Насосы работают на общий напорный коллектор из трубы 42×2 с переходами $25 \times 2/22 \times 2/20 \times 2$ по месту подключения арматуры. На коллекторе размещены: манометр ТМ-321Т.10 (0–25 МПа) для постоянного контроля режима, разгрузочный клапан PA VB 200/150, отводящий избыток подачи в байпас при выходе за рабочую точку, и предохранительный клапан PA VS200/180 как аварийная отсечка.

От коллектора подача разделяется на две катушки «Катушка под РВД 1/2 V3», на которых смонтированы рукава длиной около 30 м с внутренним диаметром порядка 15–16 мм (DN20). Каждая оперативная линия заканчивается стволом, подобранным под режим «туман/струя».

Силовая часть выполнена в логике «кардан — муфта — редуктор — насосы». Карданный вал автомобиля через ответный фланец соединяется с упругой кулачковой муфтой; далее вращение передается на вход редуктора и распределяется на валы насосов через такие же упругие муфты. На этапе пусконаладки допустима работа и без редуктора, если фактические обороты устройства отбора мощности попадают в требуемый диапазон насосов; при расхождении по частоте редуктор с передаточным числом в пределах 0,8–1,2 позволяет точно попасть в нужный режим без перегрузки по моменту. Силовая рама сварена из уголка $60 \times 60 \times 3$; силовые пояса и опоры под насосы и катушки выполнены на швеллере 8У, что обеспечивает жесткость при массе модуля порядка сотен килограммов.

Современные тенденции и направления развития

Тонкораспыленная вода (водяной туман) в последние десятилетия рассматривается как эффективное и экологически безопасное средство тушения пожаров различных классов [3, 4]. Применение мелкодисперсных капель позволяет существенно повысить эффективность охлаждения и инертизации очага горения, при этом минимизируя ущерб от воды благодаря дымоосаждающему эффекту [4]. Современные установки ТРВ активно развиваются с 1990-х гг. при неиз-

менности базовых принципов действия: испарение капель с поглощением тепла и вытеснение кислорода паром [4].

В международной практике основополагающими документами являются стандарт NFPA 750 [5] и руководящие циркуляры ИМО, регламентирующие одобрение судовых систем водяного тумана [6]. В России действуют актуализированные нормативы СП 5.13130.2009/2021 [7] и СП 485.1311500.2020 [8], согласно которым тонкораспыленный поток характеризуется средним диаметром капель $\leq 100\text{--}150$ мкм. Для модульных установок применим ГОСТ Р 53288–2009, задающий технические требования и методы испытаний [9]. Все это отражает признание технологии TPB как самостоятельного и перспективного направления пожаротушения.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают высокую эффективность систем TPB, особенно при высоком давлении, что обеспечивает быстрое испарение капель и эффективное охлаждение зоны горения [3, 4, 10, 11]. Отмечено, что оптимизация параметров насадок и характеристик огнетушащей среды позволяет снижать расход воды при сохранении требуемой интенсивности тушения [10, 11].

Развитие применения TPB для тушения литий-ионных аккумуляторов

Отдельно стоит отметить перспективность применения технологии тонкораспыленной воды для тушения пожаров литий-ионных аккумуляторов, которые становятся все более актуальной задачей с распространением электротранспорта и систем накопления энергии. Недавние испытания, проведенные при участии STIF и Шведского агентства гражданской защиты

(MSB), показали, что подача тонкораспыленной воды непосредственно в аккумуляторный модуль, находящийся в состоянии теплового разгона, обеспечивает быстрое охлаждение элементов и полное прекращение горения без повторного воспламенения [10]. Так, время тушения батареи электромобиля составило порядка 4 мин при расходе всего ~ 240 л воды [11, 12], тогда как традиционные методы пожаротушения (наружное орошение водой, пена и т. д.) зачастую требуют многократно большего объема (несколько тонн) и существенно большего времени для ликвидации подобного очага [12]. Высокая эффективность TPB в данном случае обусловлена интенсивным теплоотводом за счет мгновенного испарения мелких капель в ядре горящего аккумулятора, тогда как пена, инертные газы или порошковые составы не способны столь же эффективно охлаждать ячейки и остановить прогрессирующий тепловой разгон [13]. Кроме того, водяной туман способствует осаждению токсичных продуктов горения: экспериментально отмечено значительное снижение концентрации опасных газов (например, фтороводорода HF) в дымовых выбросах при подаче воды [14]. Эти преимущества расширяют область применения технологии TPB, делая ее перспективной для тушения пожаров современного высокоэнергетического оборудования (электромобили, аккумуляторные модули и т. д.) в сравнении с традиционными средствами.

На практике системы водяного тумана получили широкое распространение как за рубежом, так и в России. Компании Fogtec (Германия) и Danfoss SEM-SAFE (Дания) внедряют насосные комплексы высокого давления 100–140 бар, обеспечивающие

распыление со средним диаметром капель 50–100 мкм [15]. В России развиваются аналоги, включая линейки установок высокого давления «Атака» и системы FOGSTREAM [15, 16]. Кроме того, распространены автономные модульные устройства с газовым вытеснителем, такие как «Иней», «Ураган-13» и «Гарант-160» [13], применяемые для локальной защиты небольших помещений без подключения к стационарному водопроводу.

Таким образом, современный рынок систем тонкораспыленной воды характеризуется разнообразием решений: от автономных модулей до мощных насосных комплексов. Представляемая работа направлена на развитие этого направления за счет создания проекта насосного модуля ТРВ для установки в пожарную автоцистерну, с обоснованием компоновки и расчета рабочих режимов.

Основная часть

Модуль работает по прямолинейной схеме «фильтр — насосный коллектор — арматура — две катушки — рукава ≈ 30 м — ствол ТРВ-ВД», где два трехплунжерных насоса создают требуемое давление, разгрузочный клапан удерживает рабочую точку, а предохранительный обеспечивает аварийную отсечку [15, 16]. Целевое давление на входе ствола ТРВ-ВД сохраняется в диапазоне 2,0–2,5 МПа, что дает устойчивый факел в режимах «туман/струя» и комфортную отдачу на рукоятке. Поскольку модуль рассчитан на маневренную работу в коридорах и лестничных клетках, ключевым параметром был выбран уровень давления на каждой оперативной линии длиной порядка 30 м (DN20).

Для непосредственного тушения задействуется пожарный ствол высокого давления ТРВД.634262.001 с pistolетной рукояткой. ТРВД.634262.001 — это комбинированный ручной пожарный ствол высокого давления, способный формировать как сплошную, так и мелкораспыленную струю воды для тушения пожаров классов А и В в зданиях и сооружениях. Конструкция ствола предусматривает режим сплошной струи (узкий компактный поток) и режим распыленной струи (водяной «туман» широкого конуса). Переключение режимов осуществляется поворотом кожуха насадки, при этом обеспечивается ровное распределение воды по конусу распыла. Ниже приведены основные технические характеристики ствола в двух режимах работы:

- минимальное рабочее давление: 2,0 МПа для сплошной струи; 4,5 МПа для распыленной; повышенное давление необходимо для тонкого распыла капель;
- рабочее давление (номинальный диапазон) до 16,0 МПа, предельное испытательное — 20,0 МПа. Такая высокая прочность позволяет использовать ствол с насосами высокого давления (до ~ 160 –180 бар);
- расход воды: $\approx 1,37$ л/с (≈ 82 л/мин) в режиме сплошной струи; $\approx 0,45 \pm 0,03$ л/с (≈ 27 л/мин) в режиме распыла (значения при минимально допустимых давлениях). Эти значения существенно ниже, чем у традиционных стволов низкого давления (см. сравнение далее);
- дальность действия: $\sim 20 \pm 1$ м для сплошной струи; $\sim 12 \pm 1$ м для распыленной струи при указанных давлениях. То есть «дальнобойность» снижается в режиме тумана, но взамен охватывается большая площадь поблизости.

Согласно исходным данным выполним гидравлический расчет. Гидравлические потери при работе одной линии аппроксими-

руются классическими выражениями [17]. Базовая составляющая описывает потери на трение по закону Дарси — Вайсбаха:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2}, v = \frac{4Q}{\pi D^2}, Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad (1)$$

где:

$L \approx 30$ м — длина;

D — внутренний диаметр рукава (для DN20 принимаем $D \approx 0,015$ м);

Q — расход на линию;

ρ и μ — плотность и динамическая вязкость воды.

Коэффициент трения λ удобно брать по явной формуле Хааланда, адекватной для инженерных оценок:

$$\lambda \approx \left[-1,8 \log_{10} \left(\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right) \right]^{-2}, \quad (2)$$

где ε — эквивалентная шероховатость внутренней поверхности рукава (для новой гладкой вставки разумно $\varepsilon \sim 10^{-5}$ – 10^{-4} м).

Вклад местных сопротивлений — поворотных узлов на катушке, кранов, штуцеров и переходов — учитывается добавкой:

$$\Delta p_{\text{мс}} = (\sum \zeta_i) \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3)$$

или, что практичнее в экспресс-оценке, эквивалентной длиной $L_{\text{eq}} \zeta D / \lambda$ и учетом ее в суммарной длине [17]. Тогда требуемое давление, которое должен обеспечить насосный коллектор для каждой линии, записывается без лишних деталей:

$$p_{\text{нас}} \approx p_{\text{noz}} + \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{мс}}, \quad (4)$$

где p_{noz} — целевое давление на входе ствола ТРВ-ВД.

Для ориентира в наших геометриях при $Q = 0,40$ л/с получаем скорость $v \approx 2,26$ л/с, число Рейнольдса $Re \sim 3,4 \cdot 10^4$, коэффициент трения $\lambda \approx 0,035$ и потери на трение порядка $\Delta p_{\text{тр}} \approx 0,18$ МПа на 30 м. При $Q = 0,40$ л/с скорость возрастает до $v \approx 2,26$ м/с, и трение дает уже $\Delta p_{\text{тр}} \approx 0,18$ МПа. С учетом местных сопротивлений суммарное падение давления для рабочих расходов 0,3–0,4 л/с естественным образом попадает в интервал 0,10–0,18 МПа на линию; при повышении

до 0,5 л/с падение может приближаться к 0,3 МПа, и это следует учитывать уставкой. На полученную величину давления ориентировались при настройке разгрузочного клапана: его уставка выбирается чуть выше $p_{\text{noz}} + \Delta p_{\text{линия}}$ (плюс технологический запас), а предохранительный клапан настраивается как верхний предельный уровень, исключающий перегрузку узлов.

Поскольку ствол ТРВ-ВД определяет фактический расход при данном давлении, важно его корректно «привязать» через K -фактор. Для воды с $\rho \approx 1\,000$ кг/м³ модель сводится к линейной зависимости

$$Q = K \sqrt{\frac{\Delta p_{noz}}{\rho}} \quad (5)$$

и удобна для полевой калибровки: по одной реперной точке $K = Q / \sqrt{(\Delta p_{noz}) / \rho}$ при наличии 3–5 точек K уточняется методом наименьших квадратов (прямая, проходящая через начало). Практический смысл прост: зная K , оператор заранее видит, какое давление нужно задать на коллекторе, чтобы получить требуемый расход в режиме «туман» или «струя» после 30-метровой линии [18]. В нашем случае расход составил 0,45 л/с в режиме «туман» и давление 16 МПа. Небольшой

расход существенно снижает водяной ущерб и риск затопления нижерасположенных помещений, что критично для объектов культуры, архивов, электроустановок и т. п. [13].

Силовая часть модуля строится на карданном приводе от РТО Ford Transit, упругих кулачковых муфтах и, при необходимости, компактном согласующем редукторе. Если фактические обороты РТО не совпадают с требуемыми оборотами насосов, связь задается передаточным отношением

$$i = \frac{n_{in}}{n_{out}} \text{ (для повышающего } i < 1), \quad (6)$$

где:

n_{in} — обороты на входе редуктора (вал РТО);

n_{out} — обороты на валу насосов.

Мощность на валу насосной группы при данном режиме оценивается через создаваемый напор:

$$P_{вал} \approx \frac{Q_{\Sigma} p_{нас}}{\eta_{pump}}, \quad (7)$$

после чего крутящий момент на выходе редуктора равен:

$$T_{out} = \frac{9550 P_{вал}}{n_{out}}, T_{in} = \frac{T_{out}}{\eta_{гп} i}, \quad (8)$$

где:

P — в кВт;

n — в об/мин;

$\eta_{гп} \approx 0,97$ — КПД зубчатой пары.

Для характерного суммарного расхода $Q_{\Sigma} = 0,8$ л/с и давления на коллекторе $p_{нас} \approx 2,3$ МПа при $\eta_{pump} = 0,85$ получаем $P_{вал} \approx 2,2$ кВт. Если насосы работают на $n_{out} = 1\,000$ об/мин, то T_{out} порядка 20–21 Н·м; при $i = 0,9$ и $\eta_{гп} = 0,97$ вход-

ной момент составит примерно 23–24 Н·м. Эти значения относятся к установившемуся режиму, поэтому для выбора муфты вводится коэффициент запаса по перегрузкам $S_f = 1,5–2,0$ и используется практическое правило

$$T_{\mu, ном} \geq S_f \frac{9550 P_{вал}}{n_{in}}. \quad (9)$$

Если редуктор выполнен в виде одноступенчатой цилиндрической пары, силовая прикидка в зацеплении сводится к тангенциальной силе $F_t = 2T_{out}/d_1$ (с диаметром начальной окружности $d_1 = mz_1$); проверка прочности зубьев проводится по стандартным критериям изгиба и контактной выносливости σ_F и σ_H с требуемыми запасами (на практике при наших мощностях и оборотах достаточно межосевого расстояния порядка 100–120 мм и венца шириной 40–50 мм в «ванне» с брызговой смазкой).

На основании приведенных выше параметров был изготовлен опытный образец. Предварительные испытания показали результаты: при двух линиях по 0,3–0,4 л/с оператор уверенно удерживает факел в коридоре 2,0–2,5 МПа на стволе, а насосный коллектор «видит» добавочные 0,1–0,2 МПа на линию и удерживается разгрузкой. Это позволяет настроить уставки один раз и далее воспроизводить режимы без подбора

«на слух», а силовая часть с запасом по моменту и демпфирующими муфтами обеспечивает мягкую работу от кардана без излишней вибрации.

Сравнение с традиционными решениями

В табл. 1–3 приведено сравнение опытного модуля ТРВ, описанного в статье, с классическими пожарными модулями низкого и среднего давления по широкому набору параметров. Под низким давлением подразумевается стандартная система с центробежным насосом и ручными стволами на напоре ~0,4–0,6 МПа, например, РСК-50 [19]. Под средним давлением рассматривается традиционная комбинированная система с повышенным напором порядка 2–4 МПа (включая высоконапорные катушки), например, высокая ступень насоса в режиме ~4 МПа или ручной ствол высокого давления (РСКУ-20ВД) [19].

Таблица 1

Сравнение основных гидравлических характеристик ТРВ-модуля и традиционных систем низкого/среднего давления

Table 1

Comparison of the main hydraulic characteristics of a thermostatic expansion valve module and traditional low/medium pressure systems

Параметр Parameter	Модуль ТРВ Water-mist module (fine water mist)	Традиционное низкое давление (ручной ствол, ~0,5 МПа) Conventional low pressure (hand nozzle, ~0.5 MPa)	Традиционное среднее давление (высоконапорный модуль) Conventional medium pressure (high-pressure module)
Рабочее давление Operating pressure	2,0–4,5 МПа минимально; номинально до ~16 МПа: испытательное — 20 МПа. Предполагается работа с насосами ~160–180 бар 2.0–4.5 MPa minimal; nominal up to ~16 MPa (test — 20 MPa)	Около 0,4–0,6 МПа на выходе ручного ствола (типичное давление для РСК-50). Подается от насоса ~0,8–1,0 МПа About 0.4–0.6 MPa at the hand nozzle outlet	~2–4 МПа на выходе высоконапорного ствола (например, режимы 2–3 МПа для РСКУ-20ВД) ~2–4 MPa at the high-pressure nozzle outlet
Расход воды (сплошная струя)	~1,37 л/с (82 л/мин) при минимальном рабочем давлении. При 16 МПа может быть выше	≥ 2,7 л/с при 0,4 МПа на стволе (для РСК-50). Классические стволы РС-50 с насадком Ø13–19 мм могут давать	~4 л/с (типично максимум для линии среднего давления). Например, ручной ствол РСКУ-50А также ~4 л/с

Окончание таблицы 1

Параметр Parameter	Модуль TPB Water-mist module (fine water mist)	Традиционное низкое давление (ручной ствол, ~0,5 МПа) Conventional low pressure (hand nozzle, ~0.5 MPa)	Традиционное среднее давление (высоконапорный модуль) Conventional medium pressure (high-pressure module)
Water flow (solid jet)	≈1.37 l/s (82 l/min) at minimal operating pressure	3,6–7,4 л/с при 0,4 МПа ≥ 2.7 l/s at 0.4 MPa at the nozzle	на 0,5 МПа, а РСКУ-20ВД дает ~2 л/с на 3 МПа ~4 l/s (typical maximum for medium pressure line)
Расход воды (распыленная струя) Water flow (spray)	≈0,45 ± 0,03 л/с (≈27 л/мин) при тонком распылении (минимальное давление ~4,5 МПа). На 1 ствол: 0,3–0,5 л/с в типовых режимах ≈0.45 ± 0.03 l/s (≈27 l/min) in fine spray	≥ 2,0 л/с распыленной струи при 0,4 МПа (РСК-50 на узком факеле ~20°). При полном угле ~70° расход близок к максимальному (около 2,0 л/с) ≥ 2.0 l/s spray at 0.4 MPa	~2 л/с (для высоконапорных мелкодисперсных стволов). Например, РСКУ-20ВД: ~2 л/с при 3 МПа в режиме «туман» ~2 l/s (for high-pressure fine-spray nozzles)
Дальность струи (сплошная) Reach (solid jet)	≈20 м (при давлении ~2 МПа на стволе). На максимальном режиме дальность может возрасти, но ограничивается распылением ≈20 m (at ~2 MPa at the nozzle)	≥ 30 м (при 0,4 МПа на РСК-50 сплошная струя достигает 30 м; РС-50 с насадком Ø19 мм — до ~32 м) ≥ 30 m (at 0.4 MPa)	~25 м (высоконапорный компактный струйно-распыленный ствол достигает 25 м на 3 МПа). При 2 МПа — порядка 30 м ~25 m (high-pressure compact jet-spray nozzle)
Дальность струи (распыленная) Reach (spray)	≈12 м (тонкий водяной туман при ~4,5 МПа). При более высоком давлении зона эффективного тумана может увеличиваться ≈12 m (fine water mist at ~4.5 MPa)	≥ 11 м (распыленная струя РСК-50 при узком факеле ~40° достигает ~11 м; при максимальном угле дальность меньше) ≥ 11 m (spray jet of low-pressure nozzle)	~16 м (распыленная струя высокого давления, угол ~30°, при 3 МПа достигает 16 м). Более узкий факел на высоком давлении дает 20+ м ~16 m (spray jet at high pressure)
Угол факела (охват) Nozzle cone angle (coverage)	Регулируемый факел: от узкой струи до широкого тумана. Конструкция насадка обеспечивает широкий конус распыла. Возможно достижение угла ~70–90° Adjustable cone: narrow jet to wide mist (up to ~70–90°)	До 70° максимум (РСК-50: угол факела распыла 40–70°). Защитная водяная завеса ~120° обычно недоступна для низкого давления Up to 70° maximum	До 120° (струйно-распылительные стволы высокого давления способны формировать очень широкий факел, например, РСКУ-20ВД: диапазон 0–120°, включая режим «водяная завеса») Up to 120° (including "water curtain" mode)
Стабильность давления на стволе Pressure stability at the nozzle	Высокая: давление на насадке поддерживается ~2,0–2,5 МПа при работе двух линий. Падение на трение (~0,1–0,2 МПа на 30 м) компенсируется разгрузочным клапаном High: pressure maintained ~2.0–2.5 MPa with two lines operating	Средняя: давление зависит от расхода и работы насоса. При подключении нескольких стволов или изменении режима возможны просадки, требующие регулировки насосом. Обычно поддерживается оператором ~0,4–0,5 МПа, но без автоматической стабилизации Moderate: pressure depends on pump and flow	Средняя: в системах среднего давления часто есть поддержание давления (редукционные клапаны), однако колебания возможны Moderate: pressure control often exists, but fluctuations possible

Таблица 2

Сравнение эксплуатационных (массогабаритных и тактико-технических) параметров

Table 2

Comparison of operational (weight, dimensions and performance) parameters

Параметр Parameter	Модуль ТРВ Water-mist module	Традиционное низкое давление Conventional low pressure	Традиционное среднее давление Conventional medium pressure
Масса насосного модуля Module weight	Около 150 кг (два плунжерных насоса по ~60 кг + рама и комплектующие). Установлен на легком шасси (фургон Ford Transit) About 150 kg (2 plunger pumps ~60 kg each + frame and components)	~80 кг (масса центробежного насоса низкого давления НЦПН-40/100 без привода; устанавливается на пожарной автоцистерне) ~80 kg (low-pressure centrifugal pump)	~190 кг (масса комбинированного насоса с высокой ступенью, например, НЦПК-40/100-4/400 М), плюс привод. Обычно монтируется на тяжелом шасси пожарного автомобиля ~190 kg (combined pump with high stage)
Масса рукавной линии Hose line weight	Значительно ниже: ~20–25 кг для 30 м высоконапорного рукава с водой. Гибкий шланг на катушке, Ø ~16 мм ~20–25 kg for 30 m high-pressure hose with water	~50 кг для 20 м стандартного рукава Д-51 с водой (сухой рукав 8 кг + ~40 кг воды). Обычно требуется два сотрудника для маневра с линией Ø 51 мм ~50 kg for 20 m standard D-51 hose with water	~30 кг для 40 м линии высокого давления с водой. Рукава среднего давления на катушках обычно меньше по длине, но все еще тяжелее линий ТРВ ~30 kg for 40 m high-pressure line with water
Маневренность и удобство Maneuverability and ease	Высокая: компактный ствол и легкий рукав позволяют быстро перемещаться и переносить линию в одиночку или вдвоем. Оборудование занимает меньше места, удобно в стесненных пространствах High: compact nozzle and light hose allow rapid movement	Ограниченная: толстые и тяжелые рукава затрудняют работу в ограниченных пространствах; для протяжки линии часто нужны два сотрудника. Стволы низкого давления относительно легкие (~1,4 кг), но сама линия громоздка Limited: thick heavy hoses impede work	Средняя: рукав Ø ~25 мм более гибкий, катушка позволяет оперативно разматывать, однако сопротивление высокого давления создает реактивную силу. Требуется удерживать струю, хотя нагрузка меньше, чем при крупном расходе Moderate: reel speeds deployment but reactive force requires effort
Время разворачивания Deployment time	Минимальное: модуль оснащен двумя стационарными катушками с рукавами ~30 м, готовыми к подаче воды. Достаточно одного сотрудника: подключение и размотка катушки занимают десятки секунд Minimal: reels with ~30 m hoses ready for water supply	Большее: требует прокладки напорных рукавов вручную от автомобиля. Разворачивание стандартной магистрали и рабочей линии (несколько звеньев) может занять 1–2 минуты и привлечь 2–3 сотрудника Longer: manual laying of hoses from the vehicle	Среднее: высоконапорные катушки тоже ускоряют начало тушения (линия подсоединена заранее), но техника среднего давления есть не на всех машинах. Если ее нет — придется прокладывать линию по классической схеме Moderate: high-pressure reels speed start-up
Совместимость с транспортом Compatibility with vehicles	Может устанавливаться на легкие автомобили и переносные установки. Реализован привод от кардана микроавтобуса (фургона), что позволяет оснастить ТРВ-модулем даже малый пожарный автомобиль	Требуется шасси пожарной автоцистерны (полноразмерный пожарный автомобиль) для размещения насоса, цистерны и рукавного имущества. Переносные бензомоторные насосы низкого давления существуют, но они громоздки и менее мощны	Обычно интегрируется в пожарные автоцистерны среднего класса (с комбинированным насосом). Встречаются переносные установки высокого давления (например, моторизованные ранцы или насосы на прицепе), но их применение ограничено

Окончание таблицы 2

Параметр Parameter	Модуль ТРВ Water-mist module (fine water mist)	Традиционное низкое давление Conventional low pressure	Традиционное среднее давление Conventional medium pressure
	Can be mounted on light vehicles and portable units	Requires full-size chassis for pump and tank	Usually integrated into medium-class fire engines

Таблица 3

Сравнение эффективности огнетушащего действия и влияния на безопасность

Table 3

Comparison of fire extinguishing efficiency and impact on safety

Параметр Parameter	Модуль ТРВ Water-mist module	Традиционное низкое давление Conventional low pressure	Традиционное среднее давление Conventional medium pressure
Расход воды на тушение Water consumption for extinguishing	На 40 % меньше при равном эффекте тушения. За счет мелкодисперсного распыла требуется меньше воды для сбивания пламени и охлаждения — значительная часть воды испаряется и используется эффективно About 40 % less for equivalent extinguishing effect	Базовый уровень (100 %). Расход определяется нормативной интенсивностью орошения; для ликвидации очага обычно требуется подать большой объем воды, из которого лишь часть участвует в теплоотборе Base level (100 %)	Немного ниже, чем при низком давлении, при точечном применении. Повышение давления несколько снижает требуемый объем воды, но экономия не столь высока без технологии тумана Slightly lower than low pressure for point application
Эффективность охлаждения и тушения Cooling and extinguishing effectiveness	Повышена на ~25–30 % (инертирование, охлаждение очага). Водяной туман быстро снижает температуру пламени и дымовых газов за счет большой площади контакта капель с горячими продуктами горения Increased by ~25–30 % (inerting, cooling of the seat)	Условно 100 % (базовый уровень эффективности принят за обычный ствол). Охлаждение в основном за счет подачи больших объемов воды; крупные капли охлаждают только поверхность, часть тепла уходит с паром Baseline 100 %	Выше, чем на низком давлении, но без тонкого распыления увеличение эффективности ограничено. Более мелкие капли улучшают теплоотбор, однако при давлении ~3–4 МПа все еще значительная доля воды не испаряется полностью Higher than low pressure but savings limited without fine misting

Примечание. Испытания подтвердили, что разработанный модуль ТРВ может успешно применяться и для тушения возгораний литий-ионных аккумуляторов. Введение распыленной воды непосредственно в аккумуляторный блок обеспечивает быстрое охлаждение батареи и прекращение горения ячеек без повторного разгорания, при этом требуемый расход воды на ликвидацию такого очага значительно ниже по сравнению с традиционными подходами [5, 6].

Заключение

Проведенные исследования подтвердили целесообразность применения технологии тонкораспыленной воды в системах ручного пожаротушения. Разработанный модуль и ствол обеспечивают формирование устойчивой струи с регулируемой дисперсностью капель, что позволяет эффективно локализовать очаги горения при значительном снижении расхода воды

и повышении маневренности пожарных подразделений.

Экспериментальные испытания показали, что использование ТРВ обеспечивает:

- экономию водных ресурсов до 40 % по сравнению с традиционными стволами;
- увеличение длины эффективной струи и зоны покрытия факела;
- улучшение охлаждающего и инерционного эффекта за счет равномерного распределения водяного аэрозоля;
- повышение безопасности работы личного состава за счет уменьшения обратного теплового воздействия.

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанный модуль к применению в составе мобильных и переносных комплексов пожарно-спасательного оборудования, а также при оснащении специальных подразделений, действующих в условиях ограниченного водоснабжения и труднодоступных очагов возгорания.

В дальнейшем планируется проведение сертификационных испытаний и отработка адаптации конструкции под различные типы пожарных стволов, что обеспечит расширение области практического применения технологии тонкораспыленной воды в системе МЧС России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андрюшкин А. Ю., Пелех М. Т. Получение тонкораспыленной воды газодинамическим распылением // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2012. № 1. С. 53–58.
2. Булва И. В., Еремин А. П., Булва А. Д. Экранирование теплового потока распыленными струями воды в условиях пожара // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2017. Т. 1, № 2. С. 178–187.
3. Корольченко Д. А. Громовой В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20, № 9. С. 54–57.
4. Аксенов С. Г., Муртазин Д. А. Технология пожаротушения тонкораспыленной водой // Журнал прикладных исследований. 2024. № 10. С. 81–86.
5. NFPA 750 : Standard on Water Mist Fire Protection Systems. Quincy (MA), 2023. 80 p.
6. IMO MSC/Circ.1165 (2005); IMO MSC.1/Circ.1456 (2013). Guidelines for the Approval of Fixed Water-Mist Fire-Extinguishing Systems. London: International Maritime Organization.
7. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : утв. и введ. в действие приказом МЧС России от 25.03.2009 № 175. М., 2021. 148 с.
8. СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : утв. и введ. в действие приказом МЧС России от 31.08.2020 № 628. М., 2020. 68 с.

9. ГОСТ Р 53288–2009. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Модульные установки пожаротушения тонкораспыленной водой автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний : утв. и введ. в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18.02.2009 № 63-ст. М., 2010. 20 с.
10. Пустовалов И. А. Повышение огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2022. 154 с.
11. Еремин Ю. С. Гидродинамическое проектирование оросителя автоматической установки пожаротушения тонкораспыленной водой: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 172 с.
12. Swedish Civil Contingencies Agency (MSB). Putting out battery fires with water. MSB Report 2184. Karlstad, 2023. 42 p.
13. Swedish Civil Contingencies Agency (MSB). Smoke exposure in case of Li-ion battery fire: Important gas components, case descriptions and disposal recommendations. MSB Report 1960, Karlstad, 2022. 43 p.
14. Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests / J. Hynynen et al. // Fire Safety Journal. 2023. Vol. 139. Article 103829.
15. Ясюк Ю. М., Горелов А. А. Перспективы применения тонкораспыленной воды для тушения пожаров // Пожарная безопасность. 2017. № 3. С. 12–18.
16. Иванов А. Ю., Колотилин М. В. Цена вопроса: спринклерная система vs система тушения тонкораспыленной водой // АВОК. 2025. № 2. С. 34–39.
17. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., 1992. 672 с.
18. Технические данные оборудования (насосы и арматура системы ТРВ): высоконапорный насос UDOR VXX-B160/180R и регулирующие клапаны P.A. VB 200/150 и VS 200/180.
19. ООО «МКС». Стволы пожарные перекрывные PC-50 — технические характеристики // Линия Безопасности 101 : интернет-магазин. URL: <https://clck.ru/3QXtDi> (дата обращения: 12.10.2025).

REFERENCES

1. Andryushkin A. Yu., Pelekh M. T. Generation of Fine-Water-Mist by Gas-Dynamic Spraying // Bulletin of Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia. 2012. № 1. Pp. 53–58.
2. Bulva I. V., Eremin A. P., Bulva A. D. Shielding of Heat Flux by Sprayed Water Jets under Fire Conditions // Bulletin of the Belarusian State University of Civil Protection of EMERCOM of Belarus. 2017. Vol. 1, № 2. Pp. 178–187.
3. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Application of Fine-Water-Mist Fire Extinguishing in High-Rise Buildings // Fire and Explosion Safety. 2011. Vol. 20, № 9. Pp. 54–57.
4. Aksenov S. G., Murtazin D. A. Firefighting Technology Using Fine Water Mist // Journal of Applied Research. 2024. № 10. Pp. 81–86.
5. NFPA 750 : Standard on Water Mist Fire Protection Systems. Quincy (MA), 2023. 80 p.
6. IMO MSC/Circ.1165 (2005); IMO MSC.1/Circ.1456 (2013). Guidelines for the Approval of Fixed Water-Mist Fire-Extinguishing Systems. London: International Maritime Organization.

7. SP 5.13130.2009. Fire protection systems. Automatic fire alarm and fire-extinguishing installations. Design norms and rules : approved and introduced put into effect by the order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 25.03.2009 № 175. М., 2021. 148 p.
8. SP 485.1311500.2020. Fire protection systems. Automatic fire-extinguishing installations. Design rules : approved and introduced put into effect by the order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 31.08.2020 № 628. М., 2020. 68 p.
9. GOST R 53288–2009. Automatic Water and Foam Fire Extinguishing Installations. Modular Automatic Fine-Water-Mist Fire Extinguishing Installations. General Technical Requirements. Test Methods : approved and introduced effective by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 18.02.2009 № 63-ст. М., 2010. 20 p.
10. Pustovalov I. A. Improving the Fire-Extinguishing Capability of Modular Fine-Water-Mist Installations at Oil and Gas Facilities : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. St. Petersburg, 2022. 154 p.
11. Eremin Yu. S. Hydrodynamic Design of a Sprinkler for an Automatic Fine-Water-Mist Fire Extinguishing Installation : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. St. Petersburg, 2013. 172 p.
12. Swedish Civil Contingencies Agency (MSB). Putting out battery fires with water. MSB Report 2184. Karlstad, 2023. 42 p.
13. Swedish Civil Contingencies Agency (MSB). Smoke exposure in case of Li-ion battery fire: Important gas components, case descriptions and disposal recommendations. MSB Report 1960, Karlstad, 2022. 43 p.
14. Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests / J. Hynynen et al. // Fire Safety Journal. 2023. Vol. 139. Article 103829.
15. Yasyuk Yu. M., Gorelov A. A. Prospects for the Use of Fine-Water-Mist for Fire Extinguishing // Fire Safety. 2017. № 3. Pp. 12–18.
16. Ivanov. A. Yu., Kolotilin M. V. The Price at Stake: a Traditional Sprinkler System and a System with Water Mist // AVOK. 2025. № 2. Pp. 34–39.
17. Idelchik I. E. Handbook of Hydraulic Resistance. М., 1992. 672 p.
18. Technical data of equipment (pumps and fittings of the fine-water-mist system): high-pressure UDOR VXX-B160/180R pump and regulating valves P.A. VB 200/150 and VS 200/180.
19. LLC "MKS". RS 50 Shut-Off Fire Nozzles — Technical Specifications // Line of Safety 101 : online store. URL: <https://clck.ru/3QXtDi> (date of application: 12.10.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Турков Владислав Александрович, аспирант, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); e-mail: vlad@7rl.ru

Елфимова Марина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника Уральского института ГПС МЧС России по научной работе (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22); Author ID: 818459; ПИНЦ ID: 818459; ORCID: 0000-0003-3835-9003

Монахов Дмитрий Игоревич, заместитель генерального директора ООО «Пожинтех» (192236, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Софийская улица, 14к2Б)

Зыбин Антон Олегович, студент 5-го курса факультета морского приборостроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladislav A. Turkov, graduate student, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, 196105 Russian Federation); e-mail: vlad@7rl.ru

Marina V. Yelfimova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Institute for Scientific Work, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); ID RISC: 818459; ORCID: 0000-0003-3835-9003

Dmitriy I. Monakhov, deputy CEO, Pozhintech LLC (14k2B Sofiyskaya St., St. Petersburg, 192236 Russian Federation)

Anton O. Zybin, 5th year undergraduate student Faculty of Marine Instrument Engineering, Faculty of Marine Instrument Engineering, St. Petersburg State Marine Technical University (3 Lotsmanskaya St., St. Petersburg, Russian Federation 190121)

Поступила в редакцию 21.09.2025
Одобрена после рецензирования 12.10.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 504.06:330.13

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ И МОНИТОРИНГА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Гарелина Светлана Александровна

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена разработке многопараметрической модели оптимизации стратегии обращения с отходами и организации мониторинга на промышленных объектах в условиях ограниченного бюджета. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения техногенных рисков при одновременной ограниченности финансовых, технических и организационных ресурсов, что требует поиска рациональных решений в области промышленной и экологической безопасности. В работе отмечено, что традиционная раздельная реализация мероприятий по переработке отходов и мониторингу технологических процессов приводит к неэффективному использованию ресурсов и не обеспечивает достаточного снижения риска. Для преодоления этого противоречия предложена многопараметрическая модель, включающая в себя остаточный ущерб, затраты на переработку и мониторинг, а также возможную прибыль от утилизации. Научная новизна заключается в формализации взаимосвязи между долей переработанных отходов, уровнем охвата мониторингом и ресурсными ограничениями, что позволяет перейти от фрагментарного подхода к целостной системе риск-ориентированного управления. Модель создает методологическую основу для обоснования стратегий переработки и мониторинга, а также для разработки практических решений, направленных на минимизацию совокупного ущерба. В качестве примера применения модели рассмотрены стратегии переработки нефтешламов на промышленных объектах, что позволило продемонстрировать возможность определения оптимальной доли переработки, обеспечивающей баланс между затратами и снижением остаточного ущерба.

Ключевые слова: стратегия обращения с отходами, промышленный объект, переработка отходов, мониторинг производственного процесса, стратегия переработки и контроля отходов, многопараметрическая модель управления отходами

Для цитирования: Гарелина С. А. Многопараметрическая модель оптимизации стратегии переработки отходов и мониторинга на промышленных объектах // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 126–137.

A MULTIPARAMETRIC MODEL FOR OPTIMIZATION OF WASTE RECYCLING STRATEGY AND MONITORING AT INDUSTRIAL FACILITIES

Svetlana A. Garelina

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the development of a multiparametric model for optimizing waste recycling strategy and organizing monitoring at industrial facilities under budget constraints. The relevance of the study is determined by the need to reduce man-made risks while simultaneously limiting financial, technical, and organizational resources, which necessitates the search for rational solutions in the field of industrial and environmental safety. The paper notes that the traditional separate implementation of waste recycling measures and process monitoring leads to inefficient resource use and does not provide sufficient risk reduction. To overcome this contradiction, a multiparametric model is proposed, incorporating residual damage, costs of recycling and monitoring, as well as potential profits from waste utilization. The scientific novelty lies in formalizing the relationship between the share of recycled waste, the level of monitoring coverage, and resource constraints, which makes it possible to move from a fragmented approach to an integrated risk-oriented management system. The model provides a methodological basis for justifying recycling and monitoring strategies, as well as for developing practical solutions aimed at minimizing overall damage. As an example of model application, strategies for oil sludge treatment at industrial facilities are considered, which made it possible to demonstrate the feasibility of determining the optimal recycling share that ensures a balance between costs and residual damage reduction.

Keywords: waste management strategy, industrial facility, waste recycling, process monitoring, waste management and control strategy, multiparametric waste management model

For Citation: Garelina S. A. A multiparametric model for optimization of waste recycling strategy and monitoring at industrial facilities // *Technospheric safety*. 2025. № 4 (49). Pp. 126–137.

Введение

Предупреждение ЧС на промышленных объектах в значительной степени связано с двумя основными мерами: мониторингом технологических процессов и полигонов отходов, а также переработкой отходов, образующихся в ходе производственной деятельности. Эти меры позволяют снижать техногенный риск как за счет сокращения потенциально опасного объема отходов, так и за счет своевременного выявления отклонений в работе производственной системы.

Ресурсы, выделяемые на обеспечение промышленной и экологической безопасно-

сти, объективно ограничены. При отдельной реализации мониторинга производственного процесса и переработки отходов финансовые, технические и организационные возможности расходуются нерационально, а достигаемый эффект остается ограниченным. Дополнительную сложность создает то, что в существующей практике управление обращением с отходами и организация мониторинга часто осуществляются без учета уровня техногенного риска, что снижает эффективность распределения ресурсов и не позволяет целенаправленно минимизировать совокупный ущерб.

В настоящей статье рассматривается многопараметрическая модель, позволяющая

формализовать выбор стратегии обращения с отходами при ограниченном бюджете. Она учитывает техногенные риски и специфику промышленных объектов, что обеспечивает более высокую эффективность риск-ориентированного управления, повышает рациональность решений и создает основу для научно обоснованного балансирования между затратами и безопасностью.

Теоретические аспекты

Формализованно эта постановка выражается через целевую функцию совокупных потерь, которая учитывает затраты на переработку отходов, расходы на мониторинг и остаточный ущерб, а также возможную прибыль от утилизации отходов. В обобщенном виде она записывается следующим образом:

$$Z(x, M_{\text{техн}}, M_{\text{отх}}) = B_{\text{техн}}(M_{\text{техн}}) + B_{\text{отх}}(x, M_{\text{отх}}) + B_{\text{переработка}} + B_{\text{мониторинг}} - P(x), \quad (1)$$

где:

$x \in [0; 1]$ — доля переработанных отходов;

$M_{\text{техн}}, M_{\text{отх}} \in [0; 1]$ — уровень охвата мониторингом соответственно технологического процесса и полигонов: 0 — отсутствие мониторинга, 1 — полный охват;

$B_{\text{техн}}$ — ущерб в технологических процессах, снижающийся с ростом $M_{\text{техн}}$;

$B_{\text{отх}}(x, M_{\text{отх}})$ — ущерб на полигонах отходов, снижающийся с ростом $M_{\text{отх}}$ и x ;

$B_{\text{переработка}}$ — затраты на переработку отходов;

$P(x) = P_{\text{мах}} x$ — прибыль от переработки отходов;

$P_{\text{мах}}$ — максимально возможная суммарная прибыль при 100-процентной переработке;

$B_{\text{мониторинг}}$ — затраты на мониторинг.

Таким образом, формула (1) позволяет представить совокупные потери как функцию трех факторов: уровня охвата мониторингом технологического процесса, уровня охвата мониторингом полигонов отходов и доли перерабатываемых отходов. Каждая из компонент модели имеет самостоятельное содержательное

значение и математическую форму, обоснованную с позиций риск-ориентированного подхода к управлению техногенной безопасностью.

Ущерб от аварий в технологическом процессе $B_{\text{техн}}$ моделируется как линейно убывающая функция от степени охвата мониторингом:

$$B_{\text{техн}}(M_{\text{техн}}) = B_{\text{махтехн}}(1 - \alpha_{\text{техн}} M_{\text{техн}}), \quad (2)$$

где:

$\alpha_{\text{техн}} \in [0; 1]$ — коэффициент эффективности мониторинга, отражающий долю потенциального ущерба, который можно устранить при полном охвате мониторингом ($M_{\text{техн}} = 1$);

$B_{\text{махтехн}}$ — максимально возможный ущерб при аварийном развитии событий.

Выражение (2) отражает снижение потенциального ущерба за счет внедрения технических средств мониторинга и контроля (ТСМК), обеспечивающих раннее выявление

отклонений от нормального технологического режима. При $M_{\text{техн}} = 1$ ущерб сокращается на величину $\alpha_{\text{техн}} B_{\text{махтехн}}$, что количественно характеризует эффективность

охвата и качества мониторинга. Принятые в модели значения M : 0,5 — базовый мониторинг, локализованный контроль отдельных рисков; 0,7 — расширенный мониторинг, включающий все основные зоны, но без полной автоматизации; 1,0 — интеллектуальная интеграция, охват всей цепочки производственного процесса. На большинстве промышленных объектов мониторинг не охватывает всю цепочку, а включает только основные стадии. Отсутствует полный охват хранилищ, автоматический анализ, мониторинг на этапе генерации отходов и др.

Стоит отметить, что согласно рекомендациям Агентства по охране окружающей среды США (например, [1]) в случае ограниченных или неполных исходных данных допустимо использовать простые и обоснованные аппроксимационные зависимости

при построении экологических моделей риска. Это подтверждает обоснованность применения линейного приближения в расчетах остаточного ущерба. Такой подход (2) отражает предположение о пропорциональной зависимости между уровнем внедрения ТСМК и долей предотвращенного ущерба и оправдан, если эффективность мониторинга нарастает пропорционально уровню внедрения, затраты на контроль не анализируются на этом этапе, а только его эффект на риск, используется предварительная оценка ущерба, что типично для ранних этапов проектирования систем безопасности и риск-ориентированного управления.

Остаточный ущерб $B_{отх}$ обусловлен воздействием накопленными или частично обезвреженными отходами на окружающую среду и описывается моделью:

$$B_{отх}(x, M_{отх}) = B_{махоth}(1 - x)(1 - \alpha_{отх}M_{отх}), \quad (3)$$

где:

$\alpha_{отх}$ — эффективность мониторинга полигонов отходов;

$B_{махоth}$ — максимально возможный ущерб при аварийном развитии событий.

Ущерб уменьшается двумя механизмами:

- за счет переработки отходов, уменьшающей их потенциально опасный объем: фактор $(1 - x)$;
- за счет мониторинга состояния отходов и окружающей среды: фактор $(1 - \alpha_{отх}M_{отх})$, позволяющий своевременно выявлять и предотвращать негативные воздействия.

Мультипликативное построение модели $(1 - x)(1 - \alpha_{отх}M_{отх})$ отражает принцип неза-

висимого действия этих механизмов на итоговый риск, что соответствует современным концепциям оценки риска.

Затраты на мониторинг $B_{мониторинг}$ в рамках модели оцениваются как доля от предотвращенного ущерба, зависящая от охвата и эффективности ТСМК. При этом переработка отходов напрямую не влияет на объем затрат на мониторинг и не включается в расчет:

$$B_{мониторинг} = r(B_{махтехн}\alpha_{техн}M_{техн} + B_{махоth}\alpha_{отх}M_{отх}), \quad (4)$$

где r — нормативный коэффициент.

Применение данной зависимости позволяет на ранних этапах проектирования

проводить ориентировочную, но обоснованную оценку бюджета на внедрение автоматизированных систем мониторинга.

Затраты на переработку отходов:

$$B_{\text{переработка}}(x) = B_{\text{п}}[(\exp(kx) - 1)/(\exp(k) - 1)], \quad (5)$$

где:

$B_{\text{п}}$ — общая (интегральная) стоимость полной переработки всего объема отходов (при $x = 1$);

k — параметр насыщения.

Функция затрат на переработку имеет экспоненциальную форму, что отражает характерный для производственной практики эффект убывающей отдачи: на ранних этапах переработка более эффективна и рентабельна, однако по мере приближения к полной утилизации ($x \rightarrow 1$) возрастает сложность, трудоемкость и стоимость обезвреживания отходов, особенно высокоопасных или труднодоступных (например, [2, 3]). Параметр k характеризует насыщаемость затрат: чем выше значение k , тем бо-

лее выражен рост затрат на заключительных этапах переработки. Использование экспоненциальной функции позволяет учесть эффект возрастающей предельной стоимости переработки по мере приближения к 100-процентной утилизации. Знаменатель $(\exp(k) - 1)$ используется для масштабирования, чтобы обеспечить $C_{\text{пер}}(0) = 0$ и $C_{\text{пер}}(1) = C_{\text{max}}$.

На основе выражений (1)–(5) сформулирован критерий экономической оправданности мероприятий по переработке

$$\frac{\Delta U_{\text{предотв}}}{B_{\text{переработка}} + B_{\text{мониторинга}}} > K, \quad K \geq K_{\text{порог}}, \quad (6)$$

где:

$\Delta U_{\text{предотв}} = B_{\text{max}} - B_{\text{ущерб}}(x, M)$ — предотвращенный ущерб (разность между наихудшим сценарием ущерба (если ничего не делать) и остаточным ущербом, который останется после внедрения переработки и мониторинга);

$B_{\text{переработка}}$ — затраты на переработку отходов, зависящие от доли переработки x ;

$B_{\text{мониторинга}}$ — затраты на мониторинг производственного процесса в зависимости от уровня охвата M ;

$K_{\text{порог}}$ — допустимый коэффициент эффективности (например, 1,2 или 1,5 в зависимости от отрасли и нормативов).

В ряде случаев объекты накопленного экологического ущерба (например, нефтешламовые амбары, хвостохранилища и т. п.) не связаны с действующим технологическим

процессом, а являются статичными источниками риска. Для таких объектов ущерб от технологических аварий отсутствует, а интегральная модель потерь упрощается:

$$Z(x) = B_{\text{отх}}(x) + B_{\text{переработка}}(x) + B_{\text{мониторинг}}(M_{\text{отх}}) - P(x). \quad (7)$$

Для расчета применяется допущение, что средства $B_{\text{мониторинг}}$ фиксированы (например, заранее заданы проектом), т. е. включены в бюджет как отдельная постоянная статья затрат. Такое упрощение позволяет

применять модель к объектам длительного хранения, для которых не требуется учет производственных рисков, но необходимо оценить баланс между переработкой, мониторингом и предотвращенным ущербом.

Стоит отметить, что даже при полном завершении работ по ликвидации отходов некоторые факторы неизбежно составляют остаточный риск:

- Фоновое загрязнение почвы и грунтовых вод. В почве на месте полигона или шламонакопителя остаются следовые количества опасных веществ, даже если все видимые отходы удалены. Кроме того, под телом бывшего объекта может сохраняться загрязнение фильтратом. Например, после очистки загрязненных нефтепродуктами грунтов допускают наличие остаточного загрязнения, превышающего фоновый норматив, при условии введения ограничений на использование участка [4].
- Долгосрочная миграция загрязнителей. Опасные вещества из отходов способны постепенно проникать в окружающую среду. Например, такие стойкие загрязнители, как бензо[а]пирен, фенолы или соли тяжелых металлов, могут десятилетиями мигрировать в почве и подземных водах. Исследования показывают, что бензо[а]пирен (канцерогенный компонент нефтешламов) проникает через 16-метровый слой грунта примерно за 60 лет [5]. Даже после завершения рекультивации некоторая часть этих веществ уже распространилась в среде и будет продолжать перемещаться (пусть и в сниженных концентрациях). Это создает отсроченный экологический эффект, который нельзя мгновенно обнулить — загрязненные грунтовые воды могут еще долго нести следы загрязнения.
- Невозможность 100-процентного извлечения загрязнений. На практике до-

стичь абсолютной санации территории невозможно. Всегда остаются участки, недоступные для очистки, например, грунт под массивными бетонными основаниями или в труднодоступных порах грунта. Даже при применении лучших технологий остаются остаточные следы загрязнителей в почве и ландшафте. Зарубежный опыт рекультивации подтверждает, что часть загрязнения неизбежно остается после завершения работ — законодательство некоторых стран прямо допускает наличие остаточной контаминации при официальном «закрытии» объекта [4].

- Риски повторного загрязнения. Если рекультивация выполнена некачественно или нарушаются технологии хранения оставшихся материалов, возможны вторичные негативные эффекты. Эти риски невелики при соблюдении технологий, но отнюдь не нулевые. Они означают, что объект может снова начать загрязнять среду, пусть и в меньшей степени, если не проводить должного надзора.
- Постликвидационный мониторинг. Несмотря на завершение работ по утилизации и рекультивации, объекты размещения отходов могут представлять потенциальную угрозу окружающей среде. Именно поэтому в проектной и экологической практике предусматривают этап постликвидационного мониторинга. Такой подход используют как в российской, так и в международной практике (например, [6]). Фактически, сама необходимость многолетнего наблюдения означает признание остаточного риска в постликвидационный период.

Допустимый уровень остаточного ущерба B_{\min} в пределах 15–30 % от исходного значения соответствует международной практике и признан в ряде руководств [7, 8]. В частности, в отчете ITRC подчеркивается, что «на поздних стадиях очистки удаление массы загрязнений достигает асимптоты, и эффективность применяемого метода становится сомнительной». Это отражает типичную ситуацию, при которой дальнейшее снижение загрязнения требу-

ет несоразмерных затрат при минимальном эффекте, что обосновывает использование остаточного уровня в 15–30 % при расчетах совокупных потерь и остаточного риска.

С учетом этого, величина ущерба при переработке доли отходов $x \in [0; 1]$ может быть представлена в виде линейной зависимости между максимальным ущербом B_{\max} (при отсутствии утилизации) и минимальным B_{\min} (при полной переработке)

$$B_{\text{отх}}(x) = B_{\max} - (B_{\max} - B_{\min})x. \quad (8)$$

Такое выражение позволяет напрямую использовать модель в экономических расчетах для оценки общей эффективности природоохранных мероприятий.

Постоянные затраты на мониторинг $B_{\text{мониторинг}}$ после ликвидации накопленного вреда могут составлять 10–25 % от общей сметы проекта. Такой диапазон соответствует требованиям по постликвидационному уходу, включающему регулярный отбор проб, обслуживание автоматизированных систем контроля и отчетность [9–11]. Верхняя граница затрат обусловлена сложностью объектов, числом контрольных точек и наличием устойчивых загрязнителей.

Практические примеры применения.

Расчет эффективности стратегий переработки нефтешламов

Для оценки практической применимости разработанной многопараметрической модели рассмотрен частный случай: стратегия переработки нефтешламов, накопленных на промышленных объектах. Данный пример позволяет проиллюстри-

ровать, каким образом модель может быть использована для обоснования оптимальной доли переработки, обеспечивающей баланс между затратами и снижением остаточного ущерба. При этом особое внимание уделено демонстрации возможностей предложенной модели, тогда как исходные количественные оценки носят ориентировочный характер.

Примем, что объем хранения нефтешламов на промышленных объектах составляет от 10 до 50 тыс. т (что подтверждается проектной, судебной и тендерной документацией). Для построения многопараметрической модели оптимизации стратегии обращения с нефтешламами использованы допущения, представленные в табл. 1.

Расчет остаточного ущерба, затрат на переработку и совокупных потерь выполнен в рамках многопараметрической модели для долей переработки нефтешламов от 0 до 100 % с шагом 10 %. Результаты представлены в табл. 2 и на рисунке, где проиллюстрирована зависимость совокупных потерь Z от стратегии переработки.

Таблица 1

**Допущения и обоснование многопараметрической модели оптимизации
стратегии обращения с нефтешламами**

Table 1

Assumptions and Rationale of the Multiparametric Model for Optimizing Oil
Sludge Management Strategy

Показатель Parameter	Принятое значение Assumed value	Обоснование Justification
B_{\max}	1,5 млрд руб. billion RUB	<p>Принимая во внимание данные масштабы и соотнося их с оценкой ущерба от аварии в Норильске (2020 г.), где из резервуара вытекло около 21 тыс. т дизельного топлива, а ущерб составил 146 млрд руб. и учитывая, что дизтопливо распространилось по территории и в водные объекты, для нефтешламов эффект аварийного разлива снижен. Тогда, применяя понижающий коэффициент риска 0,01, получим диапазон 0,5–2,0 млрд руб.</p> <p>Taking into account these scales and correlating them with the damage assessment from the Norilsk accident (2020), where about 21,000 tons of diesel fuel leaked from a reservoir and the damage amounted to 146 billion rubles, and considering that diesel fuel spread over the territory and into water bodies, the spill effect for oil sludge is reduced. Therefore, by applying a risk reduction coefficient of 0,01, we obtain a range of 0,5–2,0 billion rubles</p>
B_{\min}	0,3 млрд руб. billion RUB	<p>Остаточный ущерб в расчетах принят на уровне 20 % от максимального возможного ущерба, что соответствует признанному диапазону 15–30 % от исходного значения и отражает достижимый уровень снижения загрязнения при рациональных затратах.</p> <p>The residual damage in the calculations is assumed at the level of 20 % of the maximum possible damage, which corresponds to the recognized range of 15–30 % of the initial value and reflects the achievable level of pollution reduction under rational expenditures</p>
$B_{\text{переработка}}$ $B_{\text{recycling}}$	0,6 млрд руб. billion RUB	<p>Стоимость переработки нефтешламов составляет от 8 500 до 11 500 руб./т в зависимости от состава и применяемой технологии (термическая, биохимическая, флотационная) [12].</p> <p>The cost of oil sludge treatment ranges from 8,500 to 11,500 RUB per ton, depending on the composition and the applied technology (thermal, biochemical, or flotation) [12]</p>
$B_{\text{мониторинг}}$ $B_{\text{monitoring}}$	0,15 млрд руб. billion RUB	<p>В расчетах принята доля постоянных затрат на мониторинг в размере 10 %, что соответствует нижней границе признанного интервала 10–25 %.</p> <p>In the calculations, the share of fixed monitoring costs is assumed to be 10 %, which corresponds to the lower boundary of the recognized interval of 10–25 %</p>
k	2	<p>Выбранное значение параметра отражает умеренно-нелинейный рост затрат при увеличении доли переработки отходов. Это значение обеспечивает реалистичное приближение к эмпирическим данным, где удельные затраты существенно возрастают при достижении доли утилизации более 85–90 %.</p> <p>The selected parameter value reflects a moderately non-linear increase in costs with a growing share of waste recycling. This value provides a realistic approximation to empirical data, where unit costs rise significantly when the recycling share exceeds 85–90 %</p>

Таблица 2
Результат расчета ущерба, затрат на переработку и совокупных потерь
при реализации стратегии переработки нефтешламов

Table 2

Calculation results of damage, recycling costs, and total losses under the oil sludge treatment strategy

Доля переработки отходов x , (%) Share of waste recycling x , (%)	$B_{отх}(x)$, млрд руб. $B_{waste}(x)$, billion RUB	$B_{переработка}(x)$, млрд руб. $B_{recycling}(x)$, billion RUB	$Z(x)$, млрд руб. $Z(x)$, billion RUB
0	1,5	0,0	1,65
10	1,38	0,21	1,55
20	1,26	0,046	1,46
30	1,14	0,077	1,37
40	1,02	0,115	1,29
50	0,9	0,161	1,21
60	0,78	0,218	1,15
70	0,66	0,287	1,10
80	0,54	0,371	1,06
90	0,42	0,474	1,04
100	0,3	0,6	1,05

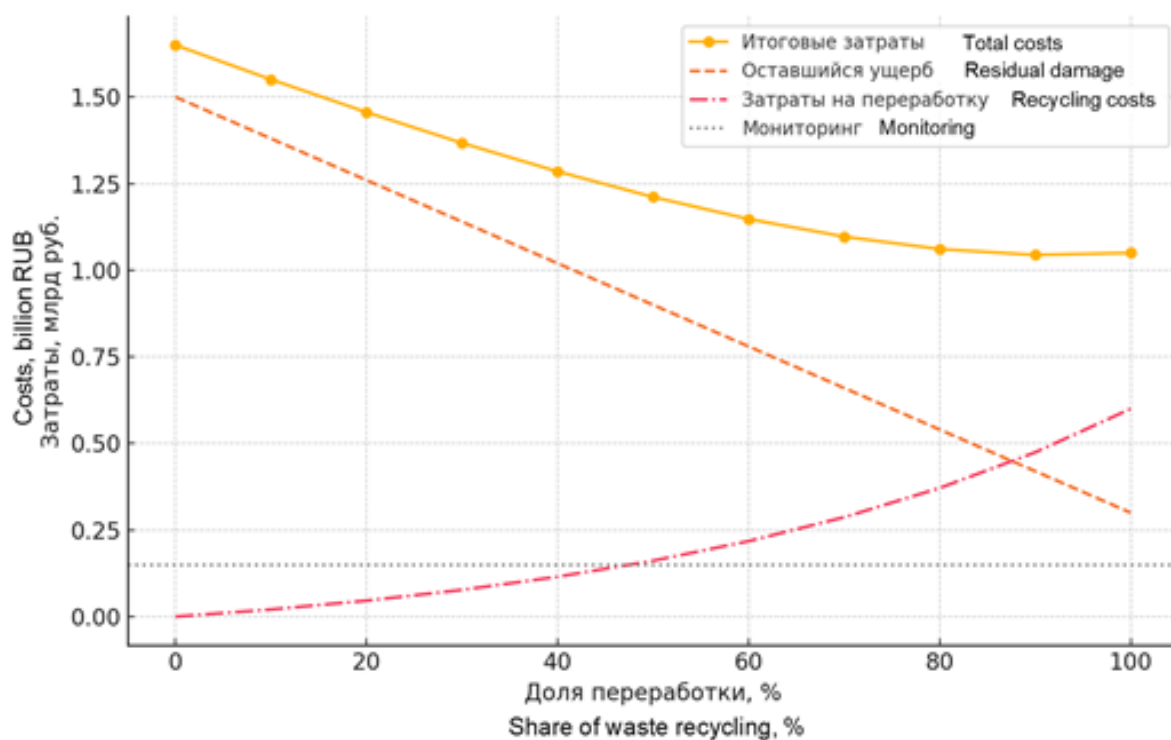


Рис. Зависимость ущерба, затрат на переработку и совокупных потерь от доли переработки нефтешламов

Fig. Dependence of damage, recycling costs, and total losses on the share of oil sludge recycling

Расчеты показывают, что оптимальная доля переработки нефтешламов составляет 80–90 %: в этом диапазоне достигается наилучший баланс между снижением остаточного ущерба и ростом затрат на переработку. Дальнейшее увеличение доли переработки приводит к существенному увеличению затрат при минимальном экологическом эффекте, что делает такие стратегии экономически нецелесообразными.

Заключение

Разработана многопараметрическая модель, интегрирующая основные параметры управления техногенными рисками: долю переработки отходов, уровень мониторинга технологических процессов и полигонов, а также ограниченность доступного бюджета. Модель позволяет формализовать задачу минимизации совокупных потерь, объединяющих остаточный ущерб, затраты на переработку и мониторинг, а также возможную прибыль от утилизации.

Предложенный подход создает основу для рационального распределения ресурсов

и обеспечивает более высокую эффективность риск-ориентированного управления в системах обращения с отходами. Научная новизна заключается в формализации взаимосвязи между показателями переработки и мониторинга, что позволяет перейти от разрозненных мер к единой системе управления техногенными рисками.

В качестве примера применения модели рассмотрены стратегии переработки нефтешламов, что позволило продемонстрировать ее работоспособность и показать возможность нахождения оптимальной доли переработки, обеспечивающей баланс между затратами и снижением остаточного ущерба.

Перспективным направлением развития исследования является дальнейшая апробация модели на других практических кейсах и количественная оценка эффективности различных стратегий переработки и мониторинга. Эти вопросы составляют предмет другой статьи, где будут рассмотрены результаты расчетов и их интерпретация с позиций риск-ориентированного управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. U.S. Environmental Protection Agency. Draft Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Regulatory Environmental Models. Washington, DC, 2003. 60 p. URL: <https://sunderlandlab.org/assets/epa-guidance-on-env-models.pdf> (дата обращения: 01.09.2025).
2. Sinai Technologies. Marginal cost of abatement: Understanding the basics. Sinai.com. 2023. URL: <https://clck.ru/3QX4KS> (дата обращения: 01.09.2025).
3. Magaril E., Marchello A., Rolando S. A cost analysis of waste collection systems in Italy. Politecnico di Torino, 2020. 76 p. URL: <https://clck.ru/3QX4hN> (дата обращения: 01.09.2025).
4. Wisconsin Department of Natural Resources. Residual contamination. Wisconsin DNR. URL: <https://clck.ru/3QX4jd> (дата обращения: 01.09.2025).

5. Prediction of the impact of benzo[a]pyrene on shallow groundwater during natural infiltration of reclaimed water-receiving rivers: A case study of Liangshui, China / Y. Liu et al. // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 707. Article ID 136041. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136041> (дата обращения: 01.09.2025).
6. Interstate Technology & Regulatory Council. 7 Monitoring and Maintenance Objectives and Approaches. ITRC, 2023. URL: <https://clck.ru/3QX538> (дата обращения: 01.09.2025).
7. ITRC. Remediation Process Optimization: Identifying Opportunities for Enhanced and More Efficient Site Remediation. Interstate Technology & Regulatory Council. USA, 2004. URL: <https://itrcweb.org/wp-content/uploads/2024/12/RPO-1.pdf> (дата обращения: 01.09.2025).
8. USEPA. Risk Management Evaluation for Completed Remedies at CERCLA Sites (EPA 540-R-01-007). Washington, DC, 2013. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-08/documents/risk_rep.pdf (дата обращения: 01.09.2025).
9. United States Environmental Protection Agency. Financial Assurance Requirements for Hazardous Waste Treatment, Storage and Disposal Facilities. Washington, DC, 2016. URL: <https://clck.ru/3QX5QL> (дата обращения: 01.09.2025).
10. United States Environmental Protection Agency. Title 40 CFR Part 265 Subpart H — Financial Requirements. eCFR: Code of Federal Regulations. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-265/subpart-H> (дата обращения: 01.09.2025).
11. Colorado Department of Public Health and Environment. Closure/Post-Closure Plan Review Guidance. Denver, 2015. URL: <https://clck.ru/3QX5Vv> (дата обращения: 01.09.2025).
12. Переработка и утилизация нефтешламов // Симбирск. Промотходы. URL: <https://clck.ru/3QX7K2> (дата обращения: 01.09.2025).

REFERENCES

1. U.S. Environmental Protection Agency. Draft Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Regulatory Environmental Models. Washington, DC, 2003. 60 p. URL: <https://sunderlandlab.org/assets/epa-guidance-on-env-models.pdf> (date of application: 01.09.2025).
2. Sinai Technologies. Marginal cost of abatement: Understanding the basics. Sinai.com. 2023. URL: <https://clck.ru/3QX4KS> (date of application: 01.09.2025).
3. Magaril E., Marchello A., Rolando S. A cost analysis of waste collection systems in Italy. Politecnico di Torino, 2020. 76 p. URL: <https://clck.ru/3QX4hN> (date of application: 01.09.2025).
4. Wisconsin Department of Natural Resources. Residual contamination. Wisconsin DNR. URL: <https://clck.ru/3QX4jd> (date of application: 01.09.2025).
5. Prediction of the impact of benzo[a]pyrene on shallow groundwater during natural infiltration of reclaimed water-receiving rivers: A case study of Liangshui, China / Y. Liu et al. // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 707. Article ID 136041. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136041> (date of application: 01.09.2025).
6. Interstate Technology & Regulatory Council. 7 Monitoring and Maintenance Objectives and Approaches. ITRC, 2023. URL: <https://clck.ru/3QX538> (date of application: 01.09.2025).

7. ITRC. Remediation Process Optimization: Identifying Opportunities for Enhanced and More Efficient Site Remediation. Interstate Technology & Regulatory Council. USA, 2004. URL: <https://itrcweb.org/wp-content/uploads/2024/12/RPO-1.pdf> (date of application: 01.09.2025).

8. USEPA. Risk Management Evaluation for Completed Remedies at CERCLA Sites (EPA 540-R-01-007). Washington, DC, 2013. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-08/documents/risk_rep.pdf (date of application: 01.09.2025).

9. United States Environmental Protection Agency. Financial Assurance Requirements for Hazardous Waste Treatment, Storage and Disposal Facilities. Washington, DC, 2016. URL: <https://clck.ru/3QX5QL> (date of application: 01.09.2025).

10. United States Environmental Protection Agency. Title 40 CFR Part 265 Subpart H – Financial Requirements. eCFR: Code of Federal Regulations. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-265/subpart-H> (date of application: 01.09.2025).

11. Colorado Department of Public Health and Environment. Closure/Post-Closure Plan Review Guidance. Denver, 2015. URL: <https://clck.ru/3QX5Vv> (date of application: 01.09.2025).

12. Oil sludge treatment and utilization // Simbirsk. Promotxody. URL: <https://clck.ru/3QX7K2> (date of application: 01.09.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гарелина Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 8591-0495; AuthorID: 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Svetlana A. Garelina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya str., Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN code: 8591-0495; AuthorID 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Поступила в редакцию 29.09.2025
Одобрена после рецензирования 15.10.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 614.8

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МОБИЛЬНОГО СРЕДСТВА ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Скрынников Алексей Юрьевич, Треушков Игорь Владимирович
Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье представлены результаты испытаний опытного образца мобильного средства, предназначенного для локализации разливов нефти и нефтепродуктов на сухопутных объектах их добычи, транспортировки, перевалки, хранения и переработки. Работа выполнена в развитие предыдущих теоретических исследований, в которых были обоснованы конструктивные и геометрические параметры мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов, а также определены основные факторы, влияющие на устойчивость его конструкции при воздействии распределенной нагрузки, эквивалентной давлению слоя нефти и нефтепродуктов. Целью испытаний являлось получение экспериментальных данных, необходимых для оценки устойчивости конструкции мобильного средства локализации на различных типах подстилающей поверхности. Проведено сравнение поведения конструкции при изменении распределенной нагрузки и характеристик подстилающей поверхности, определены зависимости, отражающие общие закономерности взаимодействия мобильного средства локализации с подстилающей поверхностью. Полученные данные позволяют рассматривать результаты испытаний в качестве основы для дальнейшего уточнения расчетных моделей, совершенствования проектных решений и разработки практических рекомендаций по применению мобильных средств при локализации и ликвидации последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов в различных природных бедствиях и техногенных авариях на объектах промышленности, транспорта и инфраструктуры.

Ключевые слова: локализация разливов нефти и нефтепродуктов на суше, мобильное средство локализации, математическое моделирование, графическая зависимость, результаты испытаний, коэффициент трения

Для цитирования: Скрынников А. Ю., Треушков И. В. Результаты испытаний опытного образца мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 138–149.

TEST RESULTS OF A PROTOTYPE OF A MOBILE OIL AND PETROLEUM PRODUCTS SPILL CONTAINMENT FACILITY

Alexey Yu. Skrynnikov, Igor V. Treushkov
Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. This article presents the results of testing a prototype of a mobile vehicle designed to localize oil and oil products spills at onshore facilities for their production, transportation, transshipment, storage and processing. The work was carried out in the development of previous theoretical studies, in which the design and geometric parameters of the mobile means of oil and oil product spill containment were substantiated, as well as the main factors affecting the stability of its structure under the influence of a distributed load equivalent to the pressure of the oil and oil products layer were determined. The purpose of the tests was to obtain experimental data necessary to assess the stability of the mobile localization device structure on various types of the underlying surface. A comparison of the behavior of the structure when changing the distributed load and the characteristics of the underlying surface is carried out, dependencies reflecting the general patterns of interaction of the mobile means of localization with the underlying surface are determined. The data obtained allow us to consider the test results as a basis for further refinement of calculation models, improvement of design solutions and development of practical recommendations for the use of mobile means in the localization and elimination of the consequences of emergency spills of oil and petroleum products in various natural disasters and man-made accidents at industrial, transport and infrastructure facilities.

Keywords: onshore containment of oil and petroleum products spills, mobile containment tool, mathematical modeling, graphical dependence, test results, friction coefficient

For Citation: Skrynnikov A. Yu., Treushkov I. V. Test Results of a Prototype of a Mobile Oil and Petroleum Products Spill Containment Facility // *Technospheric safety*. 2025. № 4 (49). Pp. 138–149.

Введение

В работе [1] обоснована необходимость создания мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов (далее — ННП). Проведен анализ существующих подходов к формированию перспективного облика мобильного средства локализации разливов ННП. Определены допущения и ограничения, необходимые для формирования технических требований к конструкции создаваемого средства.

В ходе математического моделирования обоснованы конструкция и геометрические размеры секции мобильного средства локализации разливов ННП, а также рассчитаны условия возникшего сдвига его конструкции под действием разлива ННП с учетом

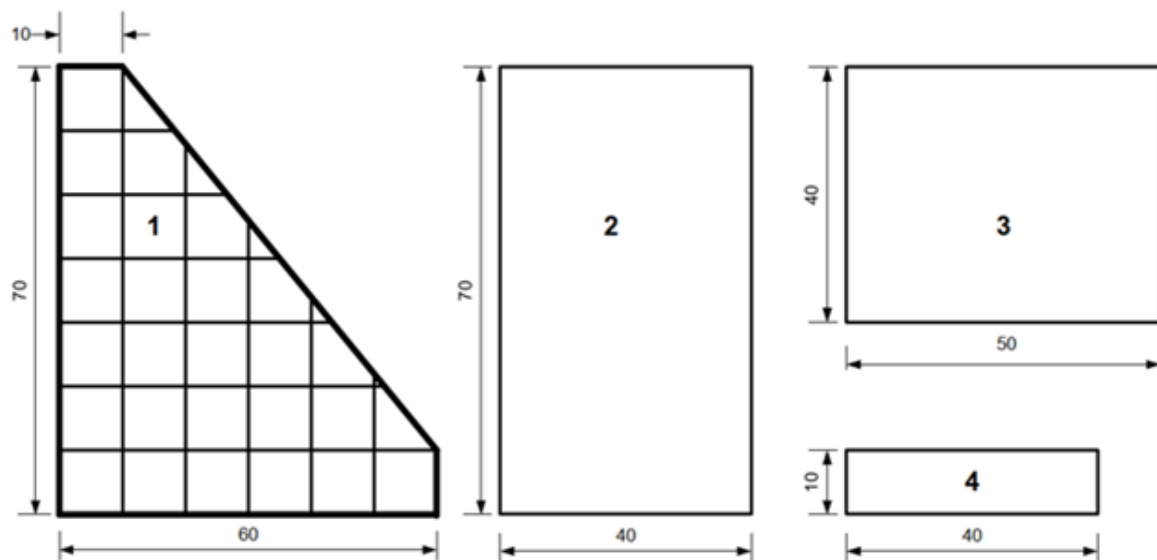
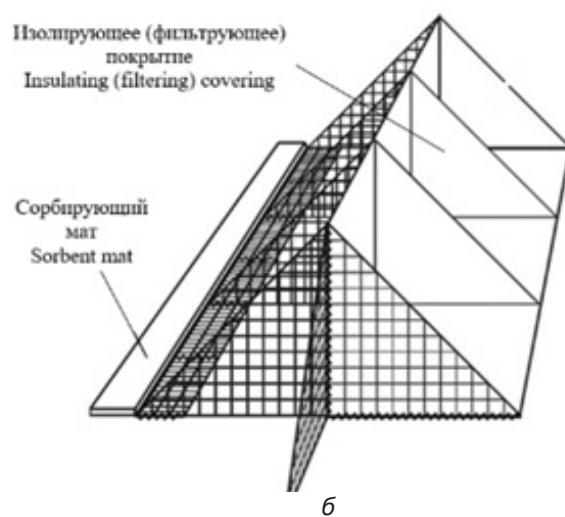
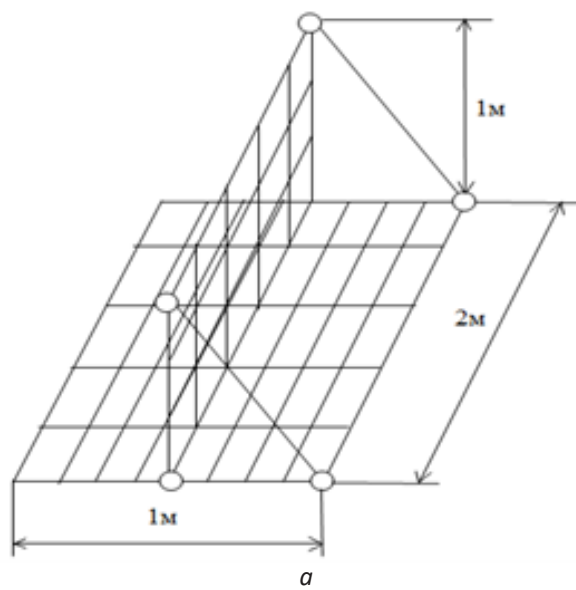
различных факторов: тип грунта или иной подстилающей поверхности, разные варианты установки, погодные условия (ветер, осадки).

Материалы и методы

На рис. 1 отражено визуальное представление конструкции мобильного средства локализации разливов ННП и ее размеры, определенные в ходе моделирования.

На основании результатов моделирования изготовлен опытный образец мобильного средства локализации разливов ННП для проведения натурных испытаний.

На рис. 2 представлены этапы сборки опытного образца конструкции мобильного средства локализации разливов ННП.



Размеры в сантиметрах
Dimensions in centimeters

в

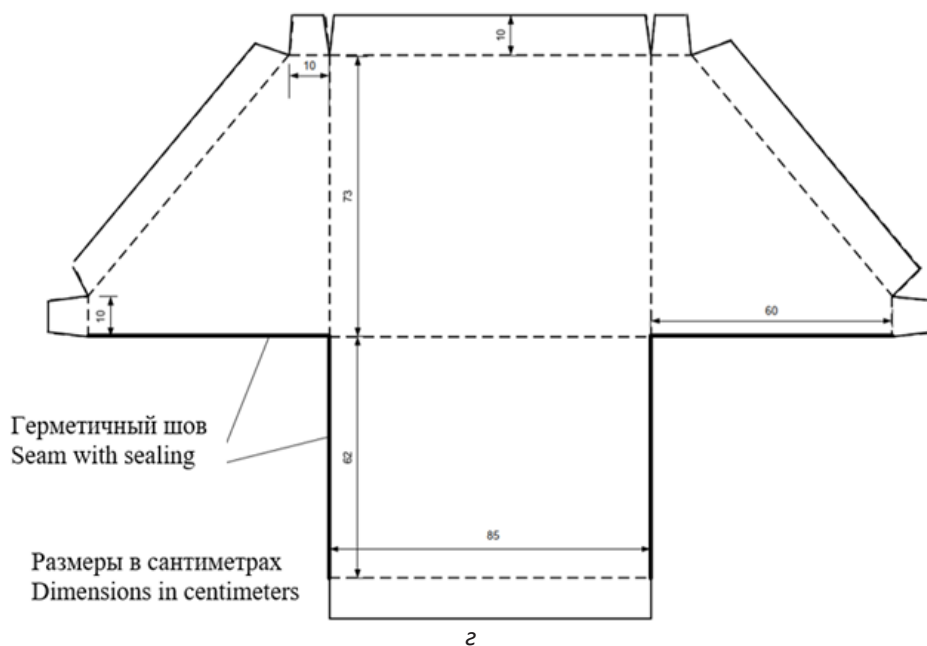


Рис. 1. Визуальное представление конструкции мобильного средства локализации разливов ННП:
 а — конструкция мобильного средства локализации разливов ННП по результатам моделирования;
 б — 3D-модель конструкции мобильного средства локализации разливов ННП для изготовления опытного образца;
 в — чертеж элементов конструкции мобильного средства локализации разливов ННП для изготовления опытного образца;
 г — раскрой для сварки нефтеудерживающего полога опытного образца мобильного средства локализации разливов ННП

Fig. 1. Visual representation of the structure Mobile Spill Containment Facility:
 а — design of a mobile means of containment of OFP spills based on the results of modeling;
 б — 3D-model of the design of the mobile NNP spill containment facility for the production of a prototype;
 в — drawing of the structural elements of the mobile NNP spill containment facility for the manufacture of a prototype;
 г — cutting for welding the oil-retaining canopy of a prototype of a mobile means of containment of oil spills



а



б

Рис. 2. Этапы сборки опытного образца конструкции мобильного средства локализации разливов ННП:
 а — сборка шарнирного каркаса мобильного средства локализации разливов ННП; б — изготовление нефтеудерживающего полимерного полога (покрытия) для мобильного средства локализации разливов ННП

Fig. 2. Stages of assembling a prototype of the mobile vehicle design localization of NNP spills:
 а — assembly of the hinged frame of the mobile NNP spill containment facility;
 б — production of an oil-retaining polymer canopy (cover) for a mobile means of OFR spill containment

Согласно ГОСТ 19.301–79 [2] и требованиям программы испытаний были определены цель, объект и порядок проведения натурных испытаний.

Цель испытаний — получение экспериментальных данных о зависимости устойчивости конструкции мобильного средства локализации разливов ННП от высоты слоя разлившихся ННП и типа подстилающей поверхности. Результаты должны позволить установить условия, при которых возможно применение конструкции мобильного средства локализации разливов ННП без использования дополнительных крепежных (анкерных) элементов. В настоящей работе под устойчивостью конструкции мобильного средства локализации разливов ННП понимается ее способность сохранять положение без смещения (сдвига) относительно подстилающей поверхности при действии распределенной нагрузки, эквивалентной давлению слоя ННП.

Задачи испытаний включали:

- определение зависимостей силы сдвига опытного образца мобильного средства локализации разливов ННП под действием распределенной нагрузки, эквивалентной давлению слоя ННП различной высоты;
- сравнение полученных значений для поверхностей с различными коэффициентами трения;
- последующую математическую обработку результатов испытаний.

Средства и оборудование: опытный образец мобильного средства локализации разливов ННП; динамометр; тяговая лебедка; измерительные средства (рулетка, уровень); имитаторы массы и объема ННП; площадки с различными типами подстилающей поверхности (болотная луговина, песок,

супесь, гравий, бетон); фотоаппарат для фиксации хода испытаний.

Порядок проведения испытаний предусматривал измерение силы трения покоя (в момент начала движения конструкции) и последующего тягового усилия при ее перемещении под действием распределенной нагрузки посредством:

- подбора количества имитаторов массы и объема ННП в диапазоне высот от 0 до 20 см с шагом 2,5 см;
- приложения распределенной нагрузки при помощи динамометра, закрепленного на высоте, равной половине условного слоя ННП, с направлением силы параллельно поверхности и выполнением серий из 10 повторных измерений для каждой поверхности;
- фиксации полученных данных фото- и видеосъемкой.

Момент начала движения опытного образца относительно поверхности принимался за окончание действия максимальной силы трения покоя.

Объект испытаний — фрагмент опытного образца мобильного средства локализации разливов ННП, состоящий из трех секций с нефтеудерживающим полимерным полом. Общая масса конструкции — 21,5 кг, масса одной секции — 7 кг (рис. 3а).

Ограничения испытаний:

- максимальная высота потока ННП (по данным ликвидации реальных разливов на суше) [3] — 20 см;
- характер потока — гравитационное растекание без внешнего давления.

Принятые допущения:

- для обеспечения повторяемости измерений использовалась одна единичная секция мобильного средства локализации разливов ННП;

- распределенная нагрузка моделировалась на площади горизонтального участка внутреннего кармана полога секции мобильного средства локализации разливов ННП;
- на горизонтальном участке внутреннего кармана полога секции мобильного средства локализации разливов ННП размещался комплект лабораторных грузов, обеспечивающих эквивалентную нагрузку слоя ННП высотой от 0

до 20 см с шагом 2,5 см, как приведено в табл. 1.

В ходе испытаний за исходные данные приняты результаты десятикратных повторных измерений силы тягового усилия, зафиксированные в протоколе испытаний. Обобщенные данные использовались для расчета средних арифметических значений и построения последующих зависимостей. Процесс проведения испытаний представлен на рис. 3.

Таблица 1
Результаты моделирования распределенной нагрузки на единичную секцию мобильного средства локализации разливов ННП — исходные данные для проведения испытаний

Table 1
Results of distributed load modeling on a single partition of the Mobile Spill Containment Facility — Initial Data for testing

№	Масса имитаторов объема удерживаемых ННП, кг Mass of Volume Simulators OPP, Kg	Высота слоя ННП, см OPP layer height	Ширина слоя ННП, см OPP layer Width, cm	Длина слоя ННП, см OPP layer Length, cm
1	0	0	0	0
2	6	2,5	80	60
3	12	5	80	60
4	18	7,5	80	60
5	24	10	80	60
6	30	12,5	80	60
7	36	15	80	60
8	42	17,5	80	60
9	48	20	80	60



а



б



Рис. 3. Процесс испытаний конструкции на определение устойчивости к сдвигу под воздействием внешней нагрузки на различных видах подстилающей поверхности:

а, б — подготовка конструкции мобильного средства локализации разливов ННП к проведению испытаний;
 в, г — определение устойчивости мобильного средства локализации разливов ННП к сдвигу без внешней нагрузки;
 д, е — определение устойчивости мобильного средства локализации разливов ННП к сдвигу под воздействием внешней распределенной нагрузки

Fig. 3. Stability Test Process to shear under the influence of external loads on various types of underlying surface:
 а, б — preparation of the design of the mobile OPP spill containment facility for testing; в, г — determination of the stability of the mobile means of localization of OPP spills to shear without external load; д, е — determination of the stability of the mobile means of containment of OPP spills to shear under the influence of an external distributed load

В табл. 2 приведены средние арифметические значения тягового усилия, полученные при перемещении конструкции мобильного средства локализации разливов ННП по различным видам подстилающей поверхности. Испытания выполнялись при последовательном увеличении распределенной нагрузки на конструкцию от 0 до 48 кг, что эквивалентно высоте слоя ННП от 0 до 20 см с шагом 2,5 см.

Обработка результатов испытаний выполнена с применением метода наименьших квадратов (МНК) [4] в программной среде Microsoft Excel.

На основе экспериментальных данных сформированы массивы измеренных значений и построены аппроксимации эмпирических зависимостей между тяговым усилием F и распределенной нагрузкой M , эквивалентной высоте слоя ННП. При построении графиков аппроксимации (рис. 4) в качестве независимой переменной использована суммарная масса конструкции — совокупность массы секции и имитаторов нагрузки, что отражает полный эквивалент действующей распределенной нагрузки на мобильное средство локализации разливов ННП.

На рис. 4 представлены линейные зависимости средних значений тягового усилия, необходимого для сдвига конструкции мобильного средства локализации разли-

вов ННП, для различных типов подстилающей поверхности. Каждая кривая на графике соответствует определенному виду поверхности.

Таблица 2
Средние арифметические значения тягового усилия перемещения
конструкции мобильного средства локализации разливов ННП
по различным видам подстилающей поверхности

Table 2
Arithmetic averages of traction force Structures of the Mobile Spill
Containment Facility for different types of underlying surface

№	Масса имитаторов объема удерживаемых ННП, т, кг Mass of simulators of the volume of retained OPP, m, kg	Суммарная масса, М, кг Total weight M, kg	Высота слоя ННП, см OPP layer height, cm	Значение тягового усилия, F, Н Value of traction force F, N				
				болотная луговина Wading Meadow	песок sand	супесь sandy loam	гравий gravel	бетон concrete
1	0	21,5	0	24,89	27,06	24,01	24,90	20,39
2	6	27,5	2,5	29,28	32,08	26,12	29,45	20,02
3	12	33,5	5	41,48	36,85	28,89	34,35	21,20
4	18	39,5	7,5	47,23	43,50	33,99	39,40	22,02
5	24	45,5	10	51,07	51,35	38,47	45,82	20,77
6	30	51,5	12,5	51,18	49,60	41,60	44,19	23,39
7	36	57,5	15	51,06	50,87	44,52	45,06	23,34
8	42	63,5	17,5	51,82	50,62	48,00	46,20	24,27
9	48	69,5	20	51,60	51,26	50,69	48,98	25,57

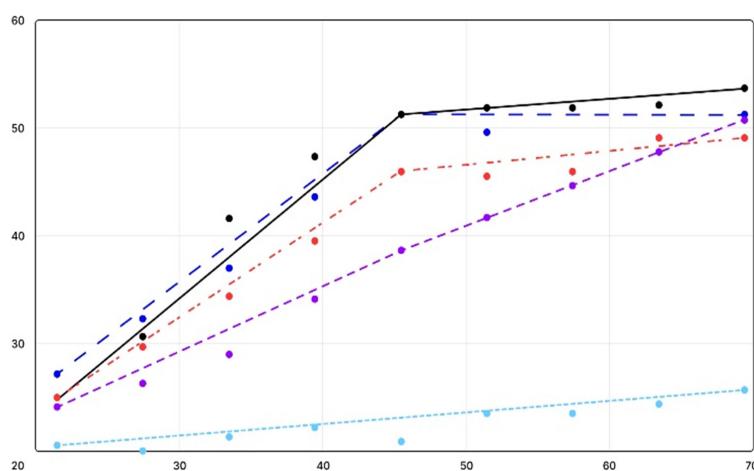


Рис. 4. Аппроксимация линейных зависимостей средних значений тягового усилия, необходимого для сдвига конструкции мобильного средства локализации разливов ННП, при приложении распределенной нагрузки, эквивалентной высоте слоя ННП, для различных типов подстилающей поверхности:

1 — болотная луговина; 2 — песок; 3 — супесь; 4 — гравий; 5 — бетон

Fig. 4. Approximation of linear dependencies of the average values of the tractive force required for the shear of the structure of the mobile OFP spill containment facility with the application of a distributed load equivalent to the height of the OFR layer for various types of the underlying surface:

1 — swamp meadow; 2 — sand; 3 — sandy loam; 4 — gravel; 5 — concrete

Таблица 3
Уравнения и значения достоверности аппроксимации (R^2)
линейных зависимостей тягового усилия от распределенной нагрузки
для различных типов подстилающей поверхности

Table 3
 Approximation Confidence Equations and Values (R^2) linear
 dependencies of the traction force on the distributed load for different types
 of underlying surface

Тип подстилающей поверхности (рис. 4) Type of substrate Surface (Fig. 4)	Уравнение аппроксимации Equation Approximation	Значение величины достоверности аппроксимации, R^2 Value of the approximation confidence value, R^2
1	$F = 0,1M + 17,38$	0,87
2	$F = 0,59M + 10,66$	0,99
3	$F = 0,86M + 5,87$	0,99
4	$F = M + 4,7$	0,98
5	$F = 1,17M - 0,47$	0,96

Анализ коэффициентов уравнений аппроксимации (см. табл. 3) показывает закономерное увеличение наклона линий при переходе от мягких к твердым типам подстилающих поверхностей, что отражает возрастание коэффициента трения между конструкцией мобильного средства локализации разливов ННП и основанием. На мягких поверхностях (болотная луговина, песок) конструкция частично погружается в грунт, вследствие чего происходит перераспределение давления и плавное возрастание сопротивления сдвигу. На твердых основаниях (супесь, гравий, бетон) трение реализуется более эффективно, однако запас устойчивости конструкции быстро исчерпывается при увеличении распределенной нагрузки. Следует отметить, что для болотной луговины ($R^2 = 0,87$) зависимость менее устойчива, что связано с высокой пластичностью и водонасыщенностью грунта.

Данные табл. 3 свидетельствуют о высоком уровне достоверности проведенной аппроксимации ($R^2 = 0,87–0,99$), что подтверждает адекватность принятых линейных зависимостей между распределенной

нагрузкой и тяговым усилием, характеризующим устойчивость конструкции мобильного средства локализации разливов ННП при воздействии внешней нагрузки. Все значения R^2 выше 0,85 (большинство — 0,96–0,99), что подтверждает линейный характер зависимости во всем диапазоне нагрузок, за исключением болотной луговины (0,87), где поведение менее устойчиво из-за высокой пластичности грунта. Значения свободного члена уравнения ($\approx 10–17$ Н) отражают исходное сопротивление сдвигу конструкции под собственным весом.

На рис. 4 представлены аппроксимированные зависимости тягового усилия, необходимого для сдвига конструкции мобильного средства локализации разливов ННП, от распределенной нагрузки, эквивалентной высоте слоя ННП, для различных типов подстилающей поверхности.

Видно, что кривые аппроксимации четко разделяются на два характерных типа поведения.

Зависимости 1 и 2 (болотная луговина и песок) характеризуются равномерным линейным ростом величины тягового усилия

при увеличении распределенной нагрузки в диапазоне от 0 до 48 кг. Конструкция мобильного средства локализации разливов ННП на таких поверхностях сохраняет устойчивое положение без необходимости применения дополнительных анкерных элементов.

Зависимости 3–5 (супесь, гравий, бетон) имеют двухрежимный характер: на первом этапе (до ≈ 45 кг) наблюдается линейное возрастание тягового усилия, после чего зависимость переходит в режим выравнивания, при котором дальнейшее увеличение нагрузки вызывает лишь незначительное изменение усилия.

Таким образом, мягкие поверхности (болотная луговина, песок) обеспечивают высокую устойчивость конструкции мобильного средства локализации разливов ННП, тогда как твердые (супесь, гравий, бетон) характеризуются сниженной устойчивостью при повышении распределенной нагрузки.

Полученные зависимости позволяют количественно оценить влияние характеристик подстилающей поверхности на устойчивость конструкции мобильного средства локализации разливов ННП. Наблюдаемые различия углов наклона линий аппроксимации отражают изменение коэффициента трения между его конструкцией и подстилающей поверхностью, что непосредственно влияет на сопротивление сдвигу конструкции. Таким образом, определены диапазоны нагрузок, при которых конструкция сохраняет устойчивое положение без смещения, а также условия, при которых наступает переход к режиму скольжения. Установленные зависимости могут быть использованы для

расчета допустимых эксплуатационных нагрузок при проектировании и размещении мобильного средства локализации разливов ННП на различных типах подстилающей поверхности.

Выводы

Проведенные натурные испытания опытного образца мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов подтвердили зависимость его устойчивости от типа подстилающей поверхности и величины распределенной нагрузки, эквивалентной высоте слоя нефти и нефтепродуктов.

Установлено, что при воздействии нагрузок, соответствующих гравитационным разливам нефти и нефтепродуктов (до ≈ 48 кг на секции), конструкция мобильного заградительного средства локализации разливов сохраняет устойчивое положение на мягких поверхностях (болотная луговина, песок) без применения анкерных элементов. Для более твердых оснований (супесь, гравий, бетон) зафиксировано снижение устойчивости при увеличении распределенной нагрузки, что свидетельствует о необходимости дополнительного крепления конструкции.

Полученные экспериментальные зависимости и значения коэффициентов аппроксимации ($R^2 = 0,87–0,99$) могут быть использованы при уточнении математических моделей сдвига, расчете допустимых эксплуатационных нагрузок и формировании технических требований к перспективному облику мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скрынников А. Ю. Математическое моделирование конструкции мобильного заградительного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов на суше // Техносферная безопасность. 2025. № 3. С. 151–163.
2. ГОСТ 19.301–79. Единая система программной документации. Программа и методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению : дата введения 01.01.1981. URL: <https://clck.ru/3Qe9yq> (дата обращения: 04.07.2024).
3. Сакович Н. Е. Методы и средства ликвидации последствий разливов нефти и нефтепродуктов : монография. Брянск, 2012. 198 с.
4. Иванец Г. Е., Ивина О. А. Математическое моделирование : учебное пособие. Кемерово, 2013. 107 с.

REFERENCES

1. Skrynnikov A. Yu. Mathematical Modeling of the Design of a Mobile Means of Localization of Oil and Petroleum Products Spills on Land // Technospheric safety. 2025. № 3. Pp. 151–162.
2. GOST 19.301–79. Unified system for program documentation. Program and methods of testing. Requirements for contents and form of presentation : date of introduction 01.01.1981. URL: <https://clck.ru/3Qe9yq> (date of application: 04.07.2024).
3. Sakovich N. E. Methods and means of eliminating the consequences of oil and oil product spills : monograph. Bryansk, 2012. 198 p.
4. Ivanets G. E., Ivina O. A. Mathematical Modeling : textbook. Kemerovo, 2013. 107 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скрынников Алексей Юрьевич, старший преподаватель учебно-методического отдела Института развития МЧС России Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 7465-2434; AuthorID: 865332; e-mail: skrynnikov@yandex.ru

Треушков Игорь Владимирович, научный сотрудник научно-исследовательского центра Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 1768-7227; AuthorID: 858081; e-mail: trigor66@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey Yu. Skrynnikov, Senior Lecturer of the Educational and Methodological Department of the Institute of Development of Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1 A Sokolovskaya str., Khimki, 141435 Russian Federation); SPIN code: 7465-2434; AuthorID: 865332; e-mail: skrynnikov@yandex.ru

Igor V. Treushkov, Researcher of the Center (research) of Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1 A Sokolovskaya str., Khimki, 141435 Russian Federation); SPIN code: 1768-7227; AuthorID: 858081; e-mail: trigor66@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2025
Одобрена после рецензирования 29.10.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 504.5:614.8

О ПОКАЗАТЕЛЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ СЕЛЕЙ

Тухтаров Алтынбек Абдрашитович, Рыбаков Анатолий Валерьевич
Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается подход к формированию аналитического вида показателя защищенности опасных производственных объектов от селевых потоков, а также факторы, влияющие на его величину. Представлен анализ физических, техногенных, организационно-управленческих и экономических аспектов, определяющих уровень риска. Предложена модель интегрального показателя, включающая параметры инженерной и организационной защиты, вероятность возникновения селевых процессов и влияние антропогенных факторов. Особый приоритет отдается анализу и учету не выявленных ранее опасных обстоятельств, позволяющий повышать точность итоговой оценки. Результаты могут использоваться для сравнительного анализа объектов и принятия решений по приоритетному финансированию противоселевых мероприятий. Предложенный подход направлен на повышение точности прогнозов, оптимизацию распределения ресурсов и снижение потенциального ущерба, что поспособствует повышению готовности органов управлений объектов к реагированию на чрезвычайные ситуации в виде селевых явлений. Разработано и приведено обоснование аналитического вида интегрального показателя защищенности опасных производственных объектов от поражающих факторов селевых потоков, аккумулирующего множество разнородных параметров. В ходе исследования применялся системный анализ и синтез существующих подходов к оценке рисков. В основу формирования показателя положен метод функционального моделирования. Его применение обусловлено необходимостью комплексного учета четырех ключевых групп факторов: физико-географических, техногенных, организационно-управленческих, экономических. Для факторов экономической группы отдельно оценивается эффективность инженерно-технических и организационно-управленческих мероприятий, при этом модель интегрирует такие переменные, как вероятность возникновения селевого события и степень влияния антропогенной деятельности.

Ключевые слова: селевые потоки, опасные производственные объекты, показатель защищенности, промышленная безопасность, мониторинг, организационные меры, противоселевые сооружения

Для цитирования: Тухтаров А. А., Рыбаков А. В. О показателе защищенности опасных производственных объектов от поражающих факторов селей // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 150–159.

ON THE INDICATOR OF PROTECTION OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES FROM THE DAMAGING FACTORS OF MUDSLIDES

Altynbek A. Tukhtarov, Anatoly V. Rybakov

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article discusses approaches to the formation of an analytical type of the indicator of the protection of hazardous production facilities from mudflows, as well as factors affecting its value. The analysis of physical, man-made, organizational, managerial and economic aspects determining the risk level is presented. A model of the integral indicator is proposed, including the parameters of engineering and organizational protection, the likelihood of mudflow processes and the influence of anthropogenic factors. Special priority is given to analyzing and accounting of previously undetected dangerous circumstances, allowing for a more accurate final assessment. The results can be used for comparative analysis of facilities and decision-making on priority financing of anti-settlement activities. The proposed approach is aimed at improving the accuracy of forecasts, optimizing resource allocation and reducing potential damage, which will help to increase the readiness of facility management bodies to respond to emergencies in the form of mudslides. The substantiation of the analytical type of the integral indicator of the protection of hazardous production facilities from the damaging factors of mudflows accumulating many heterogeneous parameters is developed and presented. The research is based on a systematic analysis and synthesis of existing approaches to risk assessment. The method of functional modeling is used as the basis for the formation of the indicator.

Its application is conditioned by the need to take into account four key groups of factors in a comprehensive manner: physical and geographical, man-made, organizational and managerial, and economic. At the same time, the effectiveness of engineering, technical, organizational and managerial measures is separately assessed within the economic group, and the model also integrates variables such as the likelihood of a mudflow event and the degree of impact of anthropogenic activity.

Keywords: mudflows, hazardous production facilities, safety indicator, industrial safety, monitoring, organizational measures, anti-mudflow facilities

For Citation: Tukhtarov A. A., Rybakov A. V. On the indicator of protection of hazardous production facilities from the damaging factors of mudslides // Technospheric safety. 2025. № 4 (49). Pp. 150–159.

Введение

Селевые потоки представляют собой одну из наиболее опасных разновидностей природных процессов, вызывающих значительные разрушения инфраструктуры

и способствующих возникновению чрезвычайных ситуаций (далее — ЧС) [1]. Опасные производственные объекты (далее — ОПО), располагающиеся в зонах потенциального формирования селей, подвержены дополнительным рискам. Нарушения в работе таких

объектов могут иметь тяжкие социально-экономические и экологические последствия, особенно если речь идет о химических, горнодобывающих и энергетических предприятиях [2].

Одной из актуальных задач в области обеспечения промышленной безопасности является количественная оценка защищенности ОПО от селевых потоков, направленная на разработку интегрального показателя или композитного индекса. Вместо анализа множества разрозненных данных, научный подход стремится к их синтезу в единую, количественно измеримую величину. Это позволяет перейти от многокритериального описания к скалярной оценке.

Особенно важно, что этот показатель должен служить аналитической основой для обоснования управленческих решений, касающихся модернизации и строительства защитных сооружений, совершенствования систем мониторинга и планирования инженерно-технических мероприятий по снижению потенциального ущерба.

Целью статьи является описание подхода к обоснованию аналитического вида показателя защищенности ОПО от селевых потоков на основе влияния факторов, от которых зависит защищенность объектов.

Проведенный анализ существующих подходов [3–5] к защищенности объектов от поражающих факторов природного характера позволил сформировать следующие выводы. Для комплексной оценки риска, связанного с воздействием селевых потоков на промышленную инфраструктуру, необходимо учитывать множество факторов, которые могут быть условно разделены на четыре крупные группы.

1. Физико-географические факторы, к которым относятся:

- рельеф местности (крутизна и протяженность склонов напрямую влияют на скорость и объем селевого потока);
 - геологический состав грунтов (некоторые породы больше подвержены размыву и способствуют интенсивному формированию селей);
 - климатические особенности (годовой объем осадков, а также интенсивность ливневых дождей определяют частоту и силу селевых событий) [3].
2. Техногенные факторы, включающие:
- наличие траншей, карьеров и прочих горных выработок (антропогенные нарушения ландшафта могут усиливать селевые процессы);
 - инженерные сооружения (нарушение дренажных систем, неконтролируемые сбросы промышленных вод и т. д.);
 - состояние противоселевых сооружений (наличие и надежность дамб, укрепленных склонов и русловых сооружений являются ключевыми для защиты территории) [4].
3. Организационно-управленческие факторы, которые включают:
- системы мониторинга (непрерывность наблюдений, частота проведения обследований, использование современных методов дистанционного зондирования);
 - наличие и реализация плана мероприятий по предотвращению и ликвидации ЧС (обученность персонала, своевременное техническое обслуживание и ремонт защитных сооружений) [5];
 - уровень взаимодействия с местными органами власти, предприятиями, органами исполнительной власти

(важность комплексного подхода при масштабных селевых угрозах).

4. Экономические факторы, в т. ч. финансирование (достаточность бюджетных и внебюджетных средств, выделяемых на противопаводковые и противоселевые программы) и страхование рисков (наличие страховых механизмов, стимулирующих повышение защищенности).

Для интегрального учета всех перечисленных факторов в показателе защищенности объектов необходимо обратиться к существующей теории оценки риска. В основе этих положений лежит влияние ключевых факторов на вероятность возникновения и последствия селевых процессов, а также комплекс защитных и организационных мер [6].

В работах [7–10] изложены подходы по разработке показателей защищенности населения от различного вида поражающих факторов. В общем смысле под показателем защищенности понимается характеристика состояния системы «субъект (объект) — угроза (опасность) — защита субъекта (объекта)», отражающая способность субъекта

(объекта) с учетом системы его защиты противостоять угрозе — не допустить снижения нематериальных и материальных благ (относительно некоторого заданного уровня) ниже заданных значений. ОПО в условиях воздействия поражающих факторов селей сталкиваются со сложностями в обеспечении устойчивости строительных конструкций, поэтому разработка аналитического вида показателя защищенности требует учета множества факторов, включая климатические, геотехнические, технологические и эксплуатационные. Причем этот показатель должен характеризовать свойство устойчивости объекта в зависимости от климатических условий и объемов мероприятий по снижению воздействий на здания. На рис. схематично представлена идея показателя защищенности. Важно, что в какой-то период времени $t_{\text{крит}}$ наступит момент, когда состояние объекта перейдет в опасное. При этом непрерывный мониторинг дает возможность влиять на ключевые показатели объекта. Благодаря этому мы можем управлять его состоянием, целенаправленно отдаляя момент, когда оно станет критическим.

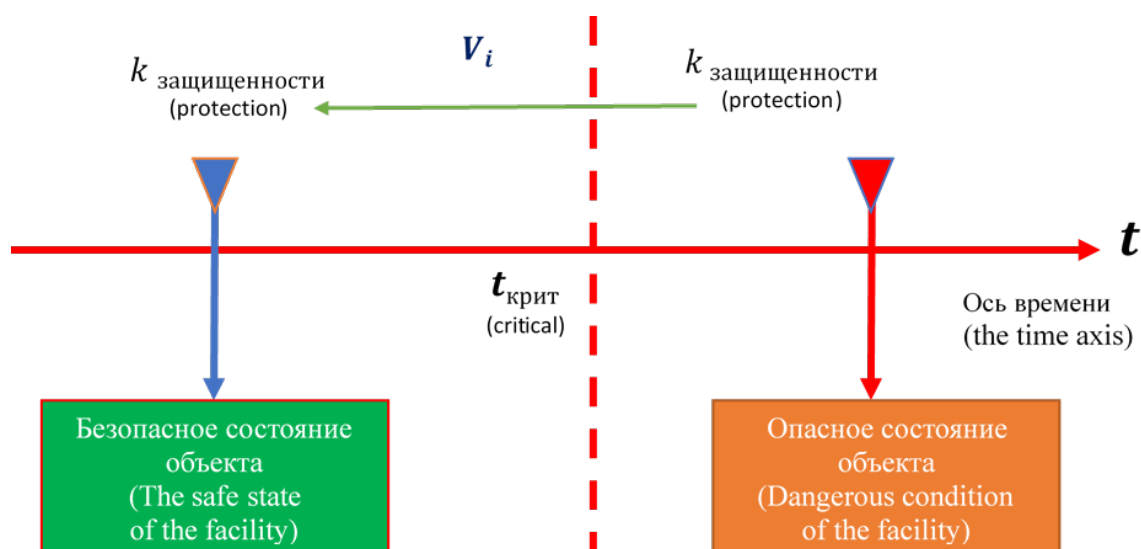


Рис. Схематичное представление идеи разработки показателя защищенности

Fig. Schematic representation of the idea of developing a security indicator

Поэтому при формировании такого подхода необходимо учитывать наличие и качество инженерных систем (противоселевые сооружения), уровень организационного и управленческого контроля (мониторинг, планы реагирования), природные факторы (вероятность и интенсивность селя), техногенные факторы

(деятельность человека, способствующая усилению селевых процессов) и дополнительные факторы (уникальные свойства территории).

В общем виде показатель защищенности ОПО от поражающего воздействия селей выражается функционалом (1):

$$K_Z = f(W_{\text{пс}}, M_{\text{орг}}, R_{\text{прир}}, S_{\text{тех}}, \xi), \quad (1)$$

где:

$W_{\text{пс}}$ — показатель эффективности инженерно-защитных мероприятий от поражающих воздействий селевых потоков;

$M_{\text{орг}}$ — показатель эффективности организационно-управленческих мероприятий по снижению воздействия поражающих факторов селей;

$R_{\text{прир}}$ — вероятность возникновения селей;

$S_{\text{тех}}$ — показатель состояния ОПО под влиянием антропогенных факторов;

ξ — вероятность возникновения неучтенных опасных факторов, влияющих на защищенность ОПО, например, ретроспективные данные.

Далее для получения аналитического вида показателя защищенности необходимо отдельно рассмотреть аргументы, входящие в функционал (1).

Первый показатель ($W_{\text{пс}}$) — показатель эффективности инженерно-защитных мероприятий от поражающих воздействий селевых потоков. Основной смысл этого

аргумента заключается в оценке совокупных объемов инженерно-технических мероприятий, направленных на снижение последствий воздействия селевых потоков. Этот показатель в общем виде представлен функционалом (2) и должен характеризовать впоследствии объемы проводимых мероприятий:

$$W_{\text{пс}} = g(F, G(t), N, Z), \quad (2)$$

где:

F — показатель, характеризующий вид сооружения защиты от селя, например, дамбы, укрепленные склоны, селезащитные галереи, инженерные каналы и т. д.;

$G(t)$ — показатель, характеризующий состояние сооружения: срок эксплуатации t , наличие повреждений, необходимость ремонтных работ;

N — показатель соответствия требованиям нормативов: соответствие проектным показателям, ГОСТам, СНиПам и т. п.;

Z — показатель наличия резервных (дублирующих) систем: альтернативные маршруты для отвода селевых потоков, запасные защитные сооружения.

Вторым аргументом функционала (1) является показатель эффективности организационно-управленческих мероприятий по снижению воздействия поражающих

факторов селей ($M_{\text{орг}}$). Он отражает, насколько грамотно и оперативно объект управляет рисками селевых потоков. В общем виде может быть представлен функционалом (3):

$$M_{\text{орг}} = \varphi(M, D, O, I), \quad (3)$$

где:

M — показатель, характеризующий эффективность системы мониторинга. Здесь могут учитываться следующие параметры: наличие датчиков (осадкомеров, камер видеонаблюдения), взаимодействие с гидрометеорологической службой, анализ космических снимков;

D — показатель, характеризующий наличие плана действий, включая разработку и обновление планов ликвидации ЧС, проведение регулярных тренировок для персонала;

O — показатель, характеризующий уровень квалификации сотрудников ОПО, включая периодичность учебных тренировок и работу с населением в прилегающей зоне;

I — показатель, характеризующий эффективность взаимодействия с органами власти, включая оперативный обмен данными, вовлечение региональных и федеральных структур в оценку рисков.

Показатель вероятности возникновения селей ($R_{\text{прир}}$) может быть получен на основе обработки статистических данных и представлять собой частоту возникновения селей. Но, что важно, аналитический вид этого показателя также может быть разработан на основе комплексного подхода учета влияния факторов на риск возникновения события (могут применяться уравнения математической физики, нейронные сети и т. д.). Здесь важно рассматривать группы факторов, которые оказывают значительное влияние на вероятность возникновения селя. Например, рельеф (угол наклона склонов, наличие крутых ущелий), геология (тип горных пород, их способность к размыву, выветриванию и накоплению обломочного материала), климатические параметры (ежегодный объем осадков, распределение осадков в течение года, интенсивность ливневых дождей), гидрология (тип русла, наличие подземных источников и т. д.).

Следующим аргументом функционала (1) является показатель состояния ОПО под влиянием антропогенных факторов ($S_{\text{тех}}$). Основной физический смысл состоит в учете антропогенного воздействия на ОПО, способствующего либо сдерживанию, либо усилению селевых процессов. В качестве

таких факторов могут быть названы, например, горные разработки (открытые карьеры, отвалы, нарушающие естественный рельеф), дорожное строительство (прокладка трасс и тоннелей, изменение естественных русел рек), промышленная деятельность (сброс сточных вод, складирование отходов производства на склонах), нарушение лесного покрова (вырубка лесов и кустарника на склонах, уменьшающая удержание грунта).

Но, несмотря на большое разнообразие учитываемых факторов (перечисленных выше), всегда будут другие условия или сочетания разных параметров, которые не вошли в рассмотрение. Таким показателем является вероятность возникновения неучтенных опасных факторов (ξ), влияющих на защищенность ОПО. Его значение должно учитывать исторические данные, в частности наличие частых селевых событий в прошлом, особенности чрезвычайно мощных селей, которые происходят редко, но приводят к катастрофическим последствиям. Также оказывают влияние страховое покрытие и финансовые гарантии, такие как объем страховых программ, стимулирующих предприятие к модернизации защитных систем. Но и необходим учет специфических местных условий, например, наличие

искусственного водохранилища, которое может служить буфером или, напротив, стать источником дополнительной опасности.

Перечисленные выше условия и факторы, влияющие на защищенность ОПО от селей, нуждаются в дальнейшем в отдельной проработке. Но обобщенные показатели могут служить основой для формирования аналитического вида модели оценки защищенности ОПО. Это следующие показатели:

- эффективность инженерно-защитных мероприятий от поражающих воздействий селевых потоков;
- эффективность организационно-управленческих мероприятий по снижению воздействия поражающих факторов селей;

- вероятность возникновения селей;
- состояние ОПО под влиянием антропогенных факторов;
- вероятность возникновения неучтенных опасных факторов, влияющих на защищенность ОПО.

В классических моделях анализа риска (например, в гидрологии и инженерной геологии) риск часто представляется в виде отношения «опасность / (защита + управление)» [6]. Такой подход позволит обобщить несколько разнородных факторов в одном показателе, K_z , который характеризует общий уровень защищенности объекта, поэтому в аналитическом виде показатель K_z будет иметь следующий вид (4):

$$K_z = \frac{W_{\text{пс}} M_{\text{орг}}}{R_{\text{прир}} S_{\text{тех}}} \xi. \quad (4)$$

Представленное выражение (4) и оценка ключевых показателей (противоселевых сооружений, организационно-управленческих мер, природной и техногенной составляющих, а также коррекции на локальные особенности) дают комплексное представление о защищенности ОПО от селей. Применение данных подходов позволяет систематизировать процесс анализа, выявлять непроработанные места в системе защиты (недостаточное состояние сооружений, низкий уровень мониторинга или высокие техногенные нагрузки), принимать обоснованные решения о модернизации инфраструктуры, повышении квалификации персонала и совершенствовании планов ЧС.

Предложенная в исследовании модель расширяет методологические подходы, представленные в работах [7–10], преодолевая выявленные в них методологические

ограничения, связанные с небольшим спектром учитываемых переменных, отсутствием формализованного алгоритма нормирования опасных производственных объектов, и с учетом отраслевой специфичности.

Предлагаемая модель должна обеспечивать:

1. Мультифакторный синтез — интеграцию параметров природной опасности (гидрогеологические, климатические) и техногенного воздействия (инфраструктурные, эксплуатационные).
2. Создание универсальной системы нормирования, устраняющую дисбаланс в сопоставлении гетерогенных объектов через введение безразмерных коэффициентов.
3. Верификацию на эмпирическом массиве — валидацию модели на объектах горнодобывающего и энергетического

секторов с достижением статистически значимой точности ($p < 0,05$).

Научная новизна такого подхода заключается в установлении зависимости уровня защищенности ОПО от объемов инженерно-технических мероприятий, направленных на снижение воздействия поражающих факторов сели.

Выводы

Таким образом, разработанный в рамках настоящего исследования интегральный показатель защищенности опасных производственных объектов от селевых угроз позиционируется в качестве ключевого методологического инструмента для решения стратегической задачи минимизации масштабов социально-экономического ущерба

и негативного воздействия на экологические системы.

Предлагаемый алгоритм расчета данного показателя обладает свойством сопоставимости и воспроизводимости, что позволяет применять его для проведения сравнительного анализа и ранжирования объектов не только в рамках корпоративной структуры отдельной компании, но и в межведомственном разрезе на уровне региона. Получаемая в результате объективная оценка формирует доказательную базу для обоснования управленческих решений, что приобретает особую значимость в контексте оптимизации бюджетного и корпоративного финансирования, а также для разработки научно обоснованных приоритетов при планировании и реализации комплекса противоселевых мероприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тухтаров А. А., Рыбаков А. В. О результатах анализа чрезвычайных ситуаций природного характера на территории Кыргызской Республики // Безопасность в техносфере: наука и технологии. 2024. № 1 (1). URL: <https://bvt.kai.ru/issue/view/18> (дата обращения: 17.05.2025).
2. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федер. закон № 116-ФЗ от 21 декабря 1997 г. : принят Государственной Думой 20 июня 1997 г. // Собр. законодательства РФ. 1997. № 30. Ст. 3592.
3. Виноградова Т. А., Куровская В. А. Расчет транспортно-сдвиговых процессов формирования селей // География и водные ресурсы. 2017. № 3. С. 69–78. URL: <https://clck.ru/3QVSSX> (дата обращения: 29.05.2025).
4. Погорелова И. А. Современные материалы и изделия для ремонта и отделки зданий : учеб. пособие. Белгород, 2019. 160 с. URL: https://pgs.bstu.ru/textbooks_manuals (дата обращения: 20.05.2025).
5. Дастанбек Л. Ж., Хамитова К. К. Методы мониторинга горной местности // Молодой ученый. 2021. № 17 (359). С. 66–68. URL: <https://moluch.ru/archive/359/80316/> (дата обращения: 20.05.2025).
6. Калыбекова А. А. Проблемы мониторинга ЧС в горной местности с применением данных дистанционного зондирования // Материалы 19-й Международной конференции

«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» / Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2021. С. 89. URL: <https://elibrary.ru/lgbbuzz> (дата обращения: 29.05.2025).

7. Рыбаков А. В., Иванов Е. В. О комплексном показателе защищенности объектов промышленности от воздействия воздушной ударной волны // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 10. С. 43–49. URL: <https://elibrary.ru/ylvgi> (дата обращения: 29.05.2025).

8. Рыбаков А. В., Иванов Е. В., Хидирлясов Т. М. О некоторых подходах по разработке показателей оценки защищенности населения в условиях военных конфликтов // Актуальные проблемы организации повседневной деятельности в РСЧС и гражданской обороне : сборник трудов научно-практической конференции. Химки, 2022. С. 38–42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mzgsxn> (дата обращения: 29.05.2025).

9. Рыбаков А. В., Очетов С. Л. Об оценке воздействия вторичных поражающих факторов взрыва на население при чрезвычайных ситуациях техногенного характера // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2022. № 1 (52). URL: <https://clck.ru/3QVSh3> (дата обращения: 29.05.2025).

10. Сорокин А. Ю., Рыбаков А. В., Бахтиярова О. Н. О подходе к определению показателя защищенности подземных сооружений метрополитена от воздействия воздушной ударной волны // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2020. № 1 (44). С. 56–65. URL: <https://clck.ru/3QVSm8> (дата обращения: 29.05.2025).

REFERENCES

1. Tukhtarov A. A., Rybakov A. V. On the results of the analysis of natural emergencies on the territory of the Kyrgyz Republic // Safety in the technosphere: science and technology. 2024. № 1 (1). URL: <https://bvt.kai.ru/issue/view/18> (date of application: 17.05.2025).

2. On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities : Federal Law № 116-FZ dated 21.12.1997 : adopted by the State Duma on 20.06.1997 // Collection of legislation of the Russian Federation. 1997. № 30. Art. 3592.

3. Vinogradova T. A., Kurovskaya V. A. Calculation of transport-shear processes of mudflow formation // Issues of geography and geoecology. 2017. № 3. Pp. 69–78. URL: <https://clck.ru/3QVSSX> (date of application: 29.05.2025).

4. Pogorelova I. A. Modern materials and products for the repair and decoration of buildings : textbook. Belgorod, 2019. 160 p. URL: https://pgs.bstu.ru/textbooks_manuals (date of application: 20.05.2025).

5. Dastanbek L. J., Khamitova K. K. Methods of monitoring mountainous terrain // Young scientist. 2021. № 17 (359). Pp. 66–68. URL: <https://moluch.ru/archive/359/80316/> (date of application: 20.05.2025).

6. Kalybekova A. A. Problems of emergency monitoring in mountainous areas using remote sensing data // Proceedings of the 19th International Conference «Modern problems of remote sensing of the Earth from space» : Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 2021. P. 89. URL: <https://elibrary.ru/lgbbuzz> (date of application: 29.05.2025).

7. Rybakov A. V., Ivanov E. V. On the complex indicator of the protection of industrial facilities from the effects of an air shock wave // Occupational safety in industry. 2018. № 10. Pp. 43–49. URL: <https://elibrary.ru/ylvgi> (date of application: 29.05.2025).

8. Rybakov A. V., Ivanov E. V., Khidirlyasov T. M. On some approaches to the development of indicators for assessing the protection of the population in conditions of military conflicts // Actual problems of organizing daily activities in emergency situations and civil defense: proceedings of the scientific and practical conference. Khimki, 2022. Pp. 38–42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mzgsxn> (date of application: 29.05.2025).

9. Rybakov A. V., Ochetov S. L. On the assessment of the impact of secondary damaging explosion factors on the population in man-made emergencies // Scientific and educational problems of civil protection. 2022. № 1 (52). URL: <https://clck.ru/3QVSh3> (date of application: 29.05.2025).

10. Sorokin A. Yu., Rybakov A. V., Bakhtiyarova O. N. On the approach to determining the indicator of protection of underground subway structures from the effects of an air shock wave // Scientific and educational problems of civil protection. 2020. № 1 (44). Pp. 56–65. URL: <https://clck.ru/3QVSm8> (date of application: 29.05.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тухтаров Алтынбек Абдрашитович, адъюнкт научно-исследовательского центра Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код автора: 1552-3240; e-mail: toktorov31-31@inbox.ru

Рыбаков Анатолий Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий, Академия гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код автора: 8654-3788; e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Altynbek A. Tukhtarov, adjunct at the Scientific Research Center, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1 A Sokolovskaya str., Khimki, 141435 Russian Federation); Author's SPIN code: 1552-3240; e-mail: toktorov31-31@inbox.ru

Anatoly V. Rybakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department Information Systems and Technologies, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1 A Sokolovskaya str., Khimki, 141435 Russian Federation); Author's SPIN code: 8654-3788; e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru

Поступила в редакцию 26.05.2025
Одобрена после рецензирования 21.10.2025
Принята к публикации 05.12.2025

УДК 519.876+658.562+622.692

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО НАБОРА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ РИСКОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Крецу Ромина Маратовна¹, Рыбаков Анатолий Валерьевич²

¹ Российский государственный социальный университет, г. Москва, Российская Федерация

² Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлена постановка задачи выбора рационального набора мероприятий по снижению рисков чрезвычайных ситуаций (ЧС) на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Разработана математическая модель оптимизации защитных мероприятий с интеграцией вероятностных, экономических и энтропийных критериев. Проведен численный эксперимент, подтверждающий корректность алгоритма и практическую применимость предложенного подхода для объектов ТЭК. Обоснована актуальность учета информационной неопределенности при анализе редких, но катастрофически значимых сценариев ЧС, для чего в модель введен энтропийный критерий. Предложен алгоритм оптимизации, учитывающий ограничения по бюджету, количеству мероприятий, допустимому уровню остаточного риска и уровня неопределенности. В демонстрационном примере с одним сценарием проанализирована работа алгоритма, подтверждена корректность модели. Установлено, что интеграция энтропии необходима для многосценарных задач, перспективных для практического применения. Полученные результаты могут быть использованы для повышения обоснованности и адаптивности решений в системах управления промышленной безопасностью объектов ТЭК в условиях высокой неопределенности и ограниченных ресурсов. Работа ориентирована на внедрение в процессы проектного управления рисками ЧС на уровне промышленного объекта и может служить основой для создания интеллектуальных инструментов поддержки принятия решений.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, риск, постановка задачи, объекты ТЭК, энтропийный подход, оптимизация, неопределенность

Для цитирования: Крецу Р. М., Рыбаков А. В. Постановка задачи выбора рационального набора мероприятий по снижению рисков чрезвычайных ситуаций на объектах топливно-энергетического комплекса // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 160–173.

FORMULATION OF THE PROBLEM OF SELECTING A RATIONAL SET OF MEASURES TO REDUCE RISKS OF EMERGENCIES AT FUEL AND ENERGY COMPLEX FACILITIES

Romina M. Kretsu¹, Anatoly V. Rybakov²

¹ Russian State Social University, Moscow, Russian Federation

² Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article presents the formulation of the problem of selecting a rational set of measures to reduce risks of emergency situations (ES) at fuel and energy complex (FEC) facilities. A mathematical optimization model is developed that integrates probabilistic, economic, and entropy-based criteria. A numerical experiment is conducted to validate the algorithm and demonstrate its practical applicability to FEC facilities. The relevance of considering informational uncertainty in the analysis of rare but catastrophic ES scenarios is substantiated, with an entropy criterion incorporated into the model. An optimization algorithm is proposed, accounting for constraints on budget, number of implemented measures, acceptable residual risk level, and system uncertainty. In the demonstration example with a single scenario the algorithm's performance was analyzed, and the model's correctness was confirmed. It was established that entropy integration is essential for multi-scenario problems that are promising for practical application. The results obtained can be used to enhance the substantiation and adaptability of decision-making in industrial safety management systems for FEC facilities under conditions of high uncertainty and limited resources. The work is aimed at integration into project-based risk management processes for emergencies at the industrial facility level and can serve as a foundation for developing intelligent decision-support tools.

Keywords: emergency situations, risk, problem formulation, fuel and energy complex facilities, entropy approach, optimization, uncertainty

For Citation: Kretsu R. M., Rybakov A. V. Formulation of the problem of selecting a rational set of measures to reduce risks of emergencies at fuel and energy complex facilities // *Technospheric safety*. 2025. № 4 (49). Pp. 160–173.

Введение

Управление рисками чрезвычайных ситуаций (далее — ЧС) техногенного характера традиционно базируется на оценке вероятности их наступления и тяжести потенциальных последствий. Однако специфика редких, но катастрофически значимых аварий, характерных для объектов топливно-энергетического комплекса (далее — ТЭК), требует критического пересмотра существующих методик оценки и прогнозирования рисков. Как отмечается в исследованиях, именно низкая частота возникновения таких событий в сочетании с их катастрофическими последствиями ограничивает возможности классических частотных подходов, ориентированных

на повторяющиеся сценарии [1]. В таких случаях сложно рационализировать подход к выбору защитных мер в рамках, например, профилактики травматизма [2].

Объекты ТЭК, включающие нефтехранилища, нефтебазы, терминалы и резервуарные парки, относятся к категории потенциально опасных объектов, аварии на которых способны вызвать серьезные последствия для населения, окружающей среды и критически важной инфраструктуры. Современные исследования подтверждают, что аварийные ситуации на подобных объектах становятся одними из основных причин экологических катастроф и человеческих жертв [3]. Традиционные методики оценки рисков недостаточно эффективны в условиях редких

аварий ввиду недостатка статистических данных и высокой степени неопределенности исходных условий.

В условиях нарастающей сложности технологических процессов, внешних климатических и техногенных угроз, а также жестких ограничений на финансирование и ресурсное обеспечение мероприятий возникает объективная необходимость разработки новых подходов к оценке и управлению рисками ЧС. В частности, существенную перспективу представляют методы, способные учитывать не только вероятностную природу аварий, но и информационную неопределенность исходных параметров. К таким методам относятся энтропийный анализ и мультипликативные модели оценки эффективности защитных мероприятий, позволяющие интегрированно рассматривать влияние множества факторов [4–6].

Таким образом, актуальной научной и практической задачей становится постановка и решение проблемы выбора рационального набора защитных мероприятий на основе интеграции вероятностных, экономических и энтропийных критериев. Такая модель позволяет не только минимизировать остаточный риск, но и эффективно адаптировать систему безопасности объектов ТЭК к условиям высокой неопределенности и ограниченных ресурсов [7].

Цель настоящего исследования заключается в постановке задачи разработки математической модели для выбора оптимального набора мероприятий, обеспечивающих снижение рисков ЧС на объектах ТЭК, с учетом вероятностных и энтропийных характеристик, ресурсных ограничений и неопределенности исходных данных. Практическое применение разработанной модели позволит повысить обоснованность

принимаемых решений в области управления рисками ЧС предприятий ТЭК.

Теоретические основы и постановка задачи

Современные объекты топливно-энергетического комплекса (ТЭК) — нефтебазы, резервуарные парки, терминалы, нефтеперерабатывающие заводы и магистральные нефтепроводы — являются важными элементами инфраструктуры и относятся к потенциально опасным производственным объектам, эксплуатация которых сопряжена с высокими рисками ЧС техногенного характера. Эти риски могут быть вызваны как внутренними технологическими отказами, ошибками персонала, дефектами оборудования, так и внешними природными и техногенными воздействиями (землетрясениями, подтоплениями, пожарами и другими факторами). Последствия аварий на таких объектах включают выбросы токсичных и горючих веществ, разрушение инфраструктуры, пожары и взрывы, значительное загрязнение почвы и водных ресурсов, а также серьезные экономические потери [4, 5].

Особенностью объектов ТЭК является высокая степень потенциального ущерба при крайне низкой вероятности реализации критических аварийных сценариев. Подобные аварии относят к категории редких, но чрезвычайно опасных событий, таких как, например, масштабная авария на ТЭЦ-3 в Норильске в 2020 г. [5, 8]. Традиционные методики оценки риска, основанные на вероятностно-частотном подходе, недостаточно эффективны в подобных условиях, поскольку простое произведение вероятности аварии на прогнозируемый ущерб может существенно недооценивать

истинную значимость и потенциальные последствия таких событий.

Согласно современному пониманию риска, предложенному международным стандартом ISO 31000, риск представляет собой не просто математическое ожидание ущерба, а результат влияния неопределенности на достижение поставленных целей [7]. Такое расширенное определение предполагает необходимость учета не только количественных показателей (вероятность и ущерб), но и качественного аспекта — степени неопределенности исходных данных, что особенно актуально при недостатке статистической информации о редких или уникальных событиях.

В рамках нормативных методик количественной оценки риска (КОР), утвержденных Ростехнадзором, допускается использование консервативных предположений и экспертных заключений для исключения маловероятных сценариев аварий. Тем самым часть потенциально катастрофических событий может оказаться не проанализированной

в декларациях безопасности, хотя именно такие события, с точки зрения теории информации и энтропийного подхода, несут наибольшую неопределенность.

Эту неопределенность сложно выразить исключительно традиционными методами, базирующимися на статистическом анализе частотности. На объектовом уровне управления рисками в таких ситуациях целесообразно применение методов теории информации, в частности энтропийного анализа, позволяющего количественно оценивать уровень неопределенности сценариев реализации рисков и тем самым более обоснованно подходить к выбору защитных мероприятий [5, 7].

Понятие энтропии, введенное К. Шенноном в контексте передачи информации, позволяет количественно измерять степень неопределенности случайной величины. Если система может находиться в одном из состояний X_1, X_2, \dots, X_n с вероятностями $P(X_1), P(X_2), \dots, P(X_n)$, то энтропия распределения этих состояний определяется по формуле (1):

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(X_i) \cdot \ln P(X_i). \quad (1)$$

Чем более равномерно распределены вероятности, тем выше энтропия, и наоборот — при доминировании одного события (например, $P(X_i) \rightarrow 1$) энтропия стремится к нулю. В контексте анализа техногенных рисков это означает: чем выше неопределенность в том, какой из сценариев реализуется, тем выше энтропия системы и тем сложнее управлять рисками на основе классических моделей.

Таким образом, рассмотренные положения теории риска, дополненные концепциями энтропии и информационной

значимости, позволяют сделать следующие выводы:

- традиционная вероятностно-частотная модель риска недостаточно эффективна в условиях высокой неопределенности, т. к. не учитывает информационные ограничения, присущие редким, но катастрофически значимым ЧС;
- энтропийный подход является наиболее подходящим инструментом для оценки рисков именно в условиях редких событий, поскольку он количественно учитывает не только вероятность

и тяжесть последствий, но и степень неопределенности информации об этих сценариях, позволяя избежать систематической недооценки рисков;

- эффективность защитных мероприятий при использовании энтропийного подхода необходимо оценивать не только исходя из их стоимости и непосредственного вклада в снижение вероятности или ущерба, но и по степени уменьшения общей неопределенности системы, поскольку именно высокая неопределенность существенно увеличивает риски принятия неверных решений;
- существует объективная необходимость формализации выбора защитных мероприятий посредством математической модели оптимизации, минимизирующей интегральный риск с обязательным учетом вероятностных, экономических и энтропийных критериев, что позволит

достичь оптимального баланса между затратами, эффективностью и уровнем неопределенности в системах безопасности объектов ТЭК.

Применение такого комплексного подхода обеспечит более объективную и адекватную оценку рисков, позволяя предприятиям и организациям ТЭК принимать обоснованные решения, в особенности при планировании защитных мер для редких и потенциально катастрофических ЧС.

Таким образом, энтропийный анализ особенно важен при оценке редких чрезвычайных ситуаций. Например, для объектов хранения нефти, подверженных рискам пожаров, взрывов и утечек, необходимо использовать интегрированные модели, учитывающие как вероятностные характеристики, так и уровень неопределенности. Такая модель описывается следующим уравнением (2):

$$R = R(V_i, H, r_i) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где:

V_i — объемы мероприятий или воздействий для i -го сценария аварии;

H — уровень энтропии, отражающий меру неопределенности системы;

r_i — результативность защитной меры/мероприятия i -й защитной меры/мероприятия;

i — номер сценария аварии или защитной меры.

В этом анализе мы рассмотрим, как минимизировать риски на объектах хранения нефти с использованием энтропийного анализа. Целью является минимизация интегрального риска R , который зависит от объемов внедряемых защитных мер V_i , уровня неопределенности системы H и результативности защитных мер r_i (2).

Для интеграции энтропийного подхода в описанную выше модель необходимо явно

включить энтропию в виде дополнительного ограничения. Энтропия в контексте управления рисками отражает неопределенность (неоднозначность, хаотичность) распределения вероятностей сценариев аварий после внедрения защитных мероприятий.

Рассмотрим исходную постановку задачи в более полной форме с учетом энтропийного ограничения (3). Целевая функция будет выглядеть следующим образом:

$$R(V_i, r_i) = \sum_{i=1}^n [P_i(V_i, r_i) \cdot U_i(V_i, r_i)] + \lambda H(V, r) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где:

V_i — бинарная переменная выбора i -й защитной меры ($V_i = 1$ — мера внедряется, $V_i = 0$ — нет) из объема мероприятий или воздействий (защитных мер);

r_i — результативность i -й защитной меры (от 0 до 1);

$P_i(V_i, r_i)$ — вероятность реализации i -го сценария ЧС, зависящая от V_i и r_i ;

$U_i(V_i, r_i)$ — остаточный ущерб от i -го сценария;

$H(V, r)$ — общая энтропия системы, характеризующая неопределенность распределения вероятностей сценариев, характеристика системы в целом;

λ — весовой коэффициент, регулирующий влияние энтропийного слагаемого ($\lambda \geq 0$).

В предложенной модели ключевыми переменными оптимизации выступают V_i (объемы защитных мероприятий) и r_i (результативность мер), выбор которых обусловлен их прямым влиянием на вероятность P_i и ущерб U_i от чрезвычайных ситуаций. Оптимизация V_i позволяет рационально распределять ресурсы между мерами, учитывая бюджетные и технические ограничения, тогда как r_i отражает эффективность каждой меры в снижении риска. Интеграция энтропии H в целевую

функцию через весовой коэффициент λ обеспечивает учет неопределенности системы, что критически важно при дефиците данных о редких авариях.

Одним из ключевых элементов предложенной целевой функции является вероятность реализации сценариев ЧС после внедрения защитных мероприятий (4). Она рассчитывается с учетом показателей результативности каждого мероприятия по следующей формуле:

$$P_i(V_i, r_i) = P_{oi} \cdot \prod_{j=1}^m (1 - V_j \cdot r_j), \quad (4)$$

где:

P_{oi} — исходная вероятность реализации сценария без защитных мер;

$V_j \in \{0,1\}$ — бинарная переменная, отражающая факт внедрения защитного мероприятия j ;

$r_j \in [0,1]$ — показатель результативности внедряемого мероприятия j .

Для эффективного решения поставленной задачи минимизации интегрального риска чрезвычайных ситуаций требуется формализовать ряд ограничений, отражающих реальные условия и специфику функционирования системы управления рисками на объектах хранения нефти по формулам (5)–(8). Данные ограничения обеспечивают учет финансовых и ресурсных возможностей организации, регламентируют допустимые уровни остаточного риска и неопределенно-

сти системы, а также учитывают показатели результативности защитных мероприятий. Формализация этих условий позволяет аналитически описать область допустимых решений, в рамках которой возможен рациональный выбор параметров мероприятий для снижения рисков до приемлемого уровня:

- финансовое (бюджетное) ограничение: суммарная стоимость всех выбранных мероприятий не должна превышать выделенный бюджет (B):

$$\sum_{j=1}^m C_j \cdot V_j(r_i) \leq B, \quad (5)$$

где:

m — общее количество доступных защитных мер;

C_j — стоимость j -го защитного мероприятия;

- энтропийное ограничение: неопределенность системы (энтропия H) после внедрения защитных мер не должна превышать допустимый уровень энтропии $H_{\text{допуст}}$:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i(V, r) \cdot \ln P_i(V, r) \leq H_{\text{допуст}} ; \quad (6)$$

- допустимый уровень остаточного риска: суммарный остаточный риск после внедрения мер должен оставаться в пределах максимально допустимого значения $R_{\text{допуст}}$:

$$\sum_{i=1}^n P_i(V, r) \cdot U(V, r) \leq R_{\text{допуст}} ; \quad (7)$$

- ресурсные ограничения (технические, организационные): количество одновременно внедряемых защитных мер не должно превышать максимальное значение N_{max} :

$$\sum_{j=1}^m (V_j) \leq N_{\text{max}} . \quad (8)$$

Для практического применения предложенной модели выбора рационального набора защитных мероприятий на объектах ТЭК разработан алгоритм оптимизационного расчета, учитывающий вероятностные характеристики сценариев ЧС, эффективность и стоимость защитных мероприятий, а также уровень неопреде-

ленности системы. В алгоритме предусмотрено использование экспертных оценок при отсутствии статистической информации, а также формализация ограничений по бюджету, числу мероприятий и допустимому уровню риска и энтропии. Последовательность этапов решения задачи приведена в табл. 1

Таблица 1
Алгоритм решения задачи оптимизации выбора рационального набора мероприятий по снижению рисков ЧС

Table 1

The algorithm for solving the optimization problem of selecting a rational set of measures to reduce emergency risks

№ этапа Step No.	Этап алгоритма Algorithm Step	Описание и комментарии Description and Comments
1	Формирование перечня сценариев Scenario List Formation	Сформировать перечень возможных сценариев ЧС (например, разгерметизация, пожар, взрыв), определить для каждого исходную вероятность P_0 и потенциальный ущерб U_0 . В случае отсутствия статистики — использовать метод экспертных оценок или байесовское уточнение Form a list of possible emergency scenarios (e.g., loss of containment, fire, explosion) and determine the initial probability P_0 and potential damage U_0 for each. In the absence of statistical data, use expert judgment or Bayesian updating

Окончание таблицы 1

№ этапа Step No.	Этап алгоритма Algorithm Step	Описание и комментарии Description and Comments
2	Определение перечня защитных мероприятий Definition of Protective Measures	Составить список возможных защитных мер. Для каждой меры задать результативность r_j (например, по экспертной шкале от 0 до 1) и стоимость C_j . Провести валидацию исходных оценок с привлечением нескольких экспертов или на основе инженерных данных Compile a list of potential protective measures. For each measure, specify its effectiveness r_j (e. g., on an expert scale from 0 to 1) and cost C_j . Validate the initial estimates by involving multiple experts or using engineering data
3	Инициализация переменных выбора Initialization of Selection Variables	Задать исходные значения бинарных переменных V_j (0 — мера не внедряется, 1 — внедряется) и коэффициентов результативности r_j . Можно использовать полное или частичное внедрение в рамках моделируемого сценария Set initial values for the binary variables V_j (0 — measure not implemented, 1 — measure implemented) and effectiveness coefficients r_j . Full or partial implementation may be used within the modeled scenario
4	Расчет остаточных показателей Calculation of Residual Indicators	Вычислить для каждого сценария остаточную вероятность $P_i(V, r)$, используя формулу: $P_i = P_0 \cdot \prod_j (1 - V_j \cdot r_j)$. Рассчитать интегральный остаточный риск R , суммарный ущерб и энтропию H по всем рассматриваемым сценариям. При наличии нескольких сценариев энтропия рассчитывается как: $H = -\sum P_i \cdot \ln P_i$ Calculate the residual probability $P_i(V, r)$, for each scenario using the formula: $P_i = P_0 \cdot \prod_j (1 - V_j \cdot r_j)$. Compute the integral residual risk R , total damage, and entropy H across all considered scenarios. In the case of multiple scenarios, entropy is calculated as: $H = -\sum P_i \cdot \ln P_i$
5	Проверка выполнения ограничений Constraint Check	Проверить выполнение заданных ограничений: <ul style="list-style-type: none"> • по бюджету ($\sum C_j \leq B$); • по количеству внедряемых мероприятий ($\sum V_j \leq N_{\max}$); • по допустимому уровню остаточного риска ($R \leq R_{\text{допуст}}$); • по допустимому уровню энтропии ($H \leq H_{\text{допуст}}$) Check compliance with the specified constraints: <ul style="list-style-type: none"> • budget constraint ($\sum C_j \leq B$); • number of implemented measures ($\sum V_j \leq N_{\max}$); • allowable residual risk level ($R \leq R_{\text{allowable}}$); • allowable entropy level ($H \leq H_{\text{allowable}}$)
6	Проведение оптимизации Optimization Procedure	Провести оптимизацию (например, методом полного перебора, генетических алгоритмов, градиентных методов или комбинированного подхода) для поиска такого набора V_j, r_j , который минимизирует интегральный риск R с учетом ограничений. При многосценарном анализе — дополнительно учитывать минимизацию энтропии H Perform optimization (e. g., by exhaustive search, genetic algorithms, gradient-based methods, or a hybrid approach) to find a set of V_j, r_j that minimizes the integral risk R subject to the specified constraints. In multi-scenario analysis, additionally account for the minimization of entropy H
7	Определение оптимального решения Determination of the Optimal Solution	Найти оптимальный набор защитных мероприятий, удовлетворяющий всем ограничениям и обеспечивающий минимально достижимый уровень риска R для предприятия. Провести анализ чувствительности полученного решения к изменению исходных параметров (валидация модели). Рекомендовать меры к внедрению Identify the optimal set of protective measures that satisfies all constraints and achieves the minimum attainable risk level R for the facility. Perform a sensitivity analysis of the obtained solution with respect to changes in the initial parameters (model validation). Recommend the selected measures for implementation

Использование данного алгоритма позволяет обеспечить системный и обоснованный подход к выбору рационального набора защитных мероприятий при проектировании и модернизации систем управления рисками ЧС на объектах ТЭК. Включение энтропийного критерия в процесс оптимизации способствует снижению неопределенности, что особенно важно при оценке редких, но катастрофически значимых сценариев. Это, в свою очередь, повышает надежность принимаемых управленческих решений в условиях ограниченных ресурсов и высокой информационной неопределенности.

Результаты численного моделирования и их обсуждение

Для демонстрации возможностей предложенной модели оптимизации рационального набора защитных мероприятий рассмотрим типовой объект топливно-энергетического комплекса — нефтехранилище (резервуарный парк магистрального нефтепровода). Проведенный численный эксперимент направлен не на построение полнофункциональной модели для всех возможных ЧС на объекте, а на тестовую демонстрацию применения алгоритма и обоснование роли параметров модели, в т. ч. энтропийного критерия, в процессе оптимизации.

Характеристика анализируемого объекта

Объект предназначен для хранения сырой нефти и нефтепродуктов в вертикальных стальных резервуарах емкостью порядка 10 000 м³ каждый. Хранимая среда — сырая нефть и нефтепродукты; температура вспышки — около -1 °С; пределы

взрываемости паров нефти — 1,2–8,0 % по объему.

Основные сценарии реализации рисков:

- возможность разрушения резервуара с разливом нефти (частичная/полная);
- возгорание паров нефти при утечке и образовании паровоздушного облака;
- образование взрывоопасной смеси при испарении нефти и ее воспламенение;
- разрушение резервуара с полным выходом нефти и масштабными последствиями (пожар, взрыв, загрязнение).

В данном демонстрационном примере для упрощения рассмотрен один сценарий — полное разрушение резервуара без возгорания (табл. 2). Исходные данные задаем в табл. 3, включая вероятность реализации сценария, которая задана как $P_0 = 1$ (*worst-case scenario*). Такой подход отражает пессимистичную гипотезу при отсутствии детальной статистики и позволяет провести консервативную оценку. При этом важно отметить, что:

- при одном сценарии роль энтропии в самом численном расчете минимальна — $H = 0$;
- однако включение энтропийного слагаемого в модель необходимо для обеспечения корректной постановки задачи, поскольку в практических приложениях (расширенной модели) будет учитываться множественность сценариев, для которых неопределенность распределения вероятностей станет критически важной;
- таким образом, в текущем примере расчет H служит для демонстрации работоспособности алгоритма с учетом ограничений по H и как задел на многосценарное расширение модели, что соответствует направлениям дальнейших исследований.

Таблица 2
Сценарий «Полное разрушение резервуара без возгорания»

Table 2
Scenario "Complete tank destruction without ignition"

Аспект Aspect	Описание Description
Описание сценария Scenario Description	Катастрофическая разгерметизация резервуара → мгновенный выход нефти → образование пруда нефти, возможный перелив через обвалование Catastrophic tank rupture → instantaneous oil release → formation of an oil pond, with possible overflow beyond the containment dike
Причины Causes	Конструкционные дефекты, воздействие внешних факторов (землетрясение, взрыв), ошибки в эксплуатации Structural defects, external impacts (earthquake, explosion), and operational errors
Последствия Consequences	Крупный разлив нефти, загрязнение почвы и воды, выброс паров Major oil spill, soil and water contamination, vapor release

Таблица 3
Исходные данные для расчета

Table 3
Initial data for calculation

Параметр расчета Calculation Parameter	Обозначение Notation	Значение Value
Исходная вероятность сценария Initial scenario probability	P_0	1
Исходный ущерб от сценария (крупный разлив нефти, загрязнение почвы и воды), руб. Initial damage from the scenario (major oil spill, soil and water contamination), RUB	U_0	10 000 000
Бюджет на защитные меры, руб. Budget for protective measures, RUB	B	3 000 000
Максимальное количество мероприятий Maximum number of measures	N_{\max}	4
Допустимый уровень остаточного риска, руб. Allowable residual risk level, RUB	$R_{\text{допуст}}$ $R_{\text{allowabel}}$	2 000 000
Допустимый уровень энтропии Allowable entropy level	$H_{\text{допуст}}$ $H_{\text{allowabel}}$	0,5
Весовой коэффициент значимости энтропии Weighting factor of entropy significance	λ	0,3

Защитные меры, соответствующие сценарию аварии с категоризацией по результативности, представлены в табл. 4 [5]

Таблица 4
Категории результативности защитных мер

Table 4
Categories of protective measures' effectiveness

Защитная мера Protective Measure	Категория Category	Результативность (r_j) Effectiveness	C_j , руб. Cost
Высокие обвалования, рассчитанные на 100 % объема резервуара High containment dikes designed for 100 % of tank volume	II	0,75	1 000 000
Автоматические системы контроля уровня нефти Automated oil level monitoring systems	II	0,70	700 000
Герметичные дренажные системы Sealed drainage systems	II	0,75	800 000
Разработка плана ликвидации разливов Development of an oil spill response plan	V	0,10	150 000
Обучение персонала эвакуации Personnel evacuation training	IV	0,40	200 000
Договоренности с внешними службами Agreements with external emergency services	V	0,10	100 000

Расчеты по шагам

Шаг 1. Выбор защитных мер (предварительно выбраны все меры):

$$\sum C_j = 1\,000\,000 + 700\,000 + 800\,000 + 150\,000 + 200\,000 + 100\,000 = 2\,950\,000 \leq 3\,000\,000.$$

Условие по бюджету выполняется.

Шаг 2. Проверка ограничения по количеству мер. Выбрано шесть мер, что больше установленного $N_{\max} = 4$. Для выполнения ограничения по числу мер исключаем наименее результативные меры из категории V (результативность 0,1).

Оставляем четыре наиболее результативные меры (табл. 5).

Таблица 5
Выбор защитных мер

Table 5
Selection of protective measures

Выбранные меры Selected Measures	r_j	C_j
Высокие обвалования High containment dikes	0,75	1 000 000
Автоматические системы контроля уровня нефти Automated oil level monitoring systems	0,70	700 000
Герметичные дренажные системы Sealed drainage systems	0,75	800 000
Разработка плана ликвидации разливов Development of an oil spill response plan	0,40	200 000

Итого затраты: $2\,700\,000 \leq 3\,000\,000$.

Шаг 3. Расчет остаточной вероятности реализации сценария:

$$P = 1 \cdot (1 - 0,75) \cdot (1 - 0,70) \cdot (1 - 0,75) \times (1 - 0,40) = 1 \cdot 0,25 \cdot 0,30 \cdot 0,25 \cdot 0,60 = 0,01125.$$

Шаг 4. Расчет остаточного ущерба:

$$U = 10\,000\,000 \cdot 0,25 \cdot 0,30 \cdot 0,25 \cdot 0,60 = 112\,500 \text{ руб.}$$

Шаг 5. Проверка ограничения по остаточному риску:

$$R = P \cdot U = 0,01125 \cdot 112\,500 \approx 1\,265,6 \text{ руб.} \leq 2\,000\,000 \text{ руб.}$$

Ограничение выполнено.

Шаг 6. Расчет энтропии (для одного сценария неопределенность минимальна).

При одном сценарии вероятность $p_1 = 1$:

$$H = -1 \cdot \ln(1) = 0 \leq 0,5.$$

Ограничение выполнено. Итоговые результаты приведены в табл. 6.

Таблица 6
Итоговая таблица результатов расчета
Table 6
Final table of calculation results

Параметр оценки Evaluation Parameter	Значение Value	Выполнение ограничений Constraint Compliance
Исходная вероятность сценария, P_0 Initial scenario probability	1,0 (100 %)	—
Итоговая вероятность сценария после мер, P Final scenario probability after measures	0,01125 (1,125 %)	—
Исходный ущерб, U_0 Initial damage	10 000 000 руб.	—
Итоговый ущерб после мер, U Final damage after measures	112 500 руб.	—
Остаточный риск после мер, R Residual risk after measures	1 265,6 руб.	Выполнено (≤ 2 млн) Completed (≤ 2 mln)
Итоговая энтропия после мер, H Final entropy after measures	0	Выполнено ($\leq 0,5$) Completed ($\leq 0,5$)
Суммарные затраты на меры, $\sum C_j$ Total cost of measures	2 700 000 руб.	Выполнено (≤ 3 млн) Completed (≤ 3 mln)
Количество внедренных мер Number of implemented measures	4	Выполнено (≤ 4) Completed (≤ 4)

Выводы

В результате проведенного исследования разработана математическая модель оптимизации выбора рационального набора защитных мероприятий для снижения рисков чрезвычайных ситуаций на объектах ТЭК. В модели интегрированы вероятностные, экономические и энтропийные критерии, что обеспечивает ее применимость в условиях высокой неопределенности ис-

ходных данных, характерной для редких, но критически значимых сценариев ЧС. Предложен алгоритм оптимизации с учетом ограничений по бюджету, количеству мероприятий, допустимому уровню остаточного риска и неопределенности. Проведенный численный эксперимент подтвердил корректность алгоритма и эффективность предложенного подхода. В демонстрационном примере с одним сценарием вклад энтропии минимален, однако ее включение

в модель обосновано как необходимый элемент для расширения на многосценарные задачи. Полученные результаты могут быть использованы для повышения обоснованности и прозрачности решений в системах

управления промышленной безопасностью объектов ТЭК. Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием многосценарного анализа и автоматизацией расчетов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Акимов В. А., Быков А. А., Щепин Е. Ю. Введение в статистику экстремальных значений и ее приложения. М., 2009. 524 с.
2. Совершенствование системы профилактики травматизма на основе конвергентных технологий цифрового управления обеспечением работников средствами индивидуальной защиты / В. А. Петрова [и др.] // Безопасность техногенных и природных систем. 2024. Т. 8, № 3. С. 29–38.
3. Al-Rawhani N. M. A., Alekhin, V., Poluyan L. Risk Assessment of Storage Tanks in the Oil and Gas Industry // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 384. Art. 01059. URL: <https://clck.ru/3QfZBo> (дата обращения: 11.08.2025).
4. Рыбаков А. В., Постернак Е. В. Анализ проблемной ситуации в области обоснования объемов инженерно-технических мероприятий при прогнозировании ущерба от природных чрезвычайных ситуаций с учетом антропогенных факторов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2024. № 4 (63). С. 72–83.
5. Крецу Р. М., Рыбаков А. В. Энтропийный анализ чрезвычайных ситуаций техногенного характера: методология и практическое применение // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2024. № 4. С. 451–461.
6. Fedorets A. Current concept of risk: the higher the probability of an event, the lower the risk // Reliability: Theory & Applications. 2024. Vol. 19, № SI 6 (81). Pp. 88–95.
7. ISO 31000:2009. Risk management — Principles and guidelines. Geneva, 2009. 24 p.
8. Лисанов М. В., Сумской С. И., Швыряев А. А. Неопределенности количественной оценки риска аварий на нефтегазовых объектах // Вести газовой науки. 2018. № 2 (34). URL: <https://clck.ru/3QfR5i> (дата обращения: 11.08.2025).

REFERENCES

1. Akimov V. A., Bykov A. A., Shchepin E. Yu. Introduction to Extreme Value Statistics and Its Applications. Moscow, 2009. 524 p.
2. Improvement of the Injury Prevention System Based on Convergent Technologies of Digital Management of Provisioning Employees with PPE / V. A. Petrova et al. // Safety of Technogenic and Natural Systems. 2024. Vol. 8, № 3. Pp. 29–38.

3. Al-Rawhani N. M. A., Alekhin V., Poluyan L. Risk Assessment of Storage Tanks in the Oil and Gas Industry // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 384. Art. 01059. URL: <https://clck.ru/3QfZBo> (date of application: 11.08.2025).

4. Rybakov A. V., Posternak E. V. Analysis of the Problem Situation in the Field of Justification for the Volumes of Engineering Measures in Forecasting Damage from Natural Emergencies Considering Anthropogenic Factors // Scientific and educational tasks of civil defence. 2024. № 4 (63). Pp. 72–83.

5. Kretsu R. M., Rybakov A. V. Entropy Analysis of Technogenic Emergency Situations: Methodology and Practical Application // Journal of Civil Protection. 2024. № 4. Pp. 451–461.

6. Fedorets A. Current concept of risk: the higher the probability of an event, the lower the risk // Reliability: Theory & Applications. 2024. Vol. 19, № SI 6 (81). Pp. 88–95.

7. ISO 31000:2009. Risk management — Principles and guidelines. Geneva, 2009. 24 p.

8. Lisanov M. V., Sumskoy S. I., Shvyryaev A. A. Uncertainties in the Quantitative Assessment of Accident Risk at Oil and Gas Facilities // Gas Science Bulletin. 2018. № 2 (34). URL: <https://clck.ru/3QfR5i> (date of application: 11.08.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крецу Ромина Маратовна, аспирант, Российский государственный социальный университет (129226, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр. 1); SPIN-код автора (РИНЦ): 8973-2818; ORCID: 0009-0008-0611-2974; e-mail: r.m.kretsu@yandex.ru

Рыбаков Анатолий Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий, Академия гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код автора: 8654-3788; e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romina M. Kretsu, Ph.D. student, Russian State Social University (4. bld. 1, Wilhelm Pieck st. Moscow, 129226 Russian Federation); ID RISC: 8973-2818; ORCID: 0009-0008-0611-2974; e-mail: r.m.kretsu@yandex.ru

Anatoly V. Rybakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department (Information Systems and Technologies) of the Faculty (Engineering), Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation (1 Sokolovskaya str., Khimki, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 8654-3788; AuthorID: 709088; e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru

Поступила в редакцию 27.06.2025
Одобрена после рецензирования 15.07.2025
Принята к публикации 05.12.2025