

ISSN 2658-6223

Управление
в организационных системах
(технические науки)

Строительные конструкции,
здания и сооружения
(технические науки)

Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение
(технические науки)

Водоснабжение, канализация,
строительные системы
охраны водных ресурсов
(технические науки)

Строительные материалы
и изделия
(технические науки)

Экологическая безопасность
(технические и химические
науки)

Пожарная безопасность
(технические науки)

Министерство Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ

Журнал включен
в «Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные
научные результаты диссертаций на соискание
ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук ВАК
при Министерстве науки и высшего образования
Российской Федерации»

№ 2 (59), 2026



Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

Территория распространения — Российская Федерация, зарубежные страны.

Журнал индексируется в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU / РИНЦ (Россия).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Григорян Арсен Рафикович, кандидат психологических наук

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Заместители

главного редактора:

Шарабанова Ирина Юрьевна, кандидат медицинских наук, доцент

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Федосов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, академик РААСН

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, г. Москва)

Никифоров Александр Леонидович, доктор технических наук, старший научный сотрудник

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Научный редактор:

Ульев Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент,

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Члены редколлегии:

Акулова Марина Владимировна – д-р техн. наук, профессор, советник РААСН, заведующая кафедрой архитектуры и урбанистики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (Россия, г. Иваново)

Алексеев Михаил Иванович – д-р техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (Россия, г. Санкт-Петербург)

Барбин Николай Михайлович – д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской группы комплекса платных услуг отделения научных исследований ФГБОУ ВО «Уральский институт ГПС МЧС России» (Россия, г. Екатеринбург)

Баусов Алексей Михайлович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Бубнов Андрей Германович – д-р хим. наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации пожарной техники, средств связи и малой механизации (в составе УНК «Пожаротушение») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Бутман Михаил Федорович – д-р физ.-мат. наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, главный научный сотрудник, профессор кафедры технологии керамики и электрохимических производств ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет» (Россия, г. Иваново)

Бутузов Станислав Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий (в составе учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий) ФГБОУ ВО «Академия ГПС МЧС России» (Россия, г. Москва)

Горнова Светлана Владимировна – д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры основ экономики функционирования РСЧС Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Гринченко Борис Борисович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарно-строевой, физической подготовки и ГДЗС (в составе УНК «Пожаротушение») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Ерофеев Владимир Трофимович – академик РААСН, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ (Россия, г. Москва)

Ефремов Александр Михайлович – д-р хим. наук, профессор, начальник лаборатории математического моделирования технологических процессов микроразработки отдела разработки технологических процессов акционерного общества «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, г. Москва)

Камлюк Андрей Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, ученый секретарь ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь» (Республика Беларусь, г. Минск)

Ковтун Вадим Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры оперативно-тактической деятельности и техники Гомельского филиала ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь» (Республика Беларусь, г. Гомель)

Колобов Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет» (Россия, г. Иваново)

Краснов Александр Алексеевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Лазарев Александр Александрович – канд. пед. наук, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры правового обеспечения надзорной деятельности (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Лопанов Александр Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» (Россия, г. Белгород)

Назарычев Александр Николаевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (Россия, г. Санкт-Петербург)

Овчинников Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Присадков Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, академик Национальной академии наук пожарной безопасности, главный научный сотрудник ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Россия, г. Балашиха)

Румянцова Варвара Евгеньевна – д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН, проректор по науке и инновациям, профессор кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (Россия, г. Иваново)

Семенов Алексей Олегович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры основ гражданской обороны и управления в ЧС Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Соколов Александр Михайлович – д-р техн. наук, доцент, советник РААСН, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Степанов Сергей Гаевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры мехатроники и радиоэлектроники ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (Россия, г. Иваново)

Сырбу Светлана Александровна – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Теличенко Валерий Иванович – д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик РААСН, президент ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (Россия, г. Москва)

Федосеев Вадим Николаевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры организации производства и городского хозяйства ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (Россия, г. Иваново)

Хафизов Ильдар Фанильевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа)

Циркина Ольга Германовна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Швецов Сергей Александрович – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (Россия, г. Воронеж)

Технический редактор: Чуприна Ольга Сергеевна

Дата выхода в свет 26.06.2026 г. Формат 60x90 1/8. Усл. печ. л. 22,5. Тираж 100 экз. Заказ №

Реестровая запись от 15.11.2022 серия ПИ № ФС77-84179

(Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Адрес редакции (издателя): 153040, г. Иваново, проспект Строителей, д. 33.

Тел.: (4932) 93-08-00, доб. 1560; e-mail: journal@edufire37.ru

СОДЕРЖАНИЕ / CONTENTS

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
FIRE SAFETY (TECHNICAL)

Арзаев Н. А., Ивахнюк Г. К. Оценка влияния пористости минерализаторов на пожарно-технические характеристики воздушно-механической пены.....	5
Arzaev N. A., Ivakhnyuk G. K. Evaluation of the effect of mineralizer porosity on fire-technical characteristics of air-mechanical foam	5
Карпачев С. П., Фролов С. В., Фролов Д. В., Шуляк Е. Ю. Цифровое моделирование оценки крупных лесных горючих материалов.....	15
Karpachev S. P., Frolov S. V., Frolov D. V., Shulyak E. Yu. Digital modeling for assessing forest combustible materials	15
Климов А. В. Обзор научных работ по порошковому пожаротушению	25
Klimov A. V. Review of scientific papers on powder fire extinguishing	25
Мальцев М. А., Сырбу С. А., Азовцев А. Г., Наконечный С. Н., Шабунин С. А. Анализ зарубежной и отечественной патентной базы в области создания интумесцентных покрытий технологического оборудования нефтегазового комплекса	33
Maltsev M. A., Syrbu S. A., Azovtsev A. G., Nakonechniy S. N., Shabunin S. A. Analysis of the foreign and domestic patent base in the field of creating intumescent coatings for technological equipment of oil and gas complex.....	33
Мареев М. А. Нормативно-параметрическая модель динамики боевых действий во время пожара на основе метода электрогидравлических аналогий	45
Mareev M. A. A normative-parametric model of combat operations during a fire based on the electrohydraulic analogy method	45
Никифоров А. Л., Ульяева С. Н., Легкова И. А., Новичкова Н. Ю., Шарабанова И. Ю. Возможности использования ВЧ/СВЧ-сушки пожарных рукавов в условиях эксплуатации и обслуживания	59
Nikiforov A. L., Ul'eva S. N., Legkova I. A., Novichkova N. Yu., Sharabanova I. Yu. Possibilities of using HF/microwave drying of fire hoses in operation and maintenance conditions	59
Самигуллин Г. Х., Захаров А. Е. Методика обеспечения пожарной безопасности при хранении нефтепродуктов в полимерных эластичных резервуарах на основе расчёта времени воспламенения оболочки и обоснования противопожарных разрывов.....	67
Samigullin G. Kh., Zakharov A. E. Methodology for ensuring fire safety during petroleum product storage in polymeric elastic reservoirs based on calculating shell ignition time and justifying fire separation distances.....	67
Саратов Д. Н., Бельшина Ю. Н., Маер О. М. Анализ актуальных проблем обеспечения пожарной безопасности высотных зданий в условиях роста мегаполисов	80
Saratov D. N., Belshina Yu. N., Maer O. M. Current problems of ensuring fire safety of high-rise buildings in the conditions of growth of megapolities	80
Серов В. В., Никифоров А. Л., Новожилова К. А. Современные научные подходы к созданию многофункциональных и универсальных огнетушащих веществ на основе солей: аналитический обзор	89
Serov V. V., Nikiforov A. L., Novozhilova K. A. Modern scientific approaches to the development of multifunctional and universal salt-based fire extinguishing agents: an analytical review	89
Сиплатов Е. А. Исследование теплоизолирующих свойств огнезащитных составов на древесине: разработка установки, оценка неопределённости и испытания покрытий.....	99
Siplatov E. A. Investigation of heat-insulating properties of fire-retardant coatings on wood: setup development, uncertainty assessment, and coating testing	99

Хафизов И. Ф., Султанов Р. М., Бикмеев В. И., Бакиров Д. Р., Озден И. В. Оценка ингибирующей защиты металлоконструкций резервуаров от биокоррозии гравиметрическим методом как фактор снижения пожарной опасности..... 107

Hafizov I. F., Sultanov R. M., Bikmееv V. I., Bakirov D. R., Ozden I. V. Assessment of inhibitory protection of metal structures of tanks from biocorrosion by gravimetric method as a factor of fire hazard reduction .. 107

Циркина О. Г., Спиридонова В. Г., Сырбу С. А., Салихова А. Х., Клушин А. Н. Особенности поведения материалов из синтетических и смесовых волокон под действием высоких температур и при горении..... 118

Tsirkina O. G., Spiridonova V. G., Syrбу S. A., Salikhova A. Kh., Klushin A. N. Behavioral characteristics of synthetic and blended fibers under high temperatures and during combustion..... 118

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS (TECHNICAL)

Акулова М. В., Сафонов А. А. Влияние волокнистых добавок на реологические свойства битумных гидроизоляционных материалов..... 129

Akulova M. V., Safonov A. A. Influence of fiber additives on the rheological properties of bitumen waterproofing materials 129

УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS (TECHNICAL)

Апарин А. А., Смирнов Д. В. Разработка структуры базы данных и программы для ретроспективного анализа видеозаписей пожаров, произошедших на стоянках автомобилей в городской среде..... 135

Aparin A. A., Smirnov D. V. Development of a database structure and a program for the retrospective analysis of video recordings of fires that occurred in parking lots in an urban environment..... 135

Бобарико А. В., Рожков С. Н., Яшков Р. Н., Москалев Д. А., Бородин Н. В. Применение в автоматизированных системах средств отображения оперативной обстановки при выполнении задач спасательными воинскими формированиями..... 151

Bobariko A. V., Rozhkov S. N., Yashkov R. N., Moskalev D. A., Borodin N. V. Use of means of displaying operational situation in automated systems when performing tasks by military rescue units 151

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (ТЕХНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ) ECOLOGICAL SAFETY (TECHNICAL AND CHEMICAL)

Исхакова Р. Я., Салимов А. И. Адсорбционная очистка сточных вод промышленных предприятий от анионных поверхностно-активных веществ в динамических условиях с применением отхода энергетики..... 159

Iskhakova R. Ya., Salimov A. I. Adsorption treatment of industrial wastewater from anionic surfactants under dynamic conditions using energy waste 159

Козырь Д. А., Макеева Д. А. Оценка экологического риска применения хлорных реагентов в водоподготовке 168

Kozyr D. A., Makeeva D. A. Assessment of the environmental risk of using chlorine reagents in water treatment..... 168

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
FIRE SAFETY (TECHNICAL)**

УДК 614.842.61

DOI 10.48612/ntp/f9ru-px1n-8631

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ МИНЕРАЛИЗАТОРОВ
НА ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ**

Н. А. АРЗАЕВ¹, Г. К. ИВАХНЮК²

¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
E-mail: n.arzaef@yandex.ru, fireside@inbox.ru

В работе проведено экспериментальное исследование влияния пористой структуры минерализаторов на пожарно-технические характеристики воздушно-механической пены (ВМП) при тушении модельных очагов пожара класса В. Объектами исследования выступили четыре минерализатора с принципиально различными параметрами пористости: маршалит SiO_2 (удельная поверхность $\sim 0,15 \text{ м}^2/\text{г}$, непористый), силикагель марки КСМГ ($650\text{--}800 \text{ м}^2/\text{г}$, мезопористый), активированный уголь марки ОУ-Б ($\geq 850 \text{ м}^2/\text{г}$, макро-мезопористый, гидрофильный) и активированный уголь марки ОУ-А ($>1200 \text{ м}^2/\text{г}$, макро-мезо-микропористый, гидрофобный). Минерализаторы вводились в 6%-й водный раствор пенообразователя ПО-6 в концентрациях 0,5–3,0% масс. при различном времени электрофизической обработки (ЭФО) дисперсной среды (воды). Оценивались кратность пены, время жизни, время тушения модельного очага, удельный расход огнетушащего вещества (ОТВ) и наличие повторного воспламенения.

Установлено, что пористость минерализатора является определяющим фактором, влияющим на пожарно-технические характеристики ВМП наряду с характером смачиваемости поверхности. Результаты позволяют сформулировать критерий выбора оптимального минерализатора для ВМП: сочетание умеренной мезопористости ($300\text{--}800 \text{ м}^2/\text{г}$) с гидрофильным характером поверхности обеспечивает наилучшие пожарно-технические характеристики за счёт баланса между структурным армированием пенной плёнки и удержанием воды в порах по механизму капиллярной конденсации.

Ключевые слова: пористость минерализаторов, маршалит, силикагель, активированный уголь ОУ-А, активированный уголь ОУ-Б, удельная поверхность, воздушно-механическая пена, кратность пены, устойчивость пены, время жизни, огнетушащая способность, электрофизическая обработка воды

**EVALUATION OF THE EFFECT OF MINERALIZER POROSITY
ON FIRE-TECHNICAL CHARACTERISTICS OF AIR-MECHANICAL FOAM**

N. A. ARZAEV, G. K. IVAKHNYUK

Saint Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Saint Petersburg

Saint Petersburg State Technological Institute,
Russian Federation, Saint Petersburg

E-mail: n.arzaef@yandex.ru, fireside@inbox.ru

This study presents the first systematic experimental investigation of the effect of the porous structure of mineralizers on the fire-technical characteristics of air-mechanical foam (AMF) during suppression of Class B model fire sources. Four mineralizers with fundamentally different porosity parameters were studied: marshallite SiO_2 (specific surface area $\sim 0.15 \text{ м}^2/\text{г}$, non-porous), silica gel grade KSMG ($650\text{--}800 \text{ м}^2/\text{г}$, mesoporous), activated carbon grade OU-B ($\geq 850 \text{ м}^2/\text{г}$, macro-mesoporous, hydrophilic), and activated carbon grade

OU-A ($>1200 \text{ m}^2/\text{g}$, macro-meso-microporous, hydrophobic). The mineralizers were introduced into a 6 % aqueous solution of PO-6 foaming agent at concentrations of 0.5–3.0 wt.% with varying electrophysical treatment (EPT) durations (0–3600 s). Foam expansion ratio, foam lifetime, extinguishing time, specific fire-extinguishing agent consumption, and reignition occurrence were evaluated.

It was established that mineralizer porosity is a determining factor affecting AMF fire-technical characteristics alongside the surface wettability. The results allow formulating a criterion for selecting an optimal mineralizer for AMF: a combination of moderate mesoporosity (300–800 m^2/g) with a hydrophilic surface character provides the best fire-technical characteristics due to a balance between structural reinforcement of the foam film and water retention in pores via the capillary condensation mechanism.

Keywords: mineralizer porosity, marshalite, silica gel, activated carbon OU-A, activated carbon OU-B, specific surface area, air-mechanical foam, foam expansion ratio, foam stability, foam lifetime, fire extinguishing performance, electrophysical water treatment.

Введение

Актуальность вопроса обеспечения пожарной безопасности во многом определяется необходимостью совершенствования средств пожаротушения. В современных условиях усложнения технологических процессов, увеличения количества объектов с повышенной степенью пожаро-взрывоопасности, а также расширения зон промышленного освоения в экстремальных природно-климатических условиях особенно важным становится разработка более эффективных огнетушащих веществ. Это позволяет не только сократить время локализации и ликвидации пожаров, но и минимизировать экологические и экономические последствия от чрезвычайных ситуаций.

Воздушно-механическая пена (ВМП) является одним из наиболее распространённых средств тушения пожаров классов А и В на объектах хранения и переработки горючих жидкостей. В практике обеспечения пожарной безопасности такие композиции применяются благодаря способности одновременно экранировать поверхность горючего, охлаждать зону горения и подавлять массо- и теплообмен между фазами. Вместе с тем ряд недостатков ВМП – быстрая деградация пенного слоя, низкая адгезионная способность и ограниченная работоспособность при отрицательных температурах – обуславливает необходимость совершенствования пенных составов, в том числе путём введения тонкодисперсных твёрдых минеральных добавок (минерализаторов).

Анализ научной литературы показывает, что при выборе минерализаторов для ВМП исследователи традиционно акцентируют внимание на химической природе поверхности частиц – их гидрофильности или гидрофобности. Однако влияние пористости структуры минерализаторов – удельной поверхности, объёма пор, распределения пор по размерам – на пожарно-технические характеристики ВМП на данный момент ещё мало изучены.

Между тем пористость минерализатора

может оказывать принципиальное влияние на механизм его взаимодействия с компонентами пенного раствора. Высокоразвитая пористая структура (удельная поверхность $>500 \text{ m}^2/\text{g}$) способна адсорбировать значительное количество молекул поверхностно-активного вещества (ПАВ) на внутренней поверхности пор, тем самым обедняя межфазную границу «вода–воздух» и ускоряя процесс разрушения пены. С другой стороны, умеренная мезопористость (размер пор 2–50 нм) в сочетании с гидрофильной поверхностью может обеспечить удержание воды, используя механизм капиллярной конденсации, замедляя дренаж и повышая стабильность пенной плёнки.

Исходя из анализа литературных данных и результатов предшествующих исследований, в настоящей работе выдвигается следующая научная гипотеза: при равном гидрофильном характере поверхности пожарно-технические характеристики ВМП определяются пористой структурой минерализатора, причём оптимальные показатели (минимальное время тушения, максимальная устойчивость, отсутствие повторного воспламенения) достигаются при использовании минерализаторов с умеренной мезопористостью (удельная поверхность 300–800 m^2/g), а чрезмерно развитая пористость ($>1000 \text{ m}^2/\text{g}$) оказывает негативное влияние вследствие конкурентной адсорбции ПАВ [1, 2].

Для проверки данной гипотезы были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Провести сравнительное экспериментальное исследование четырёх минерализаторов с удельной поверхностью, различающейся на четыре порядка (от $\sim 0,15 \text{ m}^2/\text{g}$ до $>1200 \text{ m}^2/\text{g}$), в единых условиях эксперимента;
2. Установить количественные зависимости кратности пены, времени жизни, времени тушения и расхода ОТВ от концентрации минерализатора и времени ЭФО для каждого типа минерализатора;
3. Выявить механизм влияния порис-

тости на стабильность и огнетушащую способность ВМП;

4. Определить оптимальный диапазон пористости минерализатора для достижения наилучших пожарно-технических характеристик.

Методы исследования

В качестве минерализаторов были выбраны четыре вещества, обладающие принципиально различными параметрами пористой структуры и характером смачиваемости поверхности.

Маршалит (SiO_2) – пылевидный природный кварц (ГОСТ 9077-82 «Кварц молотый пылевидный. Общие технические условия»), содержание SiO_2 не менее 98 %. Удельная поверхность составляет 0,11–0,15 $\text{м}^2/\text{г}$, материал практически непористый. Размер частиц 20–50 нм. Поверхность гидрофильна за счёт силанольных групп ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$). Выбран как модельный непористый гидрофильный минерализатор.

Силикагель марки КСМГ – аморфный диоксид кремния $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (ГОСТ 3956-76 Силикагель технический. Технические условия), фракция 20–50 нм. Удельная поверхность 650–800 $\text{м}^2/\text{г}$, объём пор 0,35–0,45 мл/г, средний диаметр пор 2,0–3,0 нм (мезопористая структура). Поверхность гидрофильна за счёт силанольных

групп. Выбран для оценки влияния умеренной мезопористости при той же химической природе поверхности (SiO_2), что и у маршалита. [3].

Активированный уголь марки ОУ-А – углеродный сорбент из древесины берёзы (ГОСТ 4453-74 «Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия»), фракция 20–50 нм. Удельная поверхность более 1200 $\text{м}^2/\text{г}$, развита система макро-, мезо- и микропор. Поверхность преимущественно гидрофобна. Выбран как модельный объект с максимальной пористостью и гидрофобной поверхностью. [4].

Активированный уголь марки ОУ-Б – углеродный сорбент, изготавливаемый по аналогичной ОУ-А технологии, но с дополнительной стадией кислотного выщелачивания (рН среды обработки – кислый). Удельная поверхность ОУ-Б составляет не менее 850 $\text{м}^2/\text{г}$. Кислотная обработка приводит к функционализации поверхности кислородсодержащими группами (карбокислыми, гидрокислыми, лактонными), что изменяет характер смачиваемости с гидрофобного на гидрофильный. Таким образом, ОУ-Б представляет собой высокопористый гидрофильный минерализатор, что позволяет разделить эффекты пористости и смачиваемости [2, 5, 6].

Сводная характеристика минерализаторов представлена в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики исследованных минерализаторов

№ п/п	параметр	маршалит (SiO_2)	силикагель КСМГ	ОУ-Б	ОУ-А
1.	химический состав	$\geq 98\% \text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	С (берёза, кисл. обраб.)	С (берёза)
2.	удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	~0,15	650–800	≥ 850	>1200
3.	объём пор, мл/г	~0 (не пористый)	0,35-0,45	0,4-0,8	0,6-1,2
4.	средний диаметр пор, нм	–	2,0-3,0	2-100	1-100
5.	тип пористости	непористый	мезопористый	макро-мезопористый	макро-мезо-микропористый
6.	характер поверхности	гидрофильный	гидрофильный	гидрофильный	гидрофобный

В качестве базового пенного раствора использовалась смесь дистиллированной воды с пенообразователем ПО-6 в концентрации 6 %. Минерализаторы вводились в раствор в четырёх концентрациях: 0,5, 1,0, 2,0 и 3,0 % масс. Диспергирование частиц осуществлялось при помощи ультразвукового диспергатора (частота 22 кГц, мощность 100 Вт, время обработки 10 мин) для обеспечения равномерного распределения минерализатора в объёме раствора [7].

Перед введением пенообразователя и минерализатора дистиллированная вода подвергалась электрофизической обработке переменным частотно-модулируемым сигналом (ПЧМС) при напряжении 18 кВ. Время обработки ЭФО варьировалось: 0 с (контроль), 900 с, 1800 с и 3600 с. ЭФО оказывает влияние на кластерную структуру водной среды, снижая поверхностное натяжение и улучшая смачивающие свойства.

Генерацию воздушно-механической пены осуществляли механическим способом с использованием ручного помпового пеногенератора, установленного на лабораторном испытательном стенде. Стенд представлял собой вертикальную конструкцию высотой 0,75 м с направляющим отверстием диаметром 35 мм в верхней части, обеспечивающим стабильную вертикальную подачу пены в зону эксперимента. Воспроизводимость условий пенообразования обеспечивалась постоянством геометрии установки, одинаковым способом подачи раствора, неизменной высотой подачи пены и единым порядком выполнения опытов. Кратность пены определялась в соответствии с ГОСТ Р 50558-2012, как отношение объема полученной пены к объему раствора пенообразователя, израсходованного на её получение.

Тушение проводилось на модельных очагах класса В (горение жидких горючих веществ). В качестве горючей жидкости использовался н-гептан (C_7H_{16}). В качестве модельного очага использовали цилиндрический стальной противень внутренним диаметром 280 мм и высотой 100 мм. В противень заливали н-гептан слоем высотой 20 ± 1 мм. Предварительный прогрев горючей жидкости до начала устойчивого горения составлял 60 с, после чего осуществлялась подача пены. Каждый опыт повторялся не менее трёх раз для обеспечения статистической достоверности результатов [8, 9].

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с использо-

ванием стандартных методов математической статистики. Для каждого измеряемого параметра определялось среднее арифметическое значение по трём параллельным измерениям. Доверительный интервал рассчитывался при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Относительная погрешность измерений не превышала 5 %.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве контрольного эксперимента было проведено тушение модельного очага класса В воздушно-механической пеной на основе раствора ПО-6 (6 %) без введения минерализатора. Результаты представлены в табл. 2. Расход огнетушащего вещества принимался по раствору.

Из табл. 2 следует, что увеличение продолжительности ЭФО приводит к росту кратности пены (с 3,2 до 4,2), что объясняется снижением поверхностного натяжения воды и облегчением формирования пузырьков. Вместе с тем наблюдается снижение времени жизни (с 4700 до 3500 с), обусловленное увеличением дисперсности пузырьков и ускорением диффузионного переноса газа (остальдово созревание). Время тушения составляет 5,6–6,2 с, что является базовым показателем для последующего сравнения.

Результаты экспериментов с введением маршалита представлены в табл. 3.

Таблица 2. Пожарно-технические характеристики ВМП базового состава ($H_2O + PO-6$ 6 %)

№ п/п	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0	3,2	4700	6,2	0,10	нет
2.	900	3,4	4130	5,6	0,12	нет
3.	1800	3,7	4130	5,7	0,14	нет
4.	3600	4,2	3500	5,9	0,15	нет

Таблица 3. Пожарно-технические характеристики ВМП с добавлением маршалита (SiO_2)

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0,5	0	3,6	4960	5,0	0,11	нет
2.	0,5	900	3,9	4530	5,0	0,12	нет
3.	0,5	1800	4,0	4580	5,0	0,14	нет
4.	0,5	3600	4,5	3780	5,4	0,17	нет
5.	1,0	0	3,9	5640	4,5	0,13	нет
6.	1,0	900	4,2	4920	4,4	0,14	нет
7.	1,0	1800	4,3	4860	4,0	0,16	нет
8.	1,0	3600	4,9	4390	4,2	0,19	нет
9.	2,0	0	4,8	6100	3,5	0,15	нет
10.	2,0	900	5,2	6220	3,4	0,17	нет

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
11.	2,0	1800	5,1	5500	3,1	0,18	нет
12.	2,0	3600	5,8	4920	3,6	0,22	нет
13.	3,0	0	5,1	7230	3,6	0,18	нет
14.	3,0	900	5,3	7170	4,0	0,19	нет
15.	3,0	1800	5,6	6680	4,0	0,24	нет
16.	3,0	3600	6,6	5510	3,9	0,27	нет

Введение маршалита оказывает положительное влияние на все исследованные параметры воздушно-механической пены. Время жизни увеличивается до 7230 с (3,0% без ЭФО), что на 54% выше контрольного образца, за счёт формирования армированного каркаса из частиц SiO₂ на межфазной границе. При концентрации 3,0 % наблюдается эффект насыщения – время тушения возрастает до 3,6 с по сравнению с 3,5 с при 2,0 %. Оптимальная концентрация маршалита составляет 2,0% масс. при ЭФО 1800 с (время тушения 3,1 с, время жизни 5500 с).

Результаты экспериментов с введением мезопористого гидрофильного силикагеля КСМГ представлены в табл. 4.

Силикагель КСМГ обеспечивает кратность выше, чем у маршалита, при всех исследованных концентрациях благодаря интенсивной нуклеации пузырьков на развитой мезопористой поверхности. Время жизни пены (5780 с при 2,0 % без ЭФО) ниже, чем у маршалита

(6100 с), но существенно превышает контрольный образец (4700 с). Снижение объясняется частичной адсорбцией молекул ПАВ в мезопорах, однако этот эффект умерен, поскольку размер пор (2–3 нм) недостаточен для полного поглощения мицелл ПАВ. Силикагель КСМГ при концентрации 2,0 % обеспечивает минимальное время тушения: 3,2 с без ЭФО и 2,9 с при ЭФО 1800 с. Превосходство обусловлено синергией структурного армирования пенной плёнки и резервуарного удержания воды в мезопорах по механизму капиллярной конденсации. При 3,0 % наблюдается насыщение (время тушения 3,4 с). Оптимальный режим – 2,0 % масс., ЭФО 1800 с (время тушения 2,9 с, время жизни 5280 с, расход ОТВ 0,24 л).

Результаты экспериментов с введением высокопористого гидрофильного активированного угля ОУ-Б представлены в табл. 5.

Таблица 4. Пожарно-технические характеристики ВМП с добавлением силикагеля КСМГ

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0,5	0	3,9	4780	4,8	0,12	нет
2.	0,5	900	4,0	4540	4,7	0,14	нет
3.	0,5	1800	4,3	4410	4,6	0,15	нет
4.	0,5	3600	4,8	3890	5,0	0,19	нет
5.	1,0	0	4,4	5310	4,2	0,16	нет
6.	1,0	900	4,7	5080	4,0	0,17	нет
7.	1,0	1800	4,9	4870	3,8	0,19	нет
8.	1,0	3600	5,5	4220	4,1	0,23	нет
9.	2,0	0	5,6	5780	3,2	0,19	нет
10.	2,0	900	6,0	5610	3,1	0,22	нет
11.	2,0	1800	6,1	5280	2,9	0,24	нет
12.	2,0	3600	6,9	4650	3,3	0,30	нет
13.	3,0	0	6,3	5440	3,4	0,23	нет
14.	3,0	900	6,7	5280	3,5	0,27	нет
15.	3,0	1800	7,1	4910	3,3	0,31	нет
16.	3,0	3600	7,9	4280	3,6	0,38	нет

Таблица 5. Пожарно-технические характеристики ВМП с добавлением ОУ-Б

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0,5	0	4,1	4290	5,6	0,15	нет
2.	0,5	900	4,2	4180	5,9	0,17	нет
3.	0,5	1800	4,5	4050	6,0	0,19	нет
4.	0,5	3600	5,2	3690	5,5	0,25	нет
5.	1,0	0	5,0	4560	5,1	0,20	нет
6.	1,0	900	5,1	4420	4,9	0,22	нет
7.	1,0	1800	5,4	4090	5,2	0,24	нет
8.	1,0	3600	6,2	3500	5,3	0,31	нет
9.	2,0	0	6,9	4450	4,2	0,28	нет
10.	2,0	900	7,1	4110	4,3	0,36	нет
11.	2,0	1800	7,4	4110	4,2	0,39	нет
12.	2,0	3600	8,4	3510	3,9	0,51	нет
13.	3,0	0	8,5	4100	4,1	0,39	нет
14.	3,0	900	8,9	4000	4,5	0,48	нет
15.	3,0	1800	9,4	3490	4,0	0,55	нет
16.	3,0	3600	10,3	3080	4,0	0,65	нет

Активированный уголь ОУ-Б обеспечивает наивысшую кратность пены – до 10,33 (3,0 %, ЭФО 3600 с), что обусловлено множественными центрами нуклеации на развитой системе макро- и мезопор при гидрофильной поверхности. Вместе с тем время жизни пены с ОУ-Б существенно уступает маршалиту и силикагелю: максимальное значение 4560 с (1,0 % без ЭФО), а при 3,0 % и ЭФО 3600 с снижается до 3080 с – ниже контроля. Время тушения 4,2 с

(2,0 % без ЭФО) хуже, чем у маршалита (3,5 с) и силикагеля (3,2 с), при существенно более высоком расходе ОТВ (0,28 л). Высокая пористость, даже при гидрофильной поверхности, приводит к значительной адсорбции ПАВ в порах и снижает удельную эффективность пены.

Результаты экспериментов с введением высокопористого гидрофобного активированного угля ОУ-А представлены в табл. 6.

Таблица 6. Пожарно-технические характеристики ВМП с добавлением ОУ-А

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0,5	0	3,3	2730	10,2	0,26	нет
2.	0,5	900	3,4	2520	11,0	0,32	нет
3.	0,5	1800	3,7	2420	10,1	0,37	нет
4.	0,5	3600	4,1	2170	11,4	0,44	нет
5.	1,0	0	3,2	1890	13,9	0,43	нет
6.	1,0	900	3,3	1870	14,7	0,52	нет
7.	1,0	1800	3,7	1790	15,1	0,61	нет
8.	1,0	3600	3,9	1690	15,1	0,69	нет
9.	2,0	0	3,2	1190	24,5	0,84	да
10.	2,0	900	3,4	1170	25,8	0,93	да
11.	2,0	1800	3,6	1170	23,8	0,98	да
12.	2,0	3600	3,8	1140	26,2	1,34	да
13.	3,0	0	2,7	1180	35,8	1,22	да
14.	3,0	900	2,9	1170	39,3	1,42	да
15.	3,0	1800	3,2	1170	36,2	1,75	да
16.	3,0	3600	3,6	1140	37,7	1,97	да

Активированный уголь ОУ-А оказывает наиболее деструктивное воздействие на пенную структуру. Кратность при 3,0 % без ЭФО составляет 2,7 – ниже контрольного образца (3,2), поскольку гидрофобные частицы не способны стабилизировать межфазную границу. При концентрациях $\geq 2,0$ % время жизни пены снижается до 1140–1190 с, что обусловлено интенсивной адсорбцией ПАВ в развитой системе микро- и мезопор гидрофобного сорбента. При данных концентрациях во всех опытах зафиксировано повторное воспламенение вследствие отсутствия устойчивого изолирующего слоя пены на поверхности горючей жидкости.

На основании полученных экспериментальных данных можно сформулировать следующий механизм влияния пористости минерализаторов на пожарно-технические характеристики ВМП.

При введении минерализатора в пенный раствор происходят конкурирующие процессы:

1. Адсорбция частиц на межфазной границе «вода–воздух» – гидрофильные частицы закрепляются на поверхности пенных плёнок, формируя армированный каркас, повышающий механическую прочность пены и замедляющий дренаж (механизм Пикеринга).

2. Адсорбция молекул ПАВ на поверхности и в порах минерализатора – молекулы пенообразователя переносятся из раствора на поверхность и во внутренний объём пор минерализатора, что снижает концентрацию ПАВ на межфазной границе и ослабляет стабилизирующий эффект пенообразователя.

3. Удержание воды в порах – мезопористые минерализаторы способны удерживать воду по механизму капиллярной конденсации, что замедляет дренаж, но одновременно увеличивает расход ОТВ.

Соотношение этих процессов определяется удельной поверхностью и характером поверхности минерализатора:

- Непористый гидрофильный (маршалит): доминирует процесс (1), процесс (2) минимален из-за малой удельной поверхности. Результат – максимальная устойчивость пены.

- Мезопористый гидрофильный (силикагель КСМГ): процессы (1) и (3) выражены, процесс (2) умерен – мезопоры (2–3 нм) слишком малы для эффективной адсорбции мицелл ПАВ, но достаточны для капиллярного удержания воды. Результат – оптимальный баланс устойчивости и огнетушащей эффективности.

- Высокопористый гидрофильный (ОУ-Б): процессы (1) и (3) выражены, но процесс (2) усилен – широкий диапазон пор (от микро- до макро-) обеспечивает адсорбцию ПАВ

различного размера. Результат – высокая кратность, но сниженная устойчивость и повышенный расход ОТВ.

- Высокопористый гидрофобный (ОУ-А): процесс (1) отсутствует (частицы не закрепляются на межфазной границе), процесс (2) максимален (гидрофобная поверхность дополнительно усиливает адсорбцию ПАВ). Результат – катастрофическое разрушение пены, повторное воспламенение.

Полученные экспериментальные результаты полностью подтверждают выдвинутую научную гипотезу. Действительно, при равном гидрофильном характере поверхности (маршалит, силикагель, ОУ-Б) пожарно-технические характеристики ВМП определяются пористой структурой минерализатора. Оптимальные показатели достигаются при использовании силикагеля КСМГ с удельной поверхностью 650–800 м²/г (мезопористый минерализатор), а чрезмерно развитая пористость (ОУ-Б, ≥ 850 м²/г; ОУ-А, > 1200 м²/г) приводит к ухудшению пожарно-технических характеристик вследствие конкурентной адсорбции ПАВ.

Результаты позволяют обосновать критерий выбора оптимального минерализатора для ВМП: сочетание умеренной мезопористости (удельная поверхность 300–800 м²/г, средний диаметр пор 2–5 нм) с гидрофильным характером поверхности обеспечивает наилучшие пожарно-технические характеристики за счёт баланса между:

- структурным армированием пенной плёнки (высокая устойчивость);

- удержанием воды в мезопорах по механизму капиллярной конденсации (дополнительное охлаждение);

- умеренной адсорбцией ПАВ, не нарушающей стабильность межфазного слоя.

Выводы

1. В работе проведено систематическое сравнительное экспериментальное исследование влияния пористой структуры минерализаторов (маршалит SiO₂, силикагель КСМГ, активированный уголь ОУ-Б, активированный уголь ОУ-А) с удельной поверхностью от ~0,15 до > 1200 м²/г на пожарно-технические характеристики ВМП при тушении модельных очагов класса В в единых условиях эксперимента.

2. Непористый гидрофильный маршалит (SiO₂, ~0,15 м²/г) обеспечивает максимальное время жизни пены – 7230 с (3,0 % масс., рост на 54 %) за счёт формирования армированного каркаса без конкурентной адсорбции ПАВ.

3. Мезопористый гидрофильный силикагель КСМГ (650–800 м²/г) обеспечивает

оптимальный баланс характеристик: минимальное время тушения 2,9 с (2,0 % масс., ЭФО 1800 с, снижение на 53 %), время жизни 5280 с, расход ОТВ 0,24 л.

4. Высокопористый гидрофильный ОУ-Б (≥ 850 м²/г) даёт наивысшую кратность (10,33 при 3,0 %), но снижает время жизни и повышает расход ОТВ из-за избыточной адсорбции ПАВ.

5. Высокопористый гидрофобный ОУ-А (> 1200 м²/г) при $\geq 2,0$ % снижает время жизни до 1400–1900 с и приводит к повторному воспламенению вследствие интенсивной адсорбции ПАВ и разрушения пенной плёнки.

6. Выявлен механизм влияния пористости: при введении минерализатора в пенный раствор конкурируют процессы армирования межфазной границы (повышение устойчивости), адсорбции ПАВ в порах (снижение устойчивости) и капиллярного удержания воды (дополнительное охлаждение). Баланс этих процессов определяется удельной поверхностью и

характером смачиваемости минерализатора.

7. Сформулирован критерий выбора оптимального минерализатора для ВМП: сочетание умеренной мезопористости (удельная поверхность 300–800 м²/г, средний диаметр пор 2–5 нм) с гидрофильным характером поверхности обеспечивает наилучшие пожарно-технические характеристики за счёт синергетического эффекта структурного армирования и резервуарного удержания воды.

Результаты открывают перспективы для дальнейшего совершенствования технологий пенного пожаротушения и могут быть положены в основу разработки нормативных требований к составу минерализованных огнетушащих пен нового поколения, а также рекомендаций по выбору минерализаторов для применения в экстремальных условиях (арктический климат, пожары литий-ионных аккумуляторов, пожары в местах разлива нефтепродуктов и др.).

Список литературы

1. Макаров В. Г. Взрывы и пожары на танкерах в результате возникновения статического электричества // Записки горного института. 2008. Том 176. С. 95–101.

2. Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средств их тушения: справочник. Под редакцией коллектива авторов, включая А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук. Том 1. М.: Химия, 1990, 496 с.

3. Техносферная безопасность. Организация пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ: учебное пособие / А. П. Решетов, В. В. Ключ, С. А. Турсенев [и др.]. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, 2023. 112 с. EDN: QVQSQZ.

4. Арзаев Н. А., Ивахнюк Г. К. Влияние реагентной и безреагентной модификации дисперсной среды и химических свойств поверхности минерализаторов на пожарно-технические характеристики воздушно-механических пен // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2025. № 4. С. 14–22. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-4-14-22.

5. Волик А. С., Квашнин А. В., Ивахнюк Г. К. Влияние электрического поля на огнетушащие свойства воздушно-механической пены // Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 3 (55). С. 103–107. EDN: BZSSAC.

6. Алексеик Е. Б., Савенкова А. Е., Геммиш З. Влияние переменных электрических

полей на процессы создания и стабилизации воздушно-механических пен // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2013. № 4. С. 44–48. EDN: RSMACZ.

7. Любимов Е. В., Микушов А. В., Орлов Г. В. Опасности, возникающие при тушении судовых пожаров водой в Арктике // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2015. № 1. С. 47–52.

8. Патент на полезную модель № 194307 Российская Федерация МПК А 62 С 8/06 (2006.01), А 62 С 3/06 (2006.01), А 62 С 3/07 (2006.01). Огнегасительная базальтовая сетка / Г. К. Ивахнюк, С. А. Головин, Ю. Ю. Осмонов [и др.]; опубл. 05.12.2019, Бюл. № 34.

9. Патент на полезную модель № 217399 Российская Федерация МПК А 62 С 3/07 (2006.01), А 62 С 37/40 (2006.01), А 62 С 37/46 (2006.01). Средство тушения пожаров на автостоянках закрытого типа на основе базальтового полотна / Г. К. Ивахнюк, А. Б. Акимова, А. С. Константинова [и др.]; опубл. 30.03.2023, Бюл. № 10.

References

1. Makarov V. G. Vzryvy i pozhary na tankerakh vsledstvie sticheseskogo elektrichestva [Explosions and fires on tankers as a result of static electricity]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2008, vol. 176, pp. 95–101.

2. *Pozharovzryvoopasnist veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing agents: handbook] / Pod redaktsiyey kollektiva avtorov, vklyuchaya A. N. Baratov, A. Ya. Korol'chenko, G. N. Kravchuk [et al.]. Moscow: Khimiya, 1990, vol. 1, 496 p.

3. *Tekhnosfernaya bezopasnost. Organizatsiya tusheniya pozharov i provedeniya avariinospasatelnykh rabot: uchebnoye posobiye* [Technosphere safety. Organization of fire fighting and rescue operations: tutorial] / A. P. Reshetov, V. V. Klyuj, S. A. Tursenev [et al.]. SPb.: Sankt-Peterburgskiy universitet GPS MChS Rossii imeni Geroya Rossiyskoy Federatsii generala armii Ye. N. Zinicheva, 2023. 112 p.

4. Arzaev N. A., Ivakhnyuk G. K. Vliyanie reagentnoy i nereagentnoy modifikatsii dispersnoy sredy i khimicheskikh svoystv poverkhnosti mineralizatorov na pozharo-tekhnicheskie kharakteristiki vozdušno-mekhanicheskikh pen [The influence of reagent and non-reagent modification of a dispersed medium and chemical properties of the surface of mineralizers on the fire-technical characteristics of air-mechanical foams]. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii»*, 2025, issue 4, pp. 14–22. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-4-14-22.

5. Volik A. S., Kvashnin A. V., Ivakhnyuk G. K. Vliyanie elektricheskogo polya na ognetushashchie svoystva vozdušno-mekhanicheskoy peny [The influence of an electric field on the extinguishing properties of air-mechanical foam].

Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere, 2020, vol. 3 (55), pp. 103–107.

6. Alekseik E. B., Savenkova A. E., Gemish Z. Vliyanie peremennykh elektricheskikh poley na protsessy sozdaniya i stabilizatsii vozdušno-mekhanicheskikh pen [The influence of alternating electric fields on the processes of creating and stabilizing air-mechanical foams]. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii»*, 2013, issue 4, pp. 44–48.

7. Lyubimov E. V., Mikushov A. V., Orlov G. V. Opasnosti, vznikayushchie pri tushenii korabelnykh pozharov vodoy v Arktike [Hazards arising from extinguishing ship fires with water in the Arctic]. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii»*, 2015, issue 1, pp. 47–52.

8. G. K. Ivakhnyuk, S. A. Golovin, Yu. Yu. Osmonov [et al.]. Ognetushashchaya bazaltovaya setka [Fire extinguishing basalt mesh]. Patent poleznoy modeli № 194307 Rossiyskaya Federatsiya IPC A 62 C 8/06 (2006.01), A 62 C 3/06 (2006.01), A 62 C 3/07 (2006.01)., opubl. 05.12.2019, Byul. № 34.

9. G. K. Ivakhnyuk, A. B. Akimova, A. S. Konstantinova [et al.]. Ognetushashchee sredstvo v zakrytykh parkovkakh na osnove bazaltovoy tkani [A fire extinguishing agent in closed parking lots based on basalt fabric]. Patent poleznoy modeli № 217399 Rossiyskaya Federatsiya IPC A 62 C 3/07 (2006.01), A 62 C 37/40 (2006.01), A 62 C 37/46 (2006.01), opubl. 30.03.2023, Byul. № 10.

Арзаев Никита Анатольевич

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

адъюнкт, преподаватель кафедры ПБТПиП

E-mail: n.arzaef@yandex.ru

ORCID: 0009-0004-9179-5087

SPIN: 5765-9936

Arzaev Nikita Anatolyevich

Saint Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

Russian Federation, Saint Petersburg

adjunct, lecturer

E-mail: n.arzaef@yandex.ru

ORCID: 0009-0004-9179-5087

SPIN: 5765-9936

Ивахнюк Григорий Константинович

Санкт-Петербургский государственный технологический институт,

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

Доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерной защиты окружающей среды»

E-mail: fireside@inbox.ru

SPIN: 1985-9518

Author ID: 521920

ORCID: 0000-0003-2556-303X

Ivakhnyuk Grigory Konstantinovich

Saint Petersburg State Technological Institute,

Russian Federation, Saint Petersburg

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Protection Engineering

E-mail: fireside@inbox.ru

SPIN: 1985-9518

Author ID: 521920

ORCID: 0000-0003-2556-303X

УДК 630*432

DOI 10.48612/ntp/8pnf-2zdf-72v2

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ КРУПНЫХ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

С. П. КАРПАЧЕВ, С. В. ФРОЛОВ, Д. В. ФРОЛОВ, Е. Ю. ШУЛЯК

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: karpachevs@mail.ru,

Рассмотрены вопросы количественной оценки крупных лесных горючих материалов в виде лежащих на земле стволов древесины естественного отпада и их частей. Представлена математическая модель метода оценки запаса древесины отпада по промерным линиям отбора. Получены формулы для определения числа промерных линий в зависимости от запаса древесины отпада на участке и показателя точности. Предложена цифровая модель и комплекс компьютерных программ для моделирования процедуры оценки древесины отпада. Ошибка оценки запаса древесины отпада по результатам имитационного моделирования и по теоретическим формулам не превысила 1,5 %. Рекомендовано проводить оценку запаса крупных лесных горючих материалов по 70 линиям отбора.

Ключевые слова: лесные горючие материалы, древесина естественного отпада, метод линейных пересечений, цифровое моделирование.

DIGITAL MODELING FOR ASSESSING FOREST COMBUSTIBLE MATERIALS

S. P. KARPACHEV, S. V. FROLOV, D. V. FROLOV, E. YU. SHULYAK

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow
E-mail: karpachevs@mail.ru

The issues of quantitative assessment of large forest combustible materials in the form of lying on the ground trunks of dead wood of natural fall and their parts are considered. A mathematical model of the method of assessment of the stock of dead wood by sampling lines is presented. Formulas are obtained for determining the number of sampling lines depending on the stock of dead wood on the site and the accuracy indicator. A digital model and a complex of computer programs for modeling the procedure of assessment of dead wood are proposed. The error in estimating the stock of dead wood by simulation modeling and theoretical formulas did not exceed 1.5 %. It is recommended to estimate the stock of forest combustible materials using 70 sampling lines.

Keywords: forest combustible materials, dead wood, linear intersection method, digital modeling.

Введение

ГОСТ Р 70861-2023 определяет лесной горючий материал как растительный горючий материал в лесном биогеоценозе. Лесной горючий материал по степени горимости делят на проводников горения, поддерживающих горение и не поддерживающих горение. Проводники горения способны активно гореть и играют главную роль в возникновении лесных пожаров [1]. Проводники горения, в зависимости от степени горимости и их роли в возникновении пожаров, можно классифицировать по группам [2, 3, 4]. Наиболее пожароопасны (I группа) мелкие лесные горючие материалы, образующие сплошной слой растительного материала – опад, мхи,

лишайники [5]. Крупные лесные горючие материалы, такие как сухостойные деревья, валежник, ветровальные и снеговальные деревья, крупные сучья, порубочные остатки также относящиеся к проводникам горения (III группа пожарной опасности). Большею частью это древесина естественного отпада, лежащая на земле. Обычно древесина естественного отпада в виде валежника и крупных сучьев не образует сплошного слоя и в здоровом лесу их объем не превышает 10–15 м³/га. Однако при захлавлении 20–50 м³/га и более (рис. 1), древесина отпада становится опасным проводником горения. Мертвая древесина естественного отпада, пролежавшая 2–3 года, в сухой сезон особенно

пожароопасна. Она вызывает пламенное горение, создающее низовые пожары, которые сложны для тушения [6].

Природная опасность возникновения лесных пожаров напрямую зависит от накопленного объема древесины естественного отпада. Для планирования и проведения противопожарного обустройства леса важно знать

количественные и качественные характеристики этой древесины, например, запас, состояние древесины, процент влажности и т.п. [7]. В настоящей статье рассматриваются вопросы количественной оценки древесины естественного отпада в виде стволов и их частей. Далее – ДЕО.



Рис. 1. Пример скопления крупных горючих лесных материалов. Тверская область. Фото автора

Метод оценки запаса ДЕО

В статье для оценки запаса ДЕО рассматривается метод линейных пересечений [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Метод линейных пересечений – это статистический метод, который позволяет по выборке из некоторого количества стволов древесины естественного отпада сделать вывод об объемах и качестве всей ДЕО на участке леса. Отличительная особенность метода заключается в способе формирования статистической выборки древесины отпада. Выборка производится на пробном участке леса. Участок разбивают несколькими отрезками прямых линий одинаковой длины (далее – промерные линии), точки начала и конца которых на практике обозначают вешками. Для удобства проведения полевых измерений и последующих вычис-

лений, на практике пробный участок леса лучше разбивать в виде полос одинаковой ширины близкими по форме к прямоугольной. В этом случае промерные линии должны пересекать всю ширину участка. При этом промерные линии нужно ориентировать нормально к оси участка, как показано на рис. 2. Все стволы ДЕО, пересекающие промерные линии, учитываются. По учтенным стволам, как по статистической выборке, дается оценка всему скоплению ДЕО.

В теоретических исследованиях рассматривался 2D-плоский участок леса прямоугольной формы размером $L \times B$ в координатах X - Y , который пересекает промерная линия (рис. 2). Ствол ДЕО на рис. 2 представлен отрезком прямой линии длиной l .

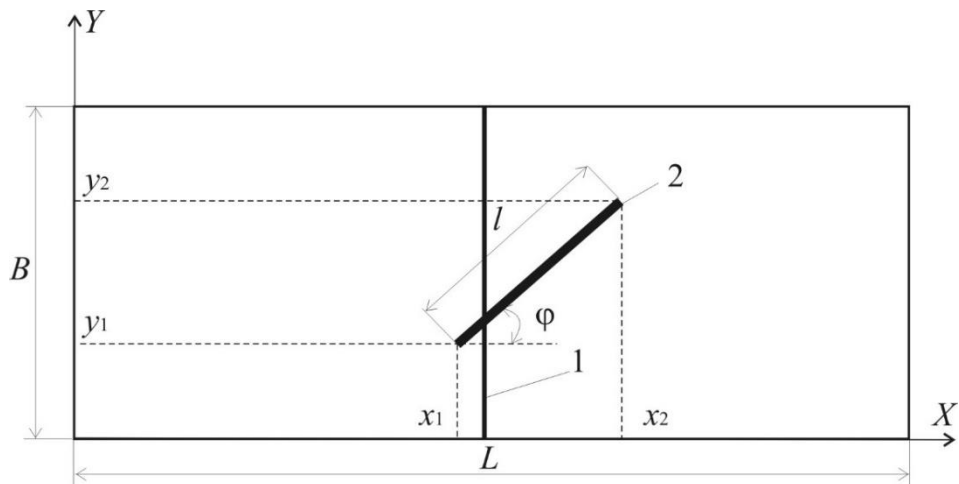


Рис. 2. 2D-схема модельного пробного участка леса.
На рисунке обозначено: 1 – промерная линия, 2 – ствол ДЕО в виде отрезка прямой

В общем случае вероятность пересечения ствола ДЕО промерной линией будет зависеть от длины участка L , длины ствола l и угла ориентации φ :

$$p = \frac{l}{L} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\varphi \cdot f(\varphi) \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где φ – угол ориентации ствола ДЕО относительно оси OX участка;

$f(\varphi)$ – плотность распределения угла ориентации ствола ДЕО относительно оси OX участка.

В настоящей статье будем рассматривать случай равномерного закона распределения угла ориентации стволов ДЕО относительно оси OX . Такое распределение характерно для обследованных участков реального леса [14].

Тогда формула (1) преобразуется к виду [14]:

$$p = \frac{2l}{\pi L}. \quad (2)$$

Если на пробном участке находится N стволов ДЕО, то математическое ожидание, что ровно m стволов пересекнутся с промерной линией, определится по формуле:

$$M[m] = p \cdot N. \quad (3)$$

Дисперсия числа пересечений стволов ДЕО с промерной линией, определяемая как

$$D[m] = \sum_{m=0}^N (m - M[m])^2 \cdot p(m), \text{ будет равна:}$$

$$D[m] = p \cdot (1 - p) \cdot N. \quad (4)$$

Потребное число промерных линий n , необходимых для оценки количества стволов ДЕО на пробном участке леса можно определить по известной из математической статистики формуле [15]:

$$n = \left[\frac{V \cdot t}{P} \right]^2, \quad (5)$$

где V – коэффициент изменчивости, %;
 P – показатель точности, %;
 t – показатель достоверности.

На практике число стволов на участке можно определить через запас ДЕО:

$$N = N_s \cdot S \quad (6)$$

где N_s – запас стволов ДЕО на 1 га лесного участка;
 S – площадь участка леса, га.

По формуле (5) было определено потребное число промерных линий для разного запаса стволов ДЕО на участке, разных значений показателей точности P и показателя достоверности для уровня значимости $\alpha=0,05$. Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица. Число промерных линий

Запас стволов ДЕО, шт./га	Потребное число промерных линий для показателя точности P :	
	5 %	20 %
20	1129	71
40	565	35
60	376	24
80	282	18
100	226	14

Потребное число промерных линий (табл.) зависит от количества стволов ДЕО на пробном участке леса и принятого показателя точности. Например, при относительно небольшом запасе ДЕО на участке леса, равном $N_s = 20$ шт./га, для показателя точности $P = 5\%$ потребуется 1129 промерных линий отбора, а для $P = 20\%$, только 71 промерная линия. Для практических целей оценки пожароопасности леса, точность $P = 5\%$ представляется избыточной. Однако, при $P = 20\%$, результаты, полученные по 71 промерной линии, могут значительно отклоняться от истинного значения запаса ДЕО на участке.

Цель цифрового моделирования – установить отклонение значений в оценке количества стволов ДЕО на пробном участке леса методом линейных пересечений по промерным линиям, число которых определялось для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и показателей точности $P = 5\%$ и $P = 20\%$.

Методика исследований

Для достижения поставленной цели, с использованием математического аппарата теории метода линейных пересечений, была разработана математическая модель и комплекс компьютерных программ, которые имитировали процесс оценки количества стволов ДЕО по промерным линиям на пробном участке заданных размеров.

Компьютерные программы были написаны на языке Python с подключением библиотек NumPy и Matplotlib.

Пробный участок имел размеры 100×100 м. Программа позволяла назначать любые длины стволам ДЕО. В экспериментах все стволы были приняты длиной $l = 10$ м. При этом соблюдалось условие $l < L/2$.

После запуска, программа в пределах пробного участка генерировала заданное количество стволов ДЕО. Положение каждого ствола ДЕО определялось его углом ориентации и координатами.

Угол φ_i ориентации ствола ДЕО относительно оси OX был задан на интервале $[-\pi/2, +\pi/2]$ равномерным распределением.

Координаты начала ствола ДЕО на участке задавали по равномерному закону на интервалах $x_{1i} = [0, L]$ и $y_{1i} = [0, B]$.

Координаты конца каждого i -ого ствола ДЕО x_{2i}, y_{2i} вычисляли с учетом угла ориентации ствола и его длины:

$$x_{2i} = l + x_{1i} \cdot \cos \varphi_i, \text{ м} \quad (7)$$

$$y_{2i} = l + y_{1i} \cdot \sin \varphi_i, \text{ м} \quad (8)$$

Затем, на пробный участок, как показано на рис. 2 накладывалась промерная линия. Учитывались все стволы ДЕО, которые пересекли промерную линию. Для получения статистически значимых результатов программа позволяла генерировать любое количество пробных участков для опытов с ними.

В каждом последующем опытным прогоне модели, программа генерировала новый запас ДЕО на пробном участке, и процедура учета повторялась. Поскольку каждый прогон модели проводился с одной промерной линией, то число прогонов соответствовало числу промерных линий.

Программа позволяла генерировать любое количество стволов ДЕО с необходимым набором их характеристик. В программе для этого был создан тензор, состоящий из двумерных матриц, строки которых были равны запасу ДЕО на участке, а столбцы – характеристики каждого ствола ДЕО. Глубина тензора или число матриц было равно числу прогонов модели n . Таким образом, тензор хранил всю информацию о стволах ДЕО за все прогоны модели.

Факт пересечения i -ого ствола ДЕО с промерной линией устанавливали из условия:

$$(x_{2i} \geq x_{отб}) \& (x_{1i} \leq x_{отб}), \quad (9)$$

где $x_{отб}$ – координата промерной линии относительно оси OX участка.

Программа позволяла назначать любую координату $x_{отб}$ промерной линии. В экспериментах координата промерной линии для всех прогонов была принята постоянной $x_{отб} = 50$ м.

Если программа определяла факт пересечения ствола ДЕО с промерной линией как TRUE, то в соответствующую ячейку столбца матрицы для данного ствола ДЕО заносилось 1, если как FALSE, то 0.

По результатам имитационного моделирования из данных тензора определялось общее число пересечений стволов ДЕО в каждом прогоне модели. Эти результаты заносились в одномерный массив – вектор, длиной равной числу прогонов. Данные вектора представляли статистический ряд числа пересечений ДЕО с промерной линией в каждом прогоне модели. Ряд обрабатывался по правилам статистики, в частности определялись среднее число пересечений стволов ДЕО с промерной линией m и дисперсия s^2 . Оценка запаса ДЕО \tilde{N} на участке выполнялась по формуле:

$$\tilde{N} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \quad (10)$$

Для проверки адекватности цифровой модели результаты моделирования сравнивались с теоретическими. Моделировались ДЕО с запасом стволов 20, 40, 60, 80, 100 шт./га. Число прогонов модели составило 10000, что соответствовало участку 10000 га и числу линий отбора $n = 10000$.

На рис. 3 показан пример визуализации компьютерной генерации стволов ДЕО на пробном участке леса размером 100×100 м, а также промерная линия. Пример приведен для запаса ДЕО $N_s = 80$ шт./га.

Оценка количества стволов ДЕО на пробном участке \tilde{N} , полученная в экспериментах, сравнивалась с истинным числом ДЕО N на пробном участке и вычислялась ошибка по формуле:

$$ERROR = \frac{N - \tilde{N}}{N} \cdot 100 \quad , \% \quad (11)$$

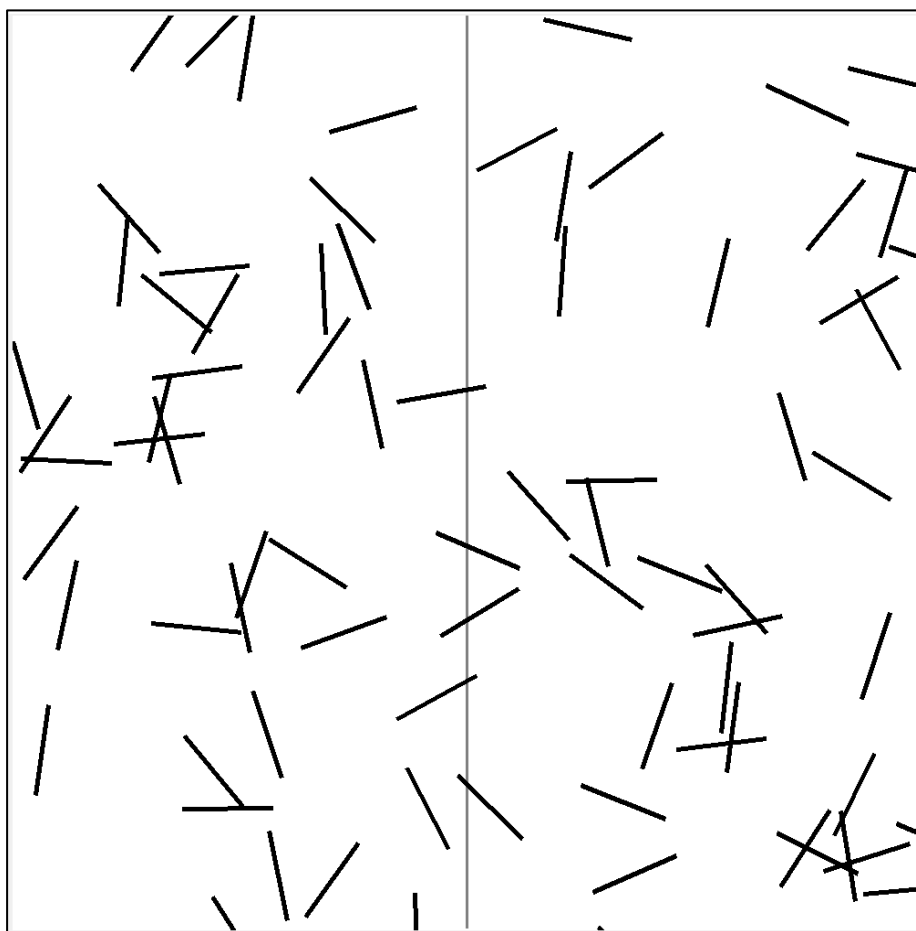


Рис. 3. Пробный участок леса размером 100×100 м с запасом ДЕО 80 шт./га. (Компьютерная генерация)

Результаты исследований

Данные имитационных экспериментов показали хорошее совпадение с результатами теоретических исследований. Отклонение в расчетах необходимого числа промерных линий по теоретическим формулам и полученные в результате экспериментов не превысило 1,5 %, что хорошо видно на графике рис. 4.

Для того, чтобы установить разброс значений в оценке количества стволов ДЕО по промерным линиям, число которых было определено ранее (табл.), в модель вводились массивы исходных данных: вектор варьируемых количеств стволов ДЕО $N_s = [20, 40, 60, 80, 100]$ и векторы наборов потребного числа промерных линий для $P = 20\%$, $n_{20\%} = [71, 35, 24, 18, 14]$, и $P = 5\%$, $n_{5\%} = [1129, 565, 376, 282, 226]$.

Имитационное моделирование проводилось с каждым набором промерных линий по 1000 прогонов. После каждого прогона модели с заданным набором промерных линий определялось среднее значение числа пересечений стволов ДЕО с одной промерной линией. Например, если набор промерных линий был принят равным 14, то после каждого прогона число всех пересечений стволов ДЕО со всеми 14-тью промерными линиями суммировалось, а затем делилось на 14. В результате получалось среднее значение пересечений стволов ДЕО с одной промерной линией. Эти данные по каждому прогону заносились в одномерный массив – вектор пересечений для данного комплекта промерных линий (в приведенном примере он равен 14).

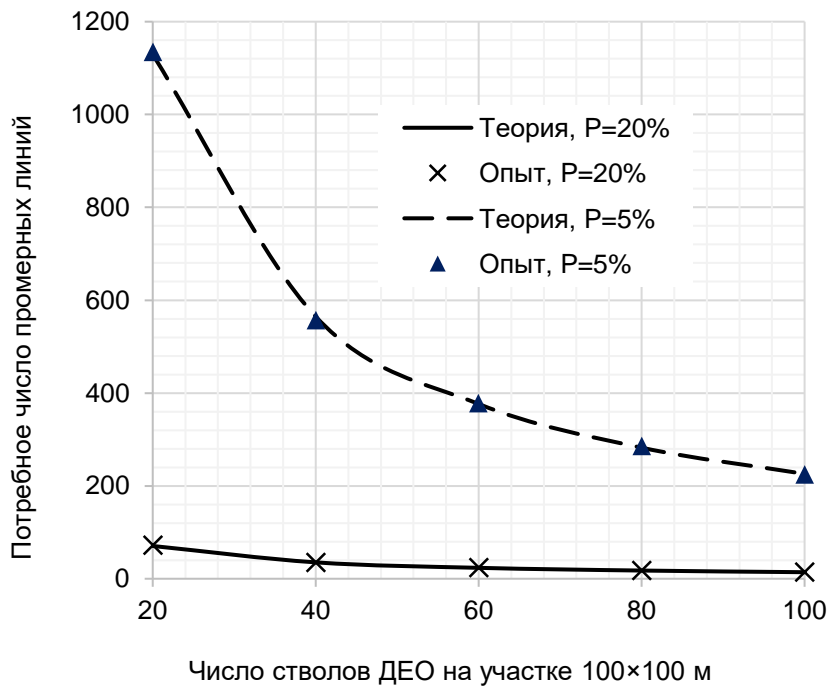


Рис. 4. Зависимость необходимого числа промерных линий от количества стволов ДЕО на пробном участке

Массив вектора пересечений представлял собой статистический ряд из 1000 значений средних пересечений стволов ДЕО с промерной линией в каждом прогоне модели для данного комплекта промерных линий. Для этого статистического ряда определялись медиана, квартили, наблюдаемые минимальное и максимальное значения оценок.

Диаграмма размаха оценок количества стволов ДЕО на пробном участке для показателя точности $P = 20\%$ приведена на рис. 5. Диаграмма для показателя точности $P = 5\%$ – на рис. 6.

Диаграмма показывает пять ключевых статистических показателей: минимальное

значение, первый квартиль (25 %), медиану (50 %), третий квартиль (75 %), максимальное и минимальное значения в виде так называемых усов: верхнего и нижнего. Также на диаграмме кружками показаны аномальные выбросы, значения которых находятся за пределами доверительных интервалов.

Межквартильный диапазон колебания, в который укладывается 50 % всех оценок для $P = 20\%$, находится в пределах $\pm 7\%$ относительно среднего. Этот диапазон для $P = 5\%$ находится в пределах $\pm 1,5\%$ относительно среднего, что значительно меньше оценок для $P = 20\%$. Это хорошо видно из диаграмм на рис. 6 и рис. 7.

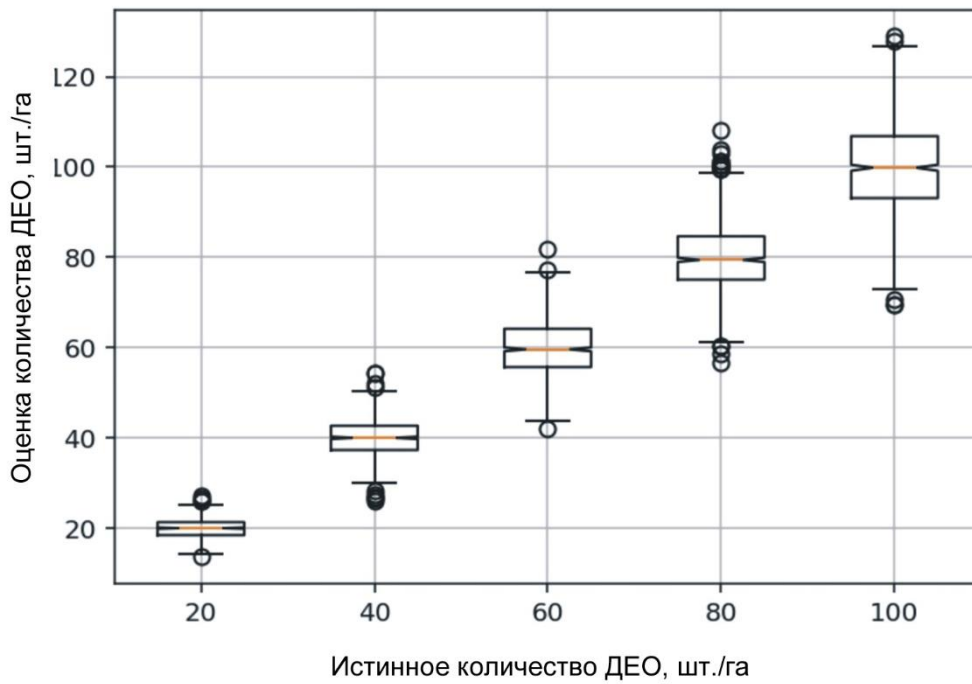


Рис. 5. Диаграмма размаха оценок количества стволов ДЕО на пробном участке (показатель точности $P = 20\%$)

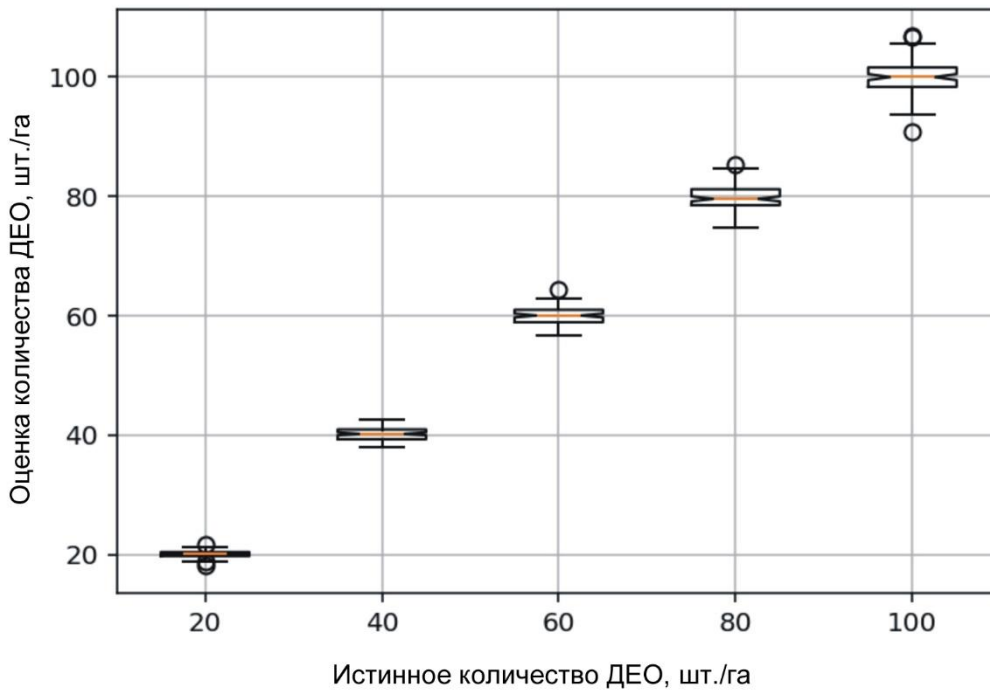


Рис. 6. Диаграмма размаха оценок количества стволов ДЕО на пробном участке (показатель точности $P = 5\%$)

Отметим, что если брать диапазон колебания, в который укладывается 99 % всех оценок, то для $P = 20\%$ этот диапазон находится уже в пределах $\pm 20-25\%$ относительно среднего, а для $P = 5\%$ – $\pm 5\%$.

Выводы

Определение количества стволов ДЕО на участке леса на практике может проводиться для коэффициента точности $P = 20\%$, при этом оценка будет находиться в пределах $\pm 20-25\%$.

Число промерных линий при количестве стволов ДЕО 20 шт./га и более, не будет превышать 70.

Эксперименты с цифровой моделью показали совпадение полученного потребного числа промерных линий с теоретическими данными в широком диапазоне варьирования количества стволов ДЕО на пробном участке. Разброс значений в оценке количества стволов

ДЕО по промерным линиям показал, что на практике для целей оценки природной пожарной опасности и противопожарного обустройства лесов можно в первом приближении проводить оценку количества стволов ДЕО методом линейных пересечений с показателем точности $P = 20\%$ по 70 линиям отбора, что приемлемо для практического использования метода.

Список литературы

1. Волокитина А. В. Разработка определителя типов основных проводников горения // Сибирский лесной журнал. 2023. № 6. С. 50–62. DOI: 10.15372/SJFS20230606. EDN: OFWQOF

2. Курбатский Н. П. О классификации лесных пожаров // Лесное хозяйство. 1970. №3. С. 68–73.

3. Аксенов С. Г. Разработка классификационной шкалы лесных пожаров / С. Г. Аксенов, Э. С. Насырова, М. А. Леонтьева [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. № 2 (17). С. 80–84. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.17.2.004. EDN: QESCAI

4. Плотникова А. С. Шкала природной пожарной опасности лесных экосистем И. С. Мелехова. Обзор современных российских методических подходов // Вопросы лесной науки, 2021. Т. 4. № 2. Статья № 83. Выпуск: «Лесные пожары». DOI: 10.31509/2658-607x-202142-2

5. Котельников Р. В., Мартынюк А. А. Показатель для оценки эффективности организации охраны лесов от пожаров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 2. С. 213–222. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-213-222

6. Заворотный А. Г., Лавлинский И. В. Оценка пожарной опасности лесов методами многомерного статистического анализа // Технологии гражданской безопасности. 2025. Т. 22, № 1 (83). С. 22–30. EDN: SQZALC

7. Волокитина А. В., Софронов М. А., Корец М. А. Проблема прогнозирования поведения лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 4. С. 41–48.

8. Biased estimation of forest log characteristic using intersect diameters / Bate L., Torgersen T., Wisdom M. [et al.]. Forest Ecology and Management, 2009, vol. 258(5), pp. 635–640.

9. Ghaffariyan M.R. Remaining slash in different harvesting operation sites in Australian plantations. Silva Balcanica, 2013, vol. 14 (1), pp. 83–93.

10. Quantitative Estimation of Logging Residues by Line-Intersect Method / S. P. Karpachev, V. I. Zaprudnov, M. A. Bykovskiy [et al.]. Croatian

journal of forest engineering, 2017, vol. 38 (2017) 1, pp. 33–45.

11. Linnel Nemeč A.F., Davis G. Efficient of six line intersect sampling designs for estimation volume and density of coarse woody debris. Nanaimo: Forest Service British Columbia, Technical Report TR-021/2002, 2002.

12. Marshall P. L., Davis G., LeMay V.M., Using Line Intersect Sampling for Coarse Woody Debris. Technical Report TR-003 March, Research Section, Vancouver Forest Region, BCMOF, 2000, 34 p.

13. Analysis of sampling methods for coarse woody debris / Woldendorp G., Keenan R., Barry S. [et al.]. Forest Ecology and Management, 2004, vol. 198 (1), pp. 133–148.

14. Карпачев С. П., Щербачев Е. Н. Статистическая оценка количества и качества скоплений древесины, образующихся на лесных участках и в водоемах. М.: МГУЛ, 2013. 129 с.:

15. Кремер Н. Ш. Математическая статистика: учебник и практикум для вузов. 5-е изд. М.: Издательство Юрайт, 2026. 259 с.

References

1. Volokitina A. V. Razrabotka opredelitel'ya tipov osnovnykh provodnikov goreniya [Development of an identifier for the types of main combustion conductors]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, 2023, issue 6, pp. 50–62. DOI: 10.15372/SJFS20230606. EDN: OFWQOF

2. Kurbatsky N. P. O klassifikatsii lesnykh pozharov. [On the classification of forest fires]. *Lesnoe hozyajstvo*, 1970, issue 3, pp. 68-73.

3. Aksyonov S. G. Razrabotka klassifikatsionnoy shkaly lesnykh pozharov [Development of a classification scale for forest fires] / S. G. Aksyonov, E. S. Nasyrova, M. A. Leontyeva [et al.]. *Sibirskiy pozharo-spatatel'nyy vestnik*, 2020, vol. 2 (17), pp. 80–84, DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.17.2.004. EDN: QESCAI

5. Kotelnikov R. V., Martynyuk A. A. Pokazatel' dlya otsenki effektivnosti organizatsii okhrany lesov ot pozharov [An Indicator for Assessing the Effectiveness of Organizing Forest Fire Protection]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy*

zhurnal, 2021, issue 2, pp. 213–222. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-213-222

6. Zavorotny A. G., Lavlinsky I. V. Otsenka požarnoy opasnosti lesov metodami mnogomernogo statisticheskogo analiza [Assessment of forest fire hazard using multivariate statistical analysis methods]. *Tekhnologii grazhdanskoй bezopasnosti*, 2025, issue 22, vol. 1 (83), pp. 22–30, EDN: SQZALC

7. Volokitina A. V., Sofronov M. A., Korets M. A. Problema prognozirovaniya povedeniya lesnykh požarov [The problem of forecasting the behavior of forest fires]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2010, vol. 19, issue 4, pp. 41–48.

8. Biased estimation of forest log characteristic using intersect diameters / Bate L., Torgersen T., Wisdom M. [et al.]. *Forest Ecology and Management*, 2009, vol. 258(5), pp. 635–640.

9. Ghaffariyan M.R. Remaining slash in different harvesting operation sites in Australian plantations. *Silva Balcanica*, 2013, vol. 14 (1), pp. 83–93.

10. Quantitative Estimation of Logging Residues by Line-Intersect Method / S. P. Karpachev, V. I. Zaprudnov, M. A. Bykovskiy [et al.]. *Croatian journal of forest engineering*, 2017, vol. 38 (2017) 1, pp. 33–45.

11. Linnel Nemec A.F., Davis G. Efficient of six line intersect sampling designs for estimation volume and density of coarse woody debris. Nanaimo: Forest Service British Columbia, Technical Report TR-021/2002, 2002.

12. Marshall P. L., Davis G., LeMay V.M., Using Line Intersect Sampling for Coarse Woody Debris. Technical Report TR-003 March, Research Section, Vancouver Forest Region, BCMOF, 2000, 34 p.

13. Analysis of sampling methods for coarse woody debris / Woldendorp G., Keenan R., Barry S. [et al.]. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 198 (1), pp. 133–148.

14. Karpachev S. P., Shcherbakov E. N. *Statisticheskaya otsenka kolichestva i kachestva skopleniy drevesiny, obrazuyushchikhsya na lesnykh uchastkakh i v vodoyemakh* [Statistical assessment of the quantity and quality of wood accumulations formed in forest areas and water bodies]. Moscow: MGUL, 2013. 129 p.

15. Kremer N. Sh. *Matematicheskaya statistika: uchebnyk i praktikum dlya vuzov. 5-ye izd.* [Mathematical statistics: a textbook and practical training for universities. 5th ed.]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt, 2026. 259 p.

Карпачев Сергей Петрович

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
доктор технических наук, профессор
ResearcherID: AАН-8641-2019,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>
E-mail: karpachevs@mail.ru

Karpachev Sergey Petrovich

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow
Doctor of Technical Sciences, Professor
ResearcherID: AАН-8641-2019,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>
E-mail: karpachevs@mail.ru

Фролов Сергей Владимирович

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
кандидат физико-математических наук, доцент
Author ID: 1128865
ORCID: 0009-0008-8998-0143
E-mail: s_v_frolov@mail.ru

Frolov Sergey Vladimirovich

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor

Author ID: 1128865

ORCID: 0009-0008-8998-0143

E-mail: s_v_frolov@mail.ru

Фролов Денис Васильевич

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
старший преподаватель

Author ID: 759893

ORCID: 0009-0004-4121-4379

E-mail: dendiablo@mail.ru

Frolov Denis Vasilyevich

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow

Senior lecturer

Author ID: 759893

ORCID: 0009-0004-4121-4379

E-mail: dendiablo@mail.ru

Шуляк Екатерина Юрьевна

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
преподаватель

E-mail: kasatka1091979@mail.ru

Shulyak Ekaterina Yurievna

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow

lecturer

E-mail: kasatka1091979@mail.ru

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

ОБЗОР НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ПОРОШКОВОМУ ПОЖАРОТУШЕНИЮ

А. В. КЛИМОВ

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

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

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

REVIEW OF SCIENTIFIC PAPERS ON POWDER FIRE EXTINGUISHING

A. V. KLIMOV

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
E-mail: sasha-klim-20022@mail.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

проекты часто являются частью государственных программ по гражданской безопасности.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

и диссоциацией соединений калия и натрия в пламени.

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

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

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

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

Преимущества:

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

- изолируют горящие частицы.

Недостатки:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

После активации систем объемного тушения формируются сложные аэрозольные облака, где динамика оседания частиц определяется их фракционным составом и плотностью. Мелкодисперсные фракции (до 40 мкм) демонстрируют пролонгированное время седиментации, формируя вторичные отложения на вертикальных поверхностях. Распределение осадков носит выраженную неоднородность из-за турбулентных потоков воздуха и геометрии защищаемого пространства. Экспериментальные исследования фиксируют локальные концентрации до 1.8 кг/м³ в зонах аэродинамической тени. Кумулятивные нагрузки на вентиляционные каналы достигают критических значений при повторных срабатываниях, вызывая риск закупорки воздухопроводов. В помещениях с прину-

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

«Вероятный ущерб для объекта защиты и окружающей среды: газопорошковый состав... обладает прямым ингаляционным воздействием на человека, резко уменьшается видимость в защищаемых помещениях» [16]. Кратковременная экспозиция вызывает раздражение слизистых оболочек и респираторный дискомфорт при превышении порога 5 мг/м³ для карбонатных составов. Европейские нормативы EN 615 устанавливают предельно допустимую концентрацию 10 мг/м³ для разовых воздействий. Первичные защитные меры включают обязательное использование респираторов класса FFP3 и эвакуацию персонала в течение 30 секунд после активации системы [17].

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

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

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

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

Выводы

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

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

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

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

эксплуатационную безопасность и долгосрочную применимость систем;

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

повысит их надежность и эффективность в реальных условиях эксплуатации;

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

Список литературы

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

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

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

Referenses

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Климов Александр Владимирович

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

Адъюнкт адъюнктуры

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

Klimov Alexander Vladimirovich

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

Russian Federation, Ivanovo

Adjunct of post-graduate courses

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

УДК 614.841.41

DOI 10.48612/ntp/fz25-44gr-b7dk

АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПАТЕНТНОЙ БАЗЫ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ИНТУМЕСЦЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

М. А. МАЛЬЦЕВ, С. А. СЫРБУ, А. Г. АЗОВЦЕВ, С. Н. НАКОНЕЧНЫЙ, С. А. ШАБУНИН

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: maltsev_m80@mail.ru

В данной статье представлен анализ патентных документов за последние 50 лет, касающихся интумесцентных покрытий, предназначенных для применения в нефтегазовой отрасли, с акцентом на огнезащиту металлических и промышленных объектов. Материалы исследования отобраны из патентных баз десяти ведущих стран: Бразилии, Великобритании, Германии, Италии, Китая, России, США, Финляндии, Франции, Чехии. Исследование носит репрезентативный характер, охватывая ключевые аспекты разработки и применения таких покрытий.

Анализ патентной документации по интумесцентным покрытиям выявляет широкий спектр исследовательских и прикладных областей. Российские патенты преимущественно ориентированы на повышение эксплуатационной стойкости, американские – на эпоксидные покрытия с акцентом на малый вес и удобство нанесения, китайские – на комплексные свойства (огнезащита, защита от коррозии, механическая прочность), а европейские – на экологичность и эксплуатационные характеристики. В заключение, исследование выявляет наиболее перспективные направления разработки – покрытия для металлических поверхностей, предназначенные для эксплуатации в тяжелых условиях и сочетающие огнезащитные свойства с высокой эксплуатационной стойкостью.

Ключевые слова: патентная база, интумесцентное покрытие, технологическое оборудование, нефтегазовый комплекс, углеводородный пожар, пенококсовый слой.

ANALYSIS OF THE FOREIGN AND DOMESTIC PATENT BASE IN THE FIELD OF CREATING INTUMESCENT COATINGS FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF OIL AND GAS COMPLEX

M. A. MALTSEV, S. A. SYRBU, A. G. AZOVTSSEV, S. N. NAKONECHNIY, S. A. SHABUNIN

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

E-mail: maltsev_m80@mail.ru

This article presents an analysis of patent documents over the past 50 years concerning intumescent coatings intended for use in the oil and gas industry, with an emphasis on flame retardancy of metal and industrial facilities. The research materials were selected from the patent databases of ten leading countries: Brazil, Great Britain, Germany, Italy, China, Russia, USA, Finland, France, Czech Republic. The study is representative, covering key aspects of the development and application of such coatings.

The analysis shows that the patent base in the field of intumescent coatings demonstrates a variety of directions: Russian patents are mainly focused on fire protection of equipment, American patents on epoxy coatings with an emphasis on low weight and ease of application, Chinese patents on complex properties (fire protection, corrosion protection, mechanical strength), and European patents on environmental friendliness and performance. In conclusion, the study identifies the most promising areas of development – coatings for metal surfaces designed for use in harsh conditions and combining flame-retardant properties with high operational resistance.

Keywords: patent base, intumescent coating, technological equipment, oil and gas complex, hydrocarbon fire, foam coke layer.

Введение

В настоящее время для огнезащиты металлических и деревянных конструкций широко используются интумесцентные покрытия. Механизм их действия заключается в следующем. При высоких температурах они претерпевают химические изменения, вспучиваясь и формируя теплоизолирующий слой из пенококса. Эта технология активно применяется в нефтегазовой промышленности для пассивной защиты критически важных объектов – металлоконструкций, трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования – от деформации и разрушения в случае пожара. В обычном состоянии покрытие неотличимо от стандартной краски. Оно выполняет свои защитно-декоративные задачи. Однако, при достижении температуры выше 200 °С начинается процесс, приводящий к увеличению объема материала в 20-40 раз.

Интумесцентные покрытия в нефтегазовом комплексе рассматриваются не как вспомогательный лакокрасочный слой, а как элемент пассивной противопожарной защиты, способный при нагреве формировать теплоизоли-

рующий пенококсовый слой. Для технологического оборудования отрасли это особенно важно, поскольку в патентных документах регулярно рассматриваются сценарии углеводородного пожара, струйного горения, длительного воздействия высоких температур, а в российских разработках учитывается комбинированный сценарий «взрыв-пожар».

Целью исследования является выявление основных направлений развития отечественной и зарубежной патентной базы в области разработки интумесцентных покрытий, пригодных для защиты технологического оборудования нефтегазового комплекса.

Материалы и методы исследования

Материалом исследования выступили патентные документы, находящиеся в базах данных наиболее развитых промышленных стран: Бразилии [1], Великобритании [2, 3], Германии [4], Италии [5], Китая [6, 7], России [8-27], США [28, 29], Финляндии [30], Франции [31], Чехии [32] (данные представлены в табл. 1).

Таблица 1. Патентные документы, находящиеся в базах данных наиболее развитых промышленных стран

№ п/п	Наименование	Краткое описание
1	BR112022005968-0 B1, 24.01.2023, «Состав не вспучивающегося огнезащитного покрытия на водной основе, не содержащего изоцианатов, метод нанесения покрытия на подложку»	Изобретение представляет собой не вспучивающееся огнезащитное покрытие на водной основе. Огнезащитный эффект достигается за счет добавки антипиренов. Полученное покрытие отличается хорошей адгезией к различным поверхностям, долговечностью и соответствует строгим требованиям пожарной безопасности в авиационной отрасли.
2	GB2626653, 08.12.2023, «Противопожарное и фунгицидное покрытие»	Изобретение представляет собой систему многослойного покрытия, состоящую из трех различных слоев, обеспечивающих противопожарную и фунгицидную защиту.
3	GB2274459A, 27.07.1994, «Вспучивающиеся огнезащитные покрытия»	Изобретение представляет собой не содержащую галогенов композицию вспучивающегося огнезащитного покрытия на водной основе, отличающуюся тем, что она содержит латексное связующее на основе бинарного сополимера этилена-винилацетата и оксид цинка.
4	DE102016203911A1, 14.09.2017, «Безгалогенное вспучивающееся огнезащитное покрытие и его применение»	Настоящим изобретением является создание огнестойких покрытий, содержащих связующее вещество на основе натуральных компонентов и не требующих использования галогенсодержащих компонентов, таких как хлорпарафин.
5	WO2010007638A1 21.01.2010 «Огнестойкая нетоксичная краска»	Изобретением является огнезащитное покрытие (или огнезащитная краска) на

№ п/п	Наименование	Краткое описание
		основе нетоксичных инертных продуктов с полным отсутствием дымовыделения, применимое для широкого спектра поверхностей.
6	WO2018227458A1, 20.12.2018, «Вспучивающееся многокомпонентное покрытие»	Настоящее изобретение относится к вспучивающейся композиции для покрытия (также известной как покрытие для пассивной противопожарной защиты).
7	CN104327679A, 04.02.2015, «Способ нанесения эпоксидного антикоррозионного огнестойкого покрытия»	С помощью метода, описанного в патенте, можно получить эпоксидное антикоррозионное огнестойкое покрытие, обладающее хорошей коррозионной стойкостью, ударопрочностью, вязкостью и огнестойкостью.
8	RU2225423C1, 10.03.2004, «Огнезащитная вспучивающаяся краска»	Изобретение относится к лакокрасочным материалам, а именно к огнезащитным вододисперсионным краскам для покрытия, и может быть использовано для внутренних и наружных работ по дереву, штукатурке, пенополиуретану, бетону, картону и металлоконструкциям в строительстве, авиации, железнодорожном транспорте и в других областях, где требуется защита поверхностей таких изделий от огня.
9	RU2331447C1, 20.08.2008, «Система противопожарной и взрывозащитной защиты зданий и сооружений»	Сущность изобретения: система противопожарной и взрывозащитной защиты зданий и сооружений включает в себя металлический слой внешней облицовки, обладающий демпфирующими свойствами, который крепится к защищаемому объекту с помощью гибкого каркаса, и вспучивающийся слой, наносимый на поверхность защищаемого объекта таким образом, чтобы между вышеупомянутым слоем облицовки и вспучивающимся слоем образовался воздушный зазор.
10	RU2691723, 17.06.2019, «Способ противопожарной защиты резервуаров для хранения жидких горючих веществ и огнестойкое теплоизолирующее покрытие»	Изобретение относится к способам тушения больших площадей горения горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, хранящихся в емкостных хранилищах и резервуарах.
11	RU2616848, 18.04.2017, «Способ противопожарной защиты резервуаров для хранения жидких горючих веществ и система для его осуществления»	Изобретение относится к способам тушения больших площадей горения горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, хранящихся в емкостных хранилищах и резервуарах.
12	RU2765373, 28.01.2022, «Способ термозащиты пожарной переборки и огнезащитная композиция для покрытия плоскостных конструкций»	Изобретение относится к способу создания огнезащитного покрытия на поверхности горючих и негорючих материалов. Способ термозащиты пожарных переборок заключается в том, что переборку оснащают по крайней мере, с одной стороны, многослойным огнезащитным покрытием. Отличается тем, что в качестве огнезащитного покрытия используют термоизолирующие плиты, включающие сеть из негорючего материала и порошок из природных минеральных компонентов.

№ п/п	Наименование	Краткое описание
13	RU2590379, 10.07.2016, «Вспененный гель кремнезема, применение вспененного геля кремнезема в качестве огнетушащего средства и золь-гель способ его получения»	Изобретение относится к области получения золь-гель способом вспененного геля кремнезема, который может быть использован в качестве огнетушащего средства при взрывопожаропредотвращении, а также в качестве изолирующего и наполняющего материала в строительстве и в иных отраслях промышленности.
14	RU2732516, 21.09.2020, «Трубное противопожарное уплотнение»	Изобретение относится к огнезащитным противопожарным средствам и может быть использовано для герметизации узлов прохода трубопровода через стены, перегородки на промышленных объектах с повышенной пожароопасностью и для защиты помещений, персонала, оборудования от пожара, дыма, воздействий окружающей среды.
15	RU2827453, 26.09.2024, «Способ огнезащитной обработки поверхности металла»	Изобретение относится к области огнезащиты изделий из металла и может быть использовано в строительстве и других областях техники для повышения огнестойкости металлических, в частности, стальных конструкций.
16	RU2716448, 11.03.2020, «Огнезащитная интумесцентная краска с увеличенным пределом огнестойкости»	Изобретение относится к лакокрасочным материалам, предназначенным для защиты различных металлоконструкций, конструкций и материалов, и может быть использовано в строительной отрасли, транспорте и в других областях, где требуется защита поверхностей от огня.
17	RU2580773, 10.04.2016, «Огнезащитные композиции, содержащие интеркалированные триазином фосфаты металлов»	Настоящее изобретение относится к огнезащитным композициям, содержащим интеркалированные триазином фосфаты металлов с открытыми каркасными структурами.
18	RU2812768, 02.02.2024, «Упругий элемент и огнестойкое покрытие»	Изобретение относится к упругому элементу для гашения колебаний и/или подрессоривания, имеющему по меньшей мере одно пружинящее демпфирующее тело и огнестойкое покрытие на нём.
19	RU2721988, 25.05.2020, «Огнестойкое покрытие и огнезащитная наносимая распылением вяжущая композиция для высокопрочного бетона холодного плавления с контролируемой плотностью»	Изобретение относится к наносимым распылением огнезащитным материалам и способам их получения для защиты стали, древесины, бетона и других строительных и промышленных материалов, которые требуют защиты от неожиданных возгораний.
20	RU2765094, 25.01.2022, «Огнестойкий покрывающий материал проходной части»	Настоящее изобретение относится к огнестойкому покрывающему материалу проходной части и, в частности, к огнестойкому покрывающему материалу, применяемому при создании покрытой для огнезащиты проходной части в деревянном здании.
21	RU2705620, 11.11.2019, «Огнестойкая кабельная проходка для стен и перекрытий зданий»	Изобретение относится к устройствам пассивной противопожарной защиты и может быть использовано преимущественно для заделки мест прохода кабелей через различные строительные конструкции для предотвращения распространения пожара

№ п/п	Наименование	Краткое описание
		из одного помещения в другое в процессе строительства, монтажа оборудования, эксплуатации за счет способности восстановления проходкой своих геометрических размеров после устранения воздействия деформации.
22	RU2810768, 28.12.2023, «Огнестойкий материал»	Изобретение относится к огнестойким материалам, защищающим от огня и высоких температур, и может быть использовано в вагоно- и судостроении, и других отраслях промышленности, где требуется применение трудновоспламеняемых и трудногорючих материалов.
23	RU2839332, 29.04.2025, «Многослойное огнестойкое эластичное полотно с огнезащитным интумесцентным рулонным покрытием»	Изобретение относится к огнезащитным материалам, а именно к многослойному огнестойкому эластичному полотну с огнезащитным интумесцентным рулонным покрытием. Изобретение предназначено для защиты от пожара строительных конструкций зданий, сооружений и оборудования.
24	RU2711076, 15.01.2020, «Огнезащитное интумесцентное рулонное покрытие»	Изобретение относится к огнезащитным материалам и предназначено для защиты от пожара строительных конструкций зданий и сооружений. Огнезащитное интумесцентное рулонное покрытие состоит из эластичной полимерной композиции на основе синтетических каучуков и окисленного графита, нанесенной на армирующую сетку, состоящую из сочетания стекловолокна, базальтового и кремнеземного волокон и углепластика, при оптимальном соотношении компонентов.
25	RU2818238, 26.04.2024, «Композиционный огнезащитный материал»	Изобретение относится к способу создания композиционного огнезащитного материала пассивной противопожарной преграды и может быть использовано для защиты широкого ряда объектов судовых конструкций, зданий, сооружений от воздействия тепловых потоков.
26	RU2800576, 24.07.2023, «Огнестойкий профиль с термокомпенсирующим наполнителем»	Предлагаемое изобретение относится к области строительства и может быть использовано в качестве противопожарных огнестойких профилей с термокомпенсирующим наполнителем для производства различных противопожарных конструкций окон, дверей, коридоров, стеновых конструкций, витражей, перегородок.
27	RU2848176, 16.10.2025, «Фиброгипсовермиколитоцемзобетонная сырьевая смесь для изготовления огнезащитного покрытия»	Изобретение относится к промышленности строительных материалов и предназначено для огнезащиты стальных, железобетонных и армоцементных конструкций в гражданском, промышленном и сельском строительстве.
28	US11525059, 15.04.2021, «Вспучивающиеся лакокрасочные материалы, эффективные при низких температурах»	Настоящее изобретение в целом относится к вспучивающимся составам и, в частности, к вспучивающимся покрытиям, которые сохраняют свою структурную целостность

№ п/п	Наименование	Краткое описание
		даже при многократном воздействии температур окружающей среды, приближающихся к -60 °С.
29	US6096812A, 23.09.1997, «Вспучивающееся покрытие низкой плотности и малого веса»	Данное изобретение относится к вспучиваемому огнестойкому покрытию на основе эпоксидной смолы с низкой плотностью и способу его нанесения.
30	WO2019002680A1, 03.01.2019, «Огнезащитный состав и покрытие»	Настоящее изобретение относится к огнезащитной композиции на биологической основе, химический состав которой не наносит вреда окружающей среде, жизни и здоровью человека.
31	FR2935698A3, 31.01.1985, «Отверждаемая двухкомпонентная композиция и ее применение в качестве изотермического покрытия»	Изобретение относится к отверждаемой композиции, состоящей из двух компонентов: одного жидкого, а другого твердого в виде частиц, в частности порошков, которые смешиваются перед использованием. Изобретение также относится к применению такой композиции в качестве изотермического покрытия, устойчивого к коррозии и воздействию химических веществ.
32	CZ35748, 25.01.2022, «Геополимерная защита от огня и коррозии, покрытие для стали, дерева и бетона»	Изобретение представляет из себя двухкомпонентную систему геополимерных покрытий с вспучивающимися и антикоррозийными свойствами, предназначенную для нанесения на стальные конструкции.

Анализ носил не сплошной, а репрезентативный характер: в выборку включались документы, в которых интумесцентное покрытие описано либо как самостоятельная огнезащитная композиция, либо как часть конструктивной системы пассивной защиты металлических и иных промышленных объектов. Критериями отбора стали технологическая релевантность нефтегазовому комплексу, наличие признаков углеводородного пожара, защита металлических подложек, совмещение огнезащиты с антикоррозионными и эксплуатационными свойствами, а также формульная определенность состава.

В российскую часть выборки включены патенты RU2225423C1 [8], RU2331447C1 [9]. Финский сегмент отражает документ WO2019002680A1 [30], итальянский – WO2010007638A1 [5], германский – DE102016203911A1 [4], китайский – WO2018227458A1 [6] и CN104327679A [7], британский – GB2274459A [3], французский – FR2935698A3 [31]. Американская выборка включает US11525059B2 [28] и US6096812A [29].

Методически исследование строилось как сравнительный патентный анализ. На первом этапе выявлялись объект защиты, тип связующего, вспучивающая система, наличие минеральных и волокнистых модификаторов,

требования к дымообразованию, токсичности и стойкости кокса. На втором этапе патенты сопоставлялись по признаку отраслевой применимости. При этом прямой отбор в пользу нефтегазового оборудования делался тогда, когда документ прямо называл пожароопасное технологическое оборудование, углеводородный пожар, морские платформы, резервуарные и металлические конструкции. В остальных случаях применимость оценивалась как вывод из описания металлических субстратов, антикоррозионной функции, толстослойного нанесения и повышенной термостойкости.

Результаты исследования

Российская патентная база представлена двумя основными направлениями. Патент RU2225423C1 [8] описывает воднодисперсионную акриловую интумесцентную краску на основе аммонийного полифосфата, пентаэритрита и меламина (на основе классической «интумесцентной триады») с модификацией связующего для повышения эксплуатационной стойкости. В патенте RU2331447C1 [9] описывается система огневзрывозащиты с металлической облицовкой, воздушной прослойкой и интумесцентным слоем, прямо предназначенная для пожароопасного оборудования нефтегазового комплекса.

Американские патенты ориентированы на тяжелые условия эксплуатации. В US6096812A [29] предложено эпоксидное покрытие низкой плотности для снижения воздействия углеводородного пожара; в описании прямо указаны морские платформы и объекты хранения и переработки углеводородов. В патенте US11525059B2 [28] основное внимание уделено технологии нанесения: покрытие предназначено для нанесения при пониженных температурах и может использоваться без обязательной армирующей сетки, в том числе в условиях углеводородного и струйного пожара.

Китайские разработки сосредоточены на совмещении нескольких функций. В патенте CN104327679A [7] описано эпоксидное антикоррозионное огнезащитное покрытие, в составе которого объединены эпоксидная смола, феноламин, полифосфат аммония, гидроксид магния, полиуретан и бутадиен-нитрильный каучук. В патенте WO2018227458A1 [6] представлена многокомпонентная интумесцентная система с борсодержащими добавками, волокнами и углеродсодержащими соединениями, то есть акцент

сделан на формирование более прочного защитного слоя.

Европейские патенты в большей степени ориентированы на экологические и эксплуатационные свойства. В GB2274459A [3] предложена безгалогенная водная система на основе этиленвинилацетатного латекса и оксида цинка. В патенте DE102016203911A1 [4] описано безгалогенное покрытие с микрокапсулированным полифосфатом аммония. В патенте WO2019002680A1 [30] использована биооснованная композиция на базе наночастиц целлюлозы. В патенте WO2010007638A1 [5] заявлена нетоксичная, не образующая дыма, интумесцентная краска или штукатурка, а FR2935698A3 [31] отражает использование природных минералов: гипса, карбоната кальция, кремнезема и щелочного силиката. В целом европейские решения тяготеют к не содержащим галогенов минеральным системам с дымоподавлением, тогда как американские и китайские патенты – к эпоксидным покрытиям для металлического оборудования.

Таблица 2. Представленные патентные документы и их техническая направленность

Страна	Патентный документ	Основной технический акцент
Россия	RU2225423C1	Воднодисперсионная интумесцентная краска с полифосфатом аммония, меламином, пентаэритритом и акриловой дисперсией
Россия	RU2331447C1	Композиционная система «металлическая облицовка – воздушная прослойка – вспучивающийся слой»
США	US6096812A	Эпоксидное интумесцентное покрытие низкой плотности
США	US11525059B2	Эффективное покрытие при низких температурах нанесения
Китай	CN104327679A	Эпоксидное антикоррозионное огнезащитное покрытие
Китай	WO2018227458A1	Многокомпонентная интумесцентная система с борсодержащими добавками и волокнами
Германия	DE102016203911A1	Не содержащее галогенов покрытие на терпеновых/политерпеновых связующих, микрокапсулированный полифосфат аммония
Великобритания	GB2274459A	Не содержащая галогенов водная смесь этиленвинилацетата с оксидом цинка
Финляндия	WO2019002680A1	Биокомпозиция на основе наночастиц целлюлозы и минералов
Италия	WO2010007638A1	Инертная интумесцентная краска/штукатурка с подавлением дымообразования
Франция	FR2935698A3	Минеральное интумесцентное покрытие на гипсово-силикатной основе

Анализ патентной базы показывает, что развитие технологий создания интумесцентных покрытий идет по нескольким четко выраженным направлениям. В российском патенте RU2225423C1 [8], опубликованном 10.03.2004, представлена классическая вспучивающаяся система на основе водной акриловой дисперсии с полифосфатом аммония, меламином и пентаэритритом, то есть с традиционным набором компонентов интумесцентной рецептуры. В патенте RU2331447C1 [9], опубликованном 20.08.2008, огнезащита уже рассматривается как многослойная система, включающая металлическую наружную облицовку, гибкий каркас, вспучивающийся слой и воздушную прослойку между ними. Американский патент US6096812A [29] ориентирован на легковесное интумесцентное покрытие низкой плотности и прямо указывает на применение на судах, нефтяных платформах и объектах хранения и переработки углеводородов. Китайский патент CN104327679A [7] от 04.02.2015 отражает линию совмещения огне- и антикоррозионной защиты: в составе указаны 30–40 % бисфенол-А-эпоксидной смолы, 8–15 % фенольного амина, 5–10 % смеси наноразмерного гидроксида магния и полифосфата аммония, 5–10 % полиуретана и 10–18 % бутадиен-нитрильного каучука. Британский патент GB2274459A [3] фиксирует не содержащую галогенов водную систему на основе этиленвинилацетатного латекса, где оксид цинка вводится в количестве 0,75–7,5 % от массы твердых веществ, а содержание связующего составляет 7,5–35 %; вспучивающаяся часть включает меламин, полифосфат аммония и пентаэритрит. Германский патент DE102016203911A1 [4] показывает направление совершенствования не содержащих галогенов покрытий за счет микрокапсулированного полифосфата аммония.

Обсуждение

Анализ патентов показывает, что отечественная и зарубежная базы развиваются в различных направлениях. Российские патенты чаще ориентированы на конкретные инженерные задачи, в том числе на защиту оборудования нефтегазового комплекса и работу при комбинированных поражающих факторах. Зарубежные разработки в основном описывают универсальные интумесцентные покрытия для металлических поверхностей, стальных конструкций и условия углеводородного пожара. В

результате российские решения отличаются более выраженной отраслевой направленностью, тогда как зарубежные патенты демонстрируют более широкое химико-технологическое разнообразие.

Для нефтегазового комплекса наибольший интерес представляют эпоксидные покрытия для защиты от углеводородных пожаров, составы с неорганическими и волокнистыми добавками, а также огнезащитные материалы с антикоррозионными свойствами. Это связано с тем, что технологическое оборудование работает в условиях нагрева, коррозии, механических нагрузок и сложной геометрии. Основными направлениями европейских разработок являются отсутствие в составе галогенов, пониженное дымообразование, а также наличие в составе минеральных и биологических добавок. Вместе с тем, следует учитывать, что патент отражает новизну решения и объем правовой охраны, но сам по себе не подтверждает его широкого промышленного внедрения. Поэтому патентную базу следует рассматривать, прежде всего, как источник сведений о технологических направлениях разработки интумесцентных покрытий.

Заключение

Проведенный анализ показал, что патентная база в области разработки интумесцентных покрытий для нефтегазового комплекса развивается по нескольким направлениям. Российские патенты в большей степени связаны с задачами огнезащиты конкретного технологического оборудования. Американские разработки сосредоточены на эпоксидных покрытиях для снижения воздействия углеводородного пожара, снижении массы покрытия и повышении удобства нанесения. Китайские патенты ориентированы на совмещение огнезащитных, антикоррозионных и механических свойств. Европейские решения в большей степени акцентируют экологические и эксплуатационные характеристики, такие как отсутствие в составе галогенов, низкое дымообразование и использование минеральных либо биологических компонентов.

Наиболее перспективными для нефтегазового комплекса являются покрытия для металлических поверхностей, рассчитанные на тяжелые условия эксплуатации и сочетающие огнезащиту с другими эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Canterbury T. Isocyanate-free water-based non-intumescent fire retardant coating composition, substrate and substrate coating method,

Patent 112022005968 Brazil CO9 D5/18, opubl. 24.01.2023, Byul. № 7.

2. Derek A. W. Fire protection and mould retardant coating, Patent 2626653 Great Britain CO9 D5/185, opubl. 08.12.2023.

3. Swan M. D. Intumescent fire protection coatings, Patent 2274459 Great Britain CO9 D5/185, opubl. 27.07.2024.
4. Bender K. Halogen-free, intumescent fire protection coating and its use, Patent 102016203911 Germany CO9 D5/185, opubl. 14.09.2017.
5. Colucci A. P. Fireproof, non-toxic paint, Patent 2010007638 Italy CO9 D1/02, opubl. 21.01.2010.
6. Wu H. Intumescent coating composition, Patent 2018227458 China CO9 D5/185, opubl. 20.12.2018.
7. Yanling X. Preparation method of epoxy anti-corrosion flame-retardant coating, Patent 104327679 China CO9 D163/00, opubl. 04.02.2015.
8. Патент 2225423 Российская Федерация МПК CO9 D5/18. Огнезащитная вспучивающаяся краска / Т. Е. Гузяева; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 7.
9. Патент 2331447 Российская Федерация МПК A62C 2/06. Система противопожарной и взрывозащитной защиты зданий и сооружений / В. Л. Страхов; опубл. 20.08.2008, Бюл. № 23.
10. Патент 2691723 Российская Федерация МПК A62C 3/06. Способ противопожарной защиты резервуаров для хранения жидких горючих веществ и огнестойкое теплоизолирующее покрытие / В. И. Забегаев; опубл. 17.06.2019, Бюл. № 17.
11. Патент 2616848 Российская Федерация МПК A62C 3/06. Способ противопожарной защиты резервуаров для хранения жидких горючих веществ и система для его осуществления / Н. П. Копылов; опубл. 18.04.2017, Бюл. № 11.
12. Патент 2765373 Российская Федерация МПК A62C 3/06. Способ термозащиты пожарной переборки и огнезащитная композиция для покрытия плоскостных конструкций / С. Ю. Лазарев; опубл. 28.01.2022, Бюл. № 29.
13. Патент 2590379 Российская Федерация МПК C01B 33/16. Вспененный гель кремнезема, применение вспененного геля кремнезема в качестве огнетушащего средства и золь-гель способ его получения / И. М. Абдурагимов; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19.
14. Патент 2732516 Российская Федерация МПК B22C 9/04. Трубное противопожарное уплотнение / Р. Бохли; опубл. 21.09.2020, Бюл. № 17.
15. Патент 2827453 Российская Федерация МПК C08K 3/016. Способ огнезащитной обработки поверхности металла / С. Д. Варфаломеев; опубл. 26.09.2024, Бюл. № 17.
16. Патент 2716448 Российская Федерация МПК C09D 3/016. Огнезащитная интумесцентная краска с увеличенным пределом огнестойкости / Д. А. Малюта; опубл. 11.03.2020, Бюл. № 8.
17. Патент 2580773 Российская Федерация МПК C21D 8/10. Огнезащитные композиции, содержащие интеркалированные триазинном фосфаты металлов / А. И. Грехов; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10.
18. Патент 2812768 Российская Федерация МПК F16F 1/371. Упругий элемент и огнестойкое покрытие / Я. Керн; опубл. 02.02.2024, Бюл. № 4.
19. Патент 2721988 Российская Федерация МПК C04B 41/50. Огнестойкое покрытие и огнезащитная наносимая распылением вяжущая композиция для высокопрочного бетона холодного плавления с контролируемой плотностью / Р. Зуброд; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 15.
20. Патент 2765094 Российская Федерация МПК E04B 1/94. Огнестойкий покрывающий материал проходной части / Ю. Татани; опубл. 25.01.2022, Бюл. № 3.
21. Патент 2705620 Российская Федерация МПК E04B 1/94. Огнестойкая кабельная проходка для стен и перекрытий зданий / В. А. Прусаков; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 32.
22. Патент 2810768 Российская Федерация МПК D02G 3/04. Огнестойкий материал / И. А. Кириллин; опубл. 28.12.2023, Бюл. № 1.
23. Патент 2839332 Российская Федерация МПК A62C 2/06. Многослойное огнестойкое эластичное полотно с огнезащитным интумесцентным рулонным покрытием / М. В. Гравит; опубл. 29.04.2025, Бюл. № 13.
24. Патент 2711076 Российская Федерация МПК C09K 21/00. Огнезащитное интумесцентное рулонное покрытие / В. А. Прусаков; опубл. 15.01.2020, Бюл. № 2.
25. Патент 2818238 Российская Федерация МПК B32B 33/00. Композиционный огнезащитный материал / И. О. Генрих; опубл. 26.04.2024, Бюл. № 12.
26. Патент 2800576 Российская Федерация МПК E06B 5/16. Огнестойкий профиль с термокомпенсирующим наполнителем / А. Е. Галашин; опубл. 24.07.2023, Бюл. № 21.
27. Патент 2848176 Российская Федерация МПК E06B 5/16. Фиброгипсовермикулитопемзобетонная сырьевая смесь для изготовления огнезащитного покрытия / Т. А. Хежев; опубл. 16.10.2025, Бюл. № 29.
28. Hilton S. L. Intumescent coatings compositions effective at low temperatures, Patent 11525059 USA CO9 D5/185, opubl. 15.04.2021.
29. Hanafin J. W. Low density, light weight intumescent coating, Patent 6096812 USA CO9 K21/14, opubl. 23.09.1997.

30. Perre J. Fire retardant composition and coating, Patent 2019002680 Finland CO9 D5/18, opubl. 03.01.2019.

31. Joubert D. Fire retardant composition and coating, Patent 2019002680 France CO4B28/26, opubl. 31.01.1985.

32. Kral M. Geopolymer fire-retardant and anti-corrosion coating for steel, wood and concrete, Patent 35748 Czech Republic CO9 D1/00, opubl. 25.01.2022.

References

1. Canterbury T. Isocyanate-free water-based non-intumescent fire retardant coating composition, substrate and substrate coating method, Patent 112022005968 Brazil CO9 D5/18, opubl. 24.01.2023, Byul. № 7.

2. Derek A. W. Fire protection and mould retardant coating, Patent 2626653 Great Britain CO9 D5/185, opubl. 08.12.2023.

3. Swan M. D. Intumescent fire protection coatings, Patent 2274459 Great Britain CO9 D5/185, opubl. 27.07.2024.

4. Bender K. Halogen-free, intumescent fire protection coating and its use, Patent 102016203911 Germany CO9 D5/185, opubl. 14.09.2017.

5. Colucci A. P. Fireproof, non-toxic paint, Patent 2010007638 Italy CO9 D1/02, opubl. 21.01.2010.

6. Wu H. Intumescent coating composition, Patent 2018227458 China CO9 D5/185, opubl. 20.12.2018.

7. Yanling X. Preparation method of epoxy anti-corrosion flame-retardant coating, Patent 104327679 China CO9 D163/00, opubl. 04.02.2015.

8. Guzyaeva T. E. Ognезashhitnaya vspuchivayushhayasya kraska [Flame-retardant bulging paint], Patent 2225423 Rossijskaya Federaciya MPK CO9 D5/18, opubl. 10.03.2004, Byul. № 7.

9. Straxov V. L. Sistema protivopozharnoj i vzry'vozashhitnoj zashhity' zdanij i sooruzhenij [Fire and explosion protection system for buildings and structures], Patent 2331447 Rossijskaya Federaciya MPK A62S 2/06, opubl. 20.08.2008, Byul. № 23.

10. Zabegaev V. I. Sposob protivopozharnoj zashhity' rezervuarov dlya xraneniya zhidkix goryuchix veshhestv i ognestojkoe teploizoliruyushhee pokry'tie [A method of fire protection of tanks for storing liquids, combustible substances and a fire-resistant thermal insulation coating], Patent 2691723 Rossijskaya Federaciya MPK A62S 3/06, opubl. 17.06.2019, Byul. № 17.

11. Kopy'lov N. P. Sposob protivopozharnoj zashhity' rezervuarov dlya xraneniya zhidkix

goryuchix veshhestv i sistema dlya ego osushhestvleniya [Method of fire protection of reservoirs for storing liquid combustible substances and a system for its implementation], Patent 2616848 Rossijskaya Federaciya MPK A62S 3/06, opubl. 18.04.2017, Byul. № 11.

12. Lazarev S. Yu. Sposob termozashhity' pozharnoj pereborki i ognезashhitnaya kompoziciya dlya pokry'tiya ploskostny'x konstrukcij [A method of thermally protective fire bulkhead and a fire-resistant composition for covering flat structures], Patent 2765373 Rossijskaya Federaciya MPK A62S 3/06, opubl. 28.01.2022, Byul. № 29.

13. Abduragimov I. M. Vспенenny'j gel' kremnezema, primenenie vспенennogo gelya kremnezema v kachestve ognетushashhego sredstva i zol'-gel' sposob ego polucheniya [Foamed silica gel, the use of foamed silica gel as a fire extinguishing agent and the sol-gel method of its preparation], Patent 2590379 Rossijskaya Federaciya MPK S01V 33/16, opubl. 10.07.2016, Byul. № 19.

14. Boxli R. Trubnoe protivopozharnoe uplotnenie [Pipe fire protection seal], Patent 2732516 Rossijskaya Federaciya MPK V22S 9/04, opubl. 21.09.2020, Byul. № 17.

15. Varfalomeev S. D. Sposob ognезashhitnoj obrabotki poverxnosti metalla [Method of flame-retardant metal surface treatment], Patent 2827453 Rossijskaya Federaciya MPK S08K 3/016, opubl. 26.09.2024, Byul. № 17.

16. Malyuta D. A. Ognезashhitnaya intumescentnaya kraska s uvelichenny'm predelom ognestojkosti [Flame-retardant bulging paint with an increased fire resistance limit], Patent 2716448 Rossijskaya Federaciya MPK S09D 3/016, opubl. 11.03.2020, Byul. № 8.

17. Grexov A. I. Ognезashhitny'e kompozicii, sodержashhie interkalirovanny'e triazinom fosfaty' metallov [Flame-retardant compositions containing triazine intercalated metal phosphates], Patent 2580773 Rossijskaya Federaciya MPK S21D 8/10, opubl. 10.04.2016, Byul. № 10.

18. Kern Ya. Uprugij e'lement i ognestojkoe pokry'tie [Elastic element and fire-resistant coating], Patent 2812768 Rossijskaya Federaciya MPK F16F 1/371, opubl. 02.02.2024, Byul. № 4.

19. Zubrod R. Ognestojkoe pokry'tie i ognезashhitnaya nanosimaya raspy'leniem vyazhushhaya kompoziciya dlya vy'sokoprochnogo betona xolodnogo plavleniya s kontroliruemoj plotnost'yu [Fire-resistant coating and flame-retardant spray-applied binder composition for high-strength cold-melting concrete with controlled density], Patent 2721988 Rossijskaya Federaciya MPK C04B 41/50, opubl. 25.05.2020, Byul. № 15.

20. Tatani Yu. Ognestojkij pokry`vayushhij material proxodnoj chasti [Flame-resistant coating material of the preliminary part], Patent 2765094 Rossijskaya Federaciya MPK E04B 1/94, opubl. 25.01.2022, Byul. № 3.

21. Prusakov V. A. Ognestojkaya kabel'naya proxodka dlya sten i perekry`tij zdanij [Fire-resistant cable penetrations for walls and ceilings of buildings], Patent 2705620 Rossijskaya Federaciya MPK E04B 1/94, opubl. 11.11.2019, Byul. № 32.

22. Kirillin I. A. Ognestojkij material [Fire-resistant material], Patent 2810768 Rossijskaya Federaciya MPK D02G 3/04, opubl. 28.12.2023, Byul. № 1.

23. Gravit M. V. Mnogoslojnoe ognestojkoe e`lastichnoe polotno s ognezashhitny`m intumescentny`m rulonny`m pokry`tiem [Multilayer fire-resistant and elastic fabric with flame-retardant, intensive, rolled coating], Patent 2839332 Rossijskaya Federaciya MPK A62S 2/06, opubl. 29.04.2025, Byul. № 13.

24. Prusakov V. A. Ognezashhitnoe intumescentnoe rulonnoe pokry`tie [Flame-retardant bulging roll coating], Patent 2711076 Rossijskaya Federaciya MPK S09K 21/00, opubl. 15.01.2020, Byul. № 2.

25. Genrix I. O. Kompozicionny`j ognezashhitny`j material [Composite flame-retardant material], Patent 2818238 Rossijskaya

Federaciya MPK V32V 33/00, opubl. 26.04.2024, Byul. № 12.

26. Galashin A. E. Ognestojkij profil` s termokompensiruyushhim zapolnitelem [Fire-resistant profile with heat-compensating filler], Patent 2800576 Rossijskaya Federaciya MPK E06V 5/16, opubl. 24.07.2023, Byul. № 21.

27. Xezhev T. A. Fibrogipsovermikulitopemzobetonnyaya sy`r`evaya smes` dlya izgotovleniya ognezashhitnogo pokry`tiya [Fibrogypsovermiculitopemzobeton mixture for the manufacture of flame-retardant coating], Patent 2848176 Rossijskaya Federaciya MPK E06V 5/16, opubl. 16.10.2025, Byul. № 29.

28. Hilton S. L. Intumescent coatings compositions effective at low temperatures, Patent 11525059 USA CO9 D5/185, opubl. 15.04.2021.

29. Hanafin J. W. Low density, light weight intumescent coating, Patent 6096812 USA CO9 K21/14, opubl. 23.09.1997.

30. Perre J. Fire retardant composition and coating, Patent 2019002680 Finland CO9 D5/18, opubl. 03.01.2019.

31. Joubert D. Fire retardant composition and coating, Patent 2019002680 France CO4B28/26, opubl. 31.01.1985.

32. Kral M. Geopolymer fire-retardant and anti-corrosion coating for steel, wood and concrete, Patent 35748 Czech Republic CO9 D1/00, opubl. 25.01.2022.

Мальцев Михаил Алексеевич

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

адъюнкт адъюнктуры

E-mail: maltsev_m80@mail.ru

Maltsev Mikhail Alekseevich

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

Russian Federation, Ivanovo

adjunct of post-graduate courses

E-mail: maltsev_m80@mail.ru

Сырбу Светлана Александровна

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

доктор химических наук, профессор

E-mail: syrbue@yandex.ru

Syrbu Svetlana Aleksandrovna

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

Russian Federation, Ivanovo

doctor of chemical sciences, professor

E-mail: syrbue@yandex.ru

Азовцев Александр Григорьевич

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

кандидат технических наук

E-mail: azovcevag@edufire37.ru

Azovtsev Alexander Grigorievich

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

Russian Federation, Ivanovo

candidate of technical sciences

E-mail: azovcevag@edufire37.ru

Наконечный Сергей Николаевич

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

кандидат химических наук

E-mail: serny@mail.ru

Nakonechniy Sergey Nikolaevich

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

Russian Federation, Ivanovo

candidate of chemical sciences

E-mail: serny@mail.ru

Шабунин Сергей Александрович

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

кандидат химических наук

E-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

Shabunin Sergey Alexandrovich

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

Russian Federation, Ivanovo

candidate of chemical sciences

E-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

УДК 614.842.6

DOI 10.48612/ntp/d2x8-t6ta-d6tu

НОРМАТИВНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ ВО ВРЕМЯ ПОЖАРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

М. А. МАРЕЕВ

Главное управление пожарной охраны МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
Академия ГПС МЧС России
Российская Федерация, г. Москва
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
E-mail: mareev.mikhail@mail.ru

Тушение пожаров характеризуется высокой динамикой, неопределенностью и необходимостью принятия решений в условиях дефицита времени. Целью работы является развитие научных основ тактики тушения пожаров на основе метода электрогидравлических аналогий, позволяющего формализовать описание боевых действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ. Обоснована правомерность применения метода аналогий для исследования процессов тушения пожаров. Разработана нормативно-параметрическая система соответствия между элементами электрической цепи и параметрами боевых действий (приоритет боевой задачи, поток огнетушащих веществ, операционное сопротивление, организационная инерция, буферный запас). Доказана применимость законов Кирхгофа для анализа баланса информационных и материальных потоков в оперативно-тактических структурах. Получено интегральное уравнение динамики (10), объединяющее резистивные, индуктивные и емкостные составляющие процесса тушения. На примере метода интервального охлаждения резервуаров показана его практическая реализация для обоснования тактических решений.

Ключевые слова: научные основы тактики тушения пожаров, метод электрогидравлических аналогий, теория цепей, боевые действия, аварийно-спасательные работы, нормативный метод.

A NORMATIVE-PARAMETRIC MODEL OF COMBAT OPERATIONS DURING A FIRE BASED ON THE ELECTROHYDRAULIC ANALOGY METHOD

M. A. MAREEV

Fire Main Office EMERCOM of Russia,
Russian Federation, Moscow
Academy of the state service of EMERCOM of Russia
Russian Federation, Moscow
Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
E-mail: mareev.mikhail@mail.ru

Firefighting is characterized by high dynamics, uncertainty, and the need to make decisions under time constraints. The purpose of this work is to develop the scientific foundations of firefighting tactics based on the method of electrohydraulic analogies, which allows for the formalization of firefighting and rescue operations. The validity of using the method of analogies for studying firefighting processes has been substantiated. A normative and parametric system has been developed to establish a correspondence between the elements of an electrical circuit and the parameters of firefighting operations (priority of the combat mission, flow of firefighting agents, operational resistance, organizational inertia, and buffer reserve). The applicability of Kirchhoff's laws for analysing the balance of information and material flows in operational and tactical structures has been proven. An integral dynamic equation (10) has been obtained that combines the resistive, inductive, and capacitive components of the extinguishing process. Using the example of the interval cooling method for tanks, its practical implementation for substantiating tactical decisions is demonstrated.

Key words: scientific foundations of fire extinguishing tactics, the method of electrohydraulic analogies, circuit theory, combat operations, emergency rescue operations, and the regulatory method.

Введение

Разработка научных основ тактики тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ является одним из приоритетных направлений исследований в области пожарной безопасности. Процессы тушения пожаров представляют собой сложную междисциплинарную задачу, требующую учета физических, организационных, социальных и тактических аспектов. Особую сложность представляет управление силами и средствами при тушении пожаров: решения принимаются в условиях острого дефицита времени, неполноты информации и высокой ответственности за жизнь людей и сохранность материальных ценностей¹.

Традиционные методы обоснования тактических решений при тушении пожаров базируются преимущественно на качественных принципах, экспертных оценках и эмпирическом опыте, обобщенном в руководящих документах и справочной литературе.^{2, 3} Такой подход имеет объективные ограничения при решении задач формализации боевых действий и прогнозирования последствий принимаемых тактических решений.

В исследованиях в области пожарной безопасности предлагается использовать метод аналогий, позволяющий переносить знания и математический аппарат из одной предметной области в другую при наличии структурного сходства описывающих их уравнений [1]. Классическим примером является метод электрогидравлических аналогий (ЭГА), устанавливающий соответствие между процессами в электрических цепях и гидравлических системах [2, 3]. Развитие этого метода применительно к боевым действиям на пожаре открывает новые возможности для развития научных основ тактики тушения пожаров [4].

Анализ рецензируемых исследований за последние пять лет позволяет выделить несколько ключевых направлений в области моделирования пожаров. Значительный объем работ посвящен физическому моделированию динамики опасных факторов пожара [5, 6]. Другое направление связано с моделированием поведения людей и эвакуации [7, 8, 9]. Третье направление составляет моделирование тактических решений и действий оперативных

подразделений [10,11,12]. В работах [17–23] разработаны модели и алгоритмы поддержки принятия опорных решений в тактике тушения пожаров, основанные на теории конечных цепей Маркова, графоаналитическом подходе и нейросетевых методах. Формализованы граничные условия идентификации ситуаций на месте пожара, а также условия многозадачности ведения боевых действий при тушении пожаров на различных объектах. Указанные работы подтверждают актуальность формализации тактических решений, однако используют преимущественно стохастические и нейросетевые подходы, оставляя открытым вопрос применения детерминированных методов анализа динамики боевых действий на основе физических аналогий.

Особого внимания заслуживают работы, в которых предпринимаются попытки применения аппарата теории цепей для описания информационных и материальных потоков в оперативно-тактических структурах [13].

Наряду с несомненными достижениями, в существующих исследованиях сохраняется ряд существенных пробелов. Большинство моделей фокусируются либо на физике процесса, либо на поведенческих аспектах, оставляя в тени центральное звено – деятельность руководителя тушения пожара (РТП) как субъекта тактического управления. Отсутствует единая методологическая база, позволяющая с единых позиций описывать разнородные процессы (движение техники, расход огнетушащих веществ, передачу информации, принятие решений). Недостаточно развит аппарат формализованного описания тактических воздействий, привязанный к действующей нормативной базе.

Таким образом, выявляется научная проблема, заключающаяся в противоречии между сложностью задач тактики тушения пожаров и отсутствием формализованного методологического аппарата, позволяющего описывать динамику боевых действий и обосновывать тактические решения на основе объективных данных.

Цель исследования заключается в развитии научных основ тактики тушения пожаров на основе метода электрогидравлических аналогий, позволяющего переносить

¹ Стратегия в области развития гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций до 2030 года: утв. Указом Президента РФ от 16.10.2019. № 501. М., 2019.

² Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны: приказ МЧС России от 16.09.2024 № 777. М., 2024.

³ Иванников, В. П. Справочник руководителя тушения пожара / В. П. Иванников, П. П. Ключ. М.: Стройиздат, 1987. 288 с.

математический аппарат теории цепей в область боевых действий по тушению пожаров.

Для достижения цели необходимо установить содержательное соответствие между параметрами электрогидравлической системы и боевыми действиями, доказать применимость балансовых соотношений, получить интегральное уравнение динамики тушения и апробировать примененный метод на примере конкретной тактической задачи (интервальное охлаждение резервуаров).

Научная новизна заключается в применении метода ЭГА к развитию научных основ тактики тушения пожаров, разработке нормативно-параметрической системы соответствия (привязанной к законодательству Российской Федерации) и получении интегрального уравнения динамики (10), описывающего переходные процессы в оперативно-тактических структурах.

Практическая значимость состоит в создании методологической основы для разработки автоматизированных систем обоснования тактических решений при тушении пожаров различного типа, а также для применения в обучающих симуляторах и при планировании действий подразделений пожарной охраны.

Теоретическая основа метода аналогий

Возможность переноса математических моделей из одной предметной области в другую базируется на принципе формального изоморфизма систем дифференциальных уравнений [1]. Если процессы в двух физически различных системах описываются уравнениями одинаковой структуры, то методы исследования, разработанные для одной системы, могут быть применены к другой.

Классическим примером служит соответствие между электрическими и гидравлическими системами. Для последовательной электрической RLC-цепи справедливо уравнение:

$$L \frac{dI(t)}{dt} + RI(t) + \frac{1}{C} \int_0^t I(\tau) d\tau = E(t) \quad (1)$$

Для гидравлической системы с инерционным элементом, сопротивлением и емкостью:

$$Lr \frac{d^2V}{dt^2} + \frac{Rr}{dt} \frac{dV}{dt} + \frac{V}{Cr} = P(t) \quad (2)$$

Математическая тождественность структуры уравнений (1) и (2) является строгим основанием для применения аппарата теории цепей в гидравлике [2, 3].

При переходе к боевым действиям на пожаре ситуация принципиально иная. Процессы тушения пожаров не описываются уравнениями, тождественными (1) и (2) – они изначально не имеют аналитического описания. Поэтому речь идет не о математическом изоморфизме (который требуется доказать), а о построении модели по аналогии. Правомочность такого подхода определяется двумя условиями:

1. Содержательным соответствием между элементами исходной системы (боевых действий) и элементами модели (электрической цепи);

2. Выполнением в моделируемой системе фундаментальных законов сохранения, аналогичных законам Кирхгофа.

Обоснование первого условия (содержательного соответствия) представлено в таблице 1 и базируется на нормативных документах, регламентирующих деятельность пожарной охраны. Каждому параметру электрической цепи поставлен в соответствие количественно измеряемый показатель процесса тушения, значение которого определяется действующими правовыми актами.

Обоснование второго условия (применимости законов Кирхгофа) требует отдельного рассмотрения, поскольку информация и тактические команды, в отличие от электрического тока, не подчиняются закону сохранения. Доказательство базируется на следующих положениях.

Первый закон Кирхгофа (баланс потоков в узле). Рассмотрим произвольный узел оперативно-тактической структуры – например, рукавное разветвление или пост безопасности. В установившемся режиме тушения суммарный поток ресурсов (вода, личный состав, техника), входящий в узел, равен суммарному потоку, выходящему из узла. Это следует из принципа материального баланса: узел не является источником или стоком ресурсов, он лишь перераспределяет их. Для информационных потоков аналогичное утверждение требует введения граничных условий: если рассматривать не саму информацию, а ее материальные носители (радиосигналы, донесения на бумаге), то закон сохранения выполняется. В рамках настоящего исследования принято допущение, что все информационные потоки имеют материальную основу и подчиняются балансовым соотношениям.

Второй закон Кирхгофа (баланс приоритетов в контуре). Рассмотрим замкнутый тактический контур, например: руководитель тушения пожара (РТП) → начальник боевого участка → звено ГДЗС → доклад РТП. В таком контуре сумма всех приоритетов (приказов, распоряжений, корректирующих воздействий) равна

сумме потерь приоритета на преодоление операционных сопротивлений. Это утверждение является следствием принципа причинности: для достижения результата на выходе контура необходимо приложить на входе приоритет, достаточный для компенсации всех потерь.

Таким образом, применение аппарата теории цепей к боевым действиям на пожаре обосновано соответствием параметров и выполнением балансовых соотношений, аналогичных законам Кирхгофа. Речь идет о моделировании по аналогии, правомерность которого подтверждается верификацией модели на реальных данных (см. раздел «Обсуждение результатов и заключение»).

Нормативная база исследования

Количественные значения параметров устанавливаются исключительно на основе действующих нормативных правовых актов Российской Федерации, что обеспечивает объективность, воспроизводимость результатов и юридическую значимость получаемых оценок. В работе использованы:

Федеральные законы: № 52-ФЗ (ст. 5)⁴, № 283-ФЗ (ст. 12)⁵, № 69-ФЗ (ст. 9)⁶ – для определения социальных гарантий личного состава; приказы МЧС России: № 777 (Боевой устав) – для ранжирования пожаров; № 77 – для времени выполнения упражнений⁷; № 640 – для определения численности звеньев ГДЗС⁸; постановление Правительства РФ № 794 – для определения уровней реагирования на ЧС; справочные данные: Справочник РТП, СНиП 2.04.02-84 – для гидравлических расчетов и интенсивности подачи огнетушащих веществ; рекомендации по тушению пожаров в резервуарах [13, 14] и ГОСТ 31385-2016 – для определения критических параметров резервуаров.

Результаты исследования

Для построения модели введем ряд понятий, каждому из которых поставим в соответствие количественную меру, определяемую нормативными документами. Обобщение разработанной системы аналогий представлено в табл. 1.

Таблица 1. Нормативно-параметрическая система аналогий для развития научных основ тактики тушения пожаров

Электрическая цепь	Гидравлическая система	Система тушения пожара	Нормативная база / Метод расчета	Размерность	Интерпретация в деятельности РТП
1. Источники и приоритеты					
Напряжение (ЭДС), U, E	Перепад давления, ΔP	Приоритет боевой задачи, U _{орг}	ФЗ № 52-ФЗ (ст.5), ФЗ № 283-ФЗ (ст.12), ФЗ № 69-ФЗ (ст.9) – суммы страховых выплат; ФСП-2025 – стоимость объекта; Приказ № 777 – ранг пожара; Постановление	безразм.	Количественная мера приоритета боевой задачи. Определяется суммой социальных гарантий, стоимостью объекта и нормативным рангом

⁴ Федеральный закон от 28 марта 1998 г. № 52-ФЗ «Об обязательном государственном страховании жизни и здоровья военнослужащих, граждан, призванных на военные сборы, лиц рядового и начальствующего состава органов внутренних дел Российской Федерации, Государственной противопожарной службы, сотрудников учреждений и органов уголовно-исполнительной системы, сотрудников войск национальной гвардии Российской Федерации, сотрудников органов принудительного исполнения Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).

⁵ Федеральный закон от 30.12.2012 № 283-ФЗ (ред. от 15.12.2025, с изм. от 03.03.2026) «О социальных

гарантиях сотрудникам некоторых федеральных органов исполнительной власти и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

⁶ Федеральный закон «О пожарной безопасности» от 21.12.1994 № 69-ФЗ.

⁷ Об утверждении Порядка подготовки личного состава пожарной охраны: приказ МЧС России от 05.02.2025 № 77. М., 2025.

⁸ Об утверждении Правил использования средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения личным составом подразделений пожарной охраны: приказ МЧС России от 27.06.2022 № 640. М., 2022.

Электрическая цепь	Гидравлическая система	Система тушения пожара	Нормативная база / Метод расчета	Размерность	Интерпретация в деятельности РТП
			№ 794 – уровень ЧС		
Источник ЭДС	Насос	РТП, оперативный штаб, ЦУКС	Боевой устав (Приказ №777)	–	Генератор приоритета боевой задачи. Определяет решающее направление
Источник тока, J	Водоисточник с насосом	Пожарный гидрант, водоем, ПНС, АЦ	СНиП 2.04.02-84, паспортные данные оборудования	л/с	Гарантированный расход воды при заданном напоре
2. Пассивные элементы					
Сопротивление, R	Гидравлическое сопротивление, R_r	Операционное сопротивление, $R_{оп}$	СНиП 2.04.02-84; Справочник РТП (Иванников В.П., 1987) – таблицы удельных сопротивлений рукавов; Приказ МЧС №77 – коэффициенты условий работы	УЕП·с/ед.рес.	Мера потерь приоритета боевой задачи при преодолении препятствий (удаленность, высота, сложность подъезда, условия работы, качество связи)
Емкость, С	Гидравлическая емкость, C_r	Буферный запас ресурсов, $C_б$	Паспорт ПА; Распоряжение МЧС №7 – нормы запаса пенообразователя; Расписание выездов – резерв сил и средств	л/УЕП, м ³ /УЕП, чел./УЕП, ед.тех./УЕП	Объем резерва ресурсов (вода, пенообразователь, личный состав, техника), обеспечивающий непрерывность боевых действий
Индуктивность, L	Инерционность потока, L_r	Организационная инерция, $L_{орг}$	Приказ МЧС №77 – нормативы времени выполнения упражнений (боевое развертывание); Расписание выездов – время следования	УЕП·с ² /ед.рес.	Запаздывание реакции системы на управляющее воздействие. Характеризует время мобилизации ресурсов
3. Поточковые переменные					
Сила тока, I	Расход, Q	Поток ресурсов, $I_{рес}$	Нормативная интенсивность подачи ОТВ (Справочник РТП); Нормативы численности звеньев ГДЗС (Приказ	л/с, чел./с, ед.тех./с	Нормативная интенсивность применения сил и средств в единицу времени

Электрическая цепь	Гидравлическая система	Система тушения пожара	Нормативная база / Метод расчета	Размерность	Интерпретация в деятельности РТП
			№640); Расписание выездов		
Заряд, q	Объем, V	Общий расход ресурса, $q_{рес} = \int I_{рес} dt$	Оперативные данные учета расхода ОТВ, хронометраж работы личного состава	$m^3, л, чел \cdot ч$	Интегральный показатель. Суммарный объем поданной воды/пены, отработанных человеко-часов
4. Топология					
Узел цепи	Точка соединения трубопроводов	Рукавное разветвление, пост ГДЗС, пункт сосредоточения техники	1-й закон Кирхгофа	–	Точка распределения ресурсов. Сумма входящих потоков равна сумме исходящих
Контур цепи	Замкнутый гидравлический контур	Цикл постановки и реализации тактической задачи: РТП – приказ – БУ – выполнение – доклад	2-й закон Кирхгофа	УЕП	Баланс приложенного приоритета боевой задачи и потерь на преодоление операционных сопротивлений

Приоритет боевой задачи представляет количественную меру приоритета задачи, инициирующей движение потоков ресурсов. Он является интегральным показателем, аккумулирующим разнородные факторы: социальную значимость $S_{соц}$ (страховые выплаты личному составу), экономическую значимость $S_{экон}$ (стоимость объекта), интенсивность горения $i_{гор}$ (площадь пожара, зона поражения), сложность условий $C_{усл}$ (ранг пожара), усложнение обстановки $P_{внеш}$ (уровень реагирования).

Для обеспечения размерной однородности каждый фактор нормируют к своему максимальному значению, зафиксированному в нормативных документах: $S_{соц} = S_{соц} / S_{соц, макс}$; $S_{экон} = S_{экон} / S_{экон, макс}$; $i_{гор} = i_{гор} / i_{гор, макс}$; $C_{усл} = C_{усл} / C_{усл, макс}$; $P_{внеш} = P_{внеш} / P_{внеш, макс}$.

Интегральная формула приоритета боевой задачи приобретает вид:

$$U_{орг} = k_1 \cdot S_{соц} + k_2 \cdot S_{экон} + k_3 \cdot i_{гор} + k_4 \cdot C_{усл} + k_5 \cdot P_{внеш}, \quad (3)$$

где $k_1 \dots k_5$ – весовые коэффициенты, определяющие относительную значимость факторов. Коэффициенты получены по методу анализа иерархий Т. Саати [15] на основе экспертного опроса 25 действующих руководителей тушения пожара (стаж не менее 10 лет, опыт участия в тушении крупных пожаров не менее 50). Групповое отношение согласованности $CR = 0,016$

(допустимо $<0,1$), что подтверждает высокую согласованность мнений экспертов. Установлены следующие значения: $k_1 = 0,35$ (социальная значимость), $k_2 = 0,25$ (экономическая значимость), $k_3 = 0,20$ (интенсивность горения), $k_4 = 0,12$ (сложность условий), $k_5 = 0,08$ (коэффициент усложнения обстановки). Данные веса соответствуют иерархии приоритетов, закрепленной в действующем законодательстве Российской Федерации в области пожарной безопасности.

Для обеспечения метрологической состоятельности модели вводится условная единица приоритета (УЕП). 1 УЕП соответствует 1/100 от максимального нормированного значения приоритета боевой задачи $U_{орг, макс}$. Значение $U_{орг, макс}$ достигается при следующих нормативных условиях: численность личного состава, задействованного на боевом участке, более 75 чел. (ранг пожара № 5); площадь пожара, соответствующая максимальной для данного класса объектов; уровень чрезвычайной ситуации (при соответствующей сложности пожара) – федеральный. Таким образом, УЕП является безразмерной, но нормативно-привязанной величиной, что обеспечивает воспроизводимость результатов расчетов на основе действующих нормативных правовых актов.

Поток ресурсов $I_{рес}$ представляет собой количественную меру интенсивности применения сил и средств в единицу времени.

Дифференциация производится по типам ресурсов: расход огнетушащих веществ (л/с), интенсивность задействования личного состава (чел./с), количество единиц техники (ед.тех./с). Нормативные значения определяются по Справочнику РТП, Приказу МЧС России № 640 (нормативы численности звеньев ГДЗС) и расписанию выездов гарнизона.

По аналогии с законом Ома для электрической цепи, в предлагаемой модели вводится соотношение:

$$I_{\text{рес}} = \frac{U_{\text{орг}}}{R_{\text{оп}}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{оп}}$ – операционное сопротивление. Данное выражение является модельным предположением (а не законом), содержательный смысл которого заключается в следующем: чем выше приоритет задачи ($U_{\text{орг}}$), тем больший поток ресурсов на нее направляется; чем выше операционные трудности ($R_{\text{оп}}$), тем меньший поток ресурсов может быть реализован. При выявлении нелинейных эффектов зависимость может быть уточнена введением показателя степени β .

Операционное сопротивление $R_{\text{оп}}$ представляет количественную меру потерь приоритета боевой задачи при преодолении препятствий. В боевых действиях оно носит комплексный характер и включает: сопротивление удаленности (гидравлическое сопротивление рукавных линий) $R_{\text{уд}} = S_{\text{уд}} \cdot L$, где $S_{\text{уд}}$ – удельное гидравлическое сопротивление рукава, L – длина линии; сопротивление высоты подачи: $R_{\text{выс}} = \rho \cdot g \cdot H/Q$; сопротивление сложности подъезда $R_{\text{под}} = R_{\text{уд}} \cdot k_{\text{под}}$; сопротивление сложности обстановки (работа в СИЗОД, угроза взрыва) $R_{\text{усл}} = R_{\text{уд}} \cdot k_{\text{усл}}$; информационное сопротивление (качество и устойчивость каналов связи, задержки передачи сигналов) $R_{\text{инф}}$.

Общее операционное сопротивление участка:

$$R_{\text{оп}} = (R_{\text{уд}} + R_{\text{выс}}) \cdot k_{\text{усл}} \cdot k_{\text{под}} + R_{\text{инф}}. \quad (5)$$

Коэффициенты $k_{\text{усл}}$ и $k_{\text{под}}$ применены к сумме $R_{\text{уд}} + R_{\text{выс}}$, что отражает комплексный характер операционного сопротивления. Сложность подъезда ($k_{\text{под}}$) влияет не только на время разворачивания (часть $R_{\text{уд}}$), но и на возможность подачи стволов на высоту (часть $R_{\text{выс}}$). Аналогично, условия работы в СИЗОД ($k_{\text{усл}}$) увеличивают общее операционное сопротивление пропорционально всем пространственным факторам. Такой подход является модельным допущением, требующим эмпирической верификации для каждого конкретного типа боевых действий.

Все составляющие приводятся к единой размерности (УЕП·с/ед.рес.) через переводные коэффициенты, определяемые по гидравлическим таблицам (СНиП 2.04.02-84, Справочник РТП) и времени упражнений (Приказ МЧС России № 77).

Буферный запас ресурсов $C_б$ характеризует объем резерва, который можно оперативно мобилизовать для обеспечения непрерывности боевых действий. Определяется на основе паспортных данных пожарных автомобилей (запас огнетушащих веществ), расписания выездов гарнизона (резерв сил и средств) и приказа МЧС России № 640 (запас воздуха в дыхательных аппаратах). В терминах электрогидравлической аналогии буферный запас соответствует емкости:

$$C_б^{\text{отв}} = \frac{V_{\text{зап}}}{U_{\text{орг}}}, \quad C_б^{\text{лс}} = N_{\text{рез}}, \quad C_б^{\text{вр}} = \frac{V_{\text{возд}}}{q_{\text{потр}}}. \quad (6)$$

Организационная инерция $L_{\text{орг}}$ количественно характеризует запаздывание реакции системы на управляющее воздействие (аналог индуктивности в электрической цепи). Определяется на основе нормативов времени выполнения оперативных действий (боевое развертывание, время следования, время перегруппировки) по Приказу МЧС России № 77:

$$L_{\text{орг}} = \tau_{\text{разв}} \cdot R_{\text{оп}} \cdot k_{\text{н}}. \quad (7)$$

где $\tau_{\text{разв}}$ – нормативное время разворачивания (с), $k_{\text{н}}$ – коэффициент организационной эффективности ($0 < k_{\text{н}} \leq 1$), отражающий отношение реального времени реакции системы к теоретическому.

Топологическое представление и законы Кирхгофа

Процесс тушения пожара в терминах метода ЭГА представляется в виде ориентированного графа, узлами которого являются источники приоритета боевой задачи (руководитель тушения пожара, оперативный штаб), потребители (очаги горения, участки защиты) и точки распределения ресурсов (рукавные разветвления, посты ГДЗС, пункты сосредоточения техники). Ветвями графа служат маршруты ресурсов, характеризующиеся операционным сопротивлением $R_{\text{оп}}$ и организационной инерцией $L_{\text{орг}}$.

Применимость законов Кирхгофа к потокам ресурсов (включая информационные) обосновывается аппаратом теории графов и следующими положениями.

Первый закон Кирхгофа (баланс потоков в узле). Для любой вершины графа, не являющейся источником или стоком ресурсов (например, рукавное разветвление, пост ГДЗС),

в установившемся режиме тушения суммарный поток ресурсов, входящий в узел, равен суммарному потоку, выходящему из узла. Это следует из принципа материального баланса: входящий поток ресурсов в любой узел системы равен исходящему, так как узел не создает и не уничтожает ресурсы, а лишь перераспределяет их. Для информационных потоков аналогичное утверждение базируется на том, что информация рассматривается через её материальные носители (радиосигналы, доклады), подчиняющиеся закону сохранения энергии.

Таким образом, для любого узла распределения выполняется условие:

$$\sum I_{\text{рес, вх}} = \sum I_{\text{рес, вых}} \quad (8)$$

где $I_{\text{рес}}$ – потоки ресурсов (огнетушащих веществ, личного состава, информации, техники) на соответствующих ветвях.

Второй закон Кирхгофа (баланс приоритетов в контуре). Рассмотрим замкнутый тактический контур, например: «РТП → начальник боевого участка → исполнитель (ствольщик, звено ГДЗС) → доклад РТП». В таком контуре сумма всех приложенных приоритетов боевой задачи (источников ЭДС) равна сумме падений приоритета на преодоление операционных сопротивлений:

$$\sum U_{\text{орг}} = \sum (I_{\text{рес}} \cdot R_{\text{оп}}), \quad (9)$$

где $U_{\text{орг}}$ – приоритет боевой задачи (аналог напряжения), $I_{\text{рес}}$ – поток ресурсов на соответствующем участке, $R_{\text{оп}}$ – операционное сопротивление (аналог электрического сопротивления).

Данное утверждение является следствием принципа причинности: для достижения тактического результата на выходе контура необходимо приложить на входе приоритет, достаточный для компенсации всех потерь.

Интегральное уравнение динамики организационной системы тушения пожара.

Для замкнутого тактического контура, включающего несколько боевых участков, уравнение динамики объединяет все три типа пассивных элементов – резистивные (операционное сопротивление), индуктивные (организационная инерция) и емкостные (буферные запасы ресурсов):

$$\sum_{j=1}^m U_{\text{орг},j} = \sum_{i=1}^n L_{\text{орг},i} \cdot \frac{dI_{\text{рес},i}}{dt} + \sum_{i=1}^n I_{\text{рес},i} \cdot R_{\text{оп},i} + \sum_{i=1}^n \frac{q_{\text{рес},i}}{C_{б,i}} \quad (10)$$

где: $U_{\text{орг},j}$ – приоритет боевой задачи j -го источника (РТП, оперативный штаб, ЦУКС), УЕП;

$L_{\text{орг},i}$ – организационная инерция i -го боевого участка (аналог индуктивности), УЕП·с²/ед.рес.; $R_{\text{оп},i}$ – операционное сопротивление i -го боевого участка (аналог сопротивления), УЕП·с/ед.рес.; $C_{б,i}$ – буферный запас ресурсов на i -м боевом участке (аналог емкости), ед.рес./УЕП;

$q_{\text{рес},i} = \int I_{\text{рес},i} dt$ – общий расход ресурса на i -м боевом участке (аналог электрического заряда), ед.рес.;

$I_{\text{рес},i}$ – поток ресурсов на i -м боевом участке, ед.рес./с;

m – количество источников приоритета боевой задачи;

n – количество боевых участков.

Уравнение (10) впервые объединяет статические (резистивные), динамические (индуктивные) и интегральные (емкостные) характеристики процесса тушения пожара. Оно позволяет моделировать как установившиеся, так и переходные режимы боевых действий, включая периоды наращивания сил, перегруппировки и истощения запасов огнетушащих веществ.

Разработанная модель соответствует базовым принципам тактики тушения пожаров и развивает их применительно к условиям чрезвычайных ситуаций, характеризующихся высокой динамикой и неопределенностью [16].

Верификация законов Кирхгофа на примере тушения резервуара РВС-5000

Для демонстрации адекватности предложенного метода ЭГА выполним верификацию законов Кирхгофа на гидравлическом уровне, оперируя в привычных для практики пожарной охраны единицах – метрах водяного столба (м вод. ст.). Переход от гидравлических параметров к электрическим аналогам (потоку ресурсов $I_{\text{рес}}$ в УЕП/с, напряжению $U_{\text{орг}}$ в УЕП) осуществляется с помощью масштабного коэффициента $k_{\text{пер}}$, который калибруется по нормативной интенсивности подачи огнетушащего вещества. Для рассматриваемого примера подачи пены на тушение резервуара РВС-5000 1 м вод. ст. напора на насосе соответствует 1,2 УЕП приоритета боевой задачи, а расходу 1 л/с соответствует поток ресурсов $I_{\text{рес}} = 0,02$ УЕП/с. Таким образом, гидравлические расчеты, представленные ниже, являются прямым подтверждением применимости топологических законов Кирхгофа к модели (10) после пересчета в единую систему единиц.

Осуществим верификацию законов Кирхгофа для пожара в резервуаре типа

РВС-5000, горящего в режиме факельного горения.

Исходные данные: диаметр резервуара $D = 22,8$ м, высота $H = 11,9$ м. Площадь горения $S = 408$ м². Требуемая интенсивность подачи пены $I = 0,12$ л/(с·м²). Общий требуемый расход $Q_{\text{общ}} = S \cdot I = 408 \cdot 0,12 = 49$ л/с.

Расчет распределения потоков (первый закон Кирхгофа). Подачу пены осуществляют три пеноподъемника. Каждый пеноподъемник содержит ствол-генератор ГПС-2000 с расходом $Q_{\text{ств}} = 18$ л/с. По первому закону Кирхгофа для узла распределения (разветвления на три ветви):

$$Q_n = Q_{\text{ветв1}} + Q_{\text{ветв2}} + Q_{\text{ветв3}} = 3 \cdot Q_{\text{ств}} = 3 \cdot 18 = 54 \text{ л/с.} \quad (11)$$

Условие баланса выполняют: общий расход, подаваемый насосом (54 л/с), равен сумме потоков в трех параллельных ветвях. Здесь $Q_{\text{ветв}i}$ – расход в i -й ветви к пеноподъемнику. Внутри каждой ветви несколько рукавов последовательно соединены.

Проверка потерь (второй закон Кирхгофа). Рассчитаем потери в контуре «насос – рукавная линия – пеногенератор – атмосфера – насос».

Потери в рукавной линии одного пеноподъемника (6 рукавов $d = 77$ мм, $L = 120$ м суммарно, $S_{\text{уд}} = 0,034$)⁹:

$$h_{\text{рук}} = n \cdot S_{\text{уд}} \cdot Q_{\text{ств}}^2 = 6 \cdot 0,034 \cdot 18^2 = 66 \text{ м вод.ст.} \quad (12)$$

Потери в пеноподъемнике включают геометрическую высоту подъема и потери в рукавах:

$$h_{\text{пп}} = H + h_{\text{рук}} = 11,9 + 66 = 77,9 \text{ м вод.ст.} \quad (13)$$

Минимальный напор на насосе H_n составляет:

$$H_n = H_{\text{ств}} + h_{\text{рук}} + H_{\text{геом}} = 60 + 66 + 11,9 = 137,9 \text{ м вод.ст.} \quad (14)$$

Проверка по второму закону Кирхгофа: алгебраическая сумма потерь напора в замкнутом контуре «насос – рукав – пеногенератор – атмосфера – насос» равна нулю:

$$H_n - h_{\text{рук}} - H_{\text{геом}} - H_{\text{ств}} = 137,9 - 66 - 11,9 - 60 = 0 \quad (15)$$

Баланс выполняется. В (10) величина $S_{\text{уд}} = 0,034$ выражена в м вод.ст.·с²/л² при расходе в л/с, что эквивалентно $S_{\text{уд}} = 3,4 \cdot 10^4$ Па·с/м⁴ в системе СИ.

Прикладной аспект: управление охлаждением резервуаров при пожаре

Рассмотрим применение разработанного метода для анализа процесса охлаждения резервуара с нефтепродуктом (РВС) при пожаре, вызванном атакой БПЛА [17] (рис. 1).

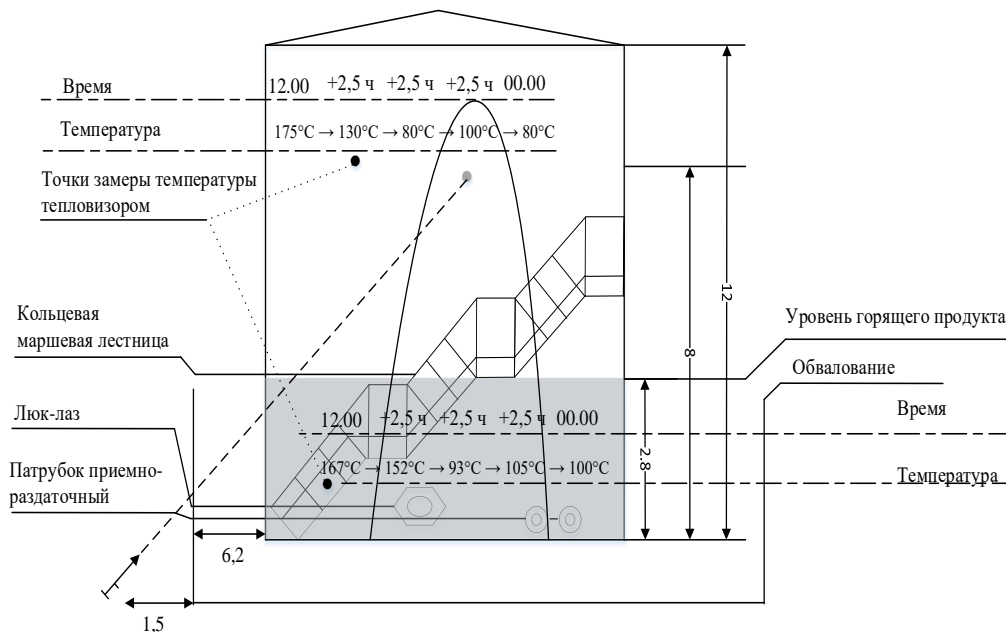


Рис. 1. Начальная фаза тушения горящего РВС объемом 5000 м³

⁹ Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. М.: Стройиздат, 1987. 254 с.

Традиционная тактика предполагает непрерывную подачу воды. Однако, как показал анализ реального пожара на РВС-5000, непрерывное охлаждение не приводило к существенному снижению уровня топлива.

Переход к методу интервального охлаждения (циклическому чередованию фаз подачи и прекращения подачи воды) позволил снизить уровень горючего на 2,5 м за 28 часов (рис. 2).

В табл. 2 представлена интерпретация фаз метода в терминах доминирующих членов уравнения (10).

Ключевым параметром, определяющим безопасность интервального режима, является максимально допустимое время прекращения охлаждения $t_{\text{пауз}}$:

$$t_{\text{пауз}} = \delta \cdot \frac{T_{\text{крит}} - T_{\text{нач}}}{V_{\text{нагр}}} \cdot \eta_{\text{охл}}^{-1} \cdot \chi_{\text{ст}}, \quad (16)$$

где: $T_{\text{крит}}$ – критическая температура стенки (для стали принимается равной 250-300 °С)¹⁰;

$T_{\text{нач}}$ – температура стенки в момент прекращения подачи воды, °С; $V_{\text{нагр}}$ – скорость нагрева стенки при отсутствии охлаждения, °С/с;

$\eta_{\text{охл}}$ – коэффициент эффективности охлаждения (зависит от типа стволов, угла

атаки, равномерности орошения), безразмерный;

$\chi_{\text{ст}}$ – коэффициент состояния стенки (наличие теплозащитного покрытия, коррозии), безразмерный;

$\delta = 0,8$ – гарантийный запас (рекомендуемое значение по результатам верификации).

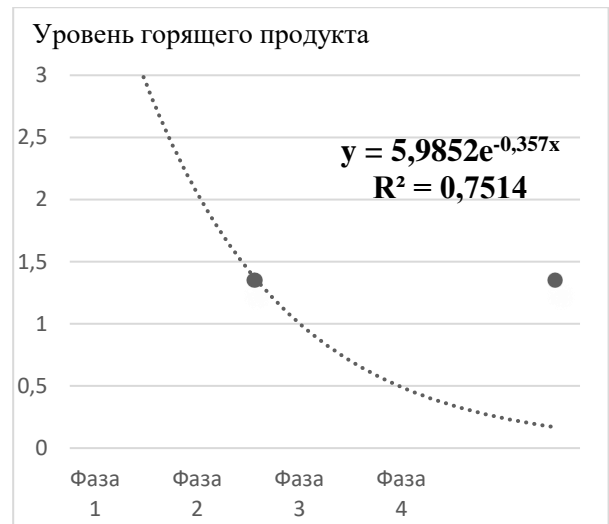


Рис. 2. Динамика изменения уровня горящего продукта по фазам метода интервального охлаждения

Таблица 2. Интерпретация метода интервального охлаждения в терминах модели

Фаза цикла	Доминирующий член уравнения (10)	Физический смысл	Управленческое действие
Охлаждение (t=2-2,5 ч)	Резистивный $\sum(I_{\text{pec}} \cdot R_{\text{оп}})$	Преодоление гидравлического сопротивления при подаче воды	Контроль расхода воды, поддержание требуемого напора
Прекращение охлаждения (t=0,25-0,5 ч)	Емкостной $\sum(c_{\text{с1}} \int I_{\text{pec}} dt)$	Накопление тепловой энергии в стенке резервуара	Мониторинг температуры стенки, оценка запаса времени до достижения $T_{\text{крит}}$
Переходный процесс (включение/отключение)	Индуктивный $\sum(L_{\text{орг}} \cdot \frac{dI_{\text{pec}}}{dt})$	Запаздывание восстановления расхода воды после включения	Координация действий личного состава, синхронизация включения стволов

Расчет для резервуара типа РВС-5000 (диаметр 22,8 м, высота 11,9 м, площадь горения 408 м²) при следующих исходных данных: $T_{\text{крит}} = 300$ °С, $T_{\text{нач}} = 80$ °С, $V_{\text{нагр}} = 73$ °С/ч $\approx 0,0203$ °С/с, $\eta_{\text{охл}} = 0,7$, $\chi_{\text{ст}} = 1,0$, дает:

$$t_{\text{пауз}} = 0,8 \cdot \frac{300 - 80}{0,0203} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot 1,0 \approx$$

$$\approx 0,8 \cdot 10837 \cdot 1,428 \approx 12400 \text{ с} \approx 3,44 \text{ ч.}$$

Полученное теоретическое значение (3,44 ч) представляет собой верхнюю границу допустимого времени паузы, определённую из условия недопущения критического нагрева стенки. Однако практика тушения реальных пожаров показывает, что с учетом неравномерности орошения, локальных перегревов,

¹⁰ ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и

нефтепродуктов. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016.

ветрового воздействия и необходимости гарантированного запаса безопасное время паузы принимается равным 0,25-0,5 ч. Это соответствует введению в расчет дополнительного коэффициента запаса $\delta_{\text{практ}} = 0,07-0,15$ от теоретического значения, что апробировано в ходе тушения пожара в Энгельском районе (2025 г.) и г. Приморск (2026 г.).

Таким образом, разработанный метод позволяет количественно интерпретировать процесс интервального охлаждения и обосновать оптимальные тактические решения с учетом гарантийного запаса, определяемого условиями конкретного пожара.

Обсуждение результатов и заключение

Разработана нормативно-параметрическая система аналогий, устанавливающая однозначное соответствие между элементами электрической цепи и тактическими параметрами боевых действий по тушению пожаров (таблица 1). Показано, что для узлов распределения ресурсов и замкнутых тактических контуров выполняются балансовые соотношения, эквивалентные первому и второму законам Кирхгофа — уравнения (8) и (9).

Получено дифференциальное уравнение динамики тактического контура (10), впервые объединяющее статическую (операционное сопротивление), индуктивную (организационная инерция) и емкостную (буферный запас ресурсов) составляющие. Уравнение позволяет моделировать переходные процессы при развертывании и перераспределении сил и средств.

На примере интервального охлаждения резервуара РВС-5000 при пожаре, вызванном атакой БПЛА [17], проведена апробация разработанного метода. Модель воспроизводит эмпирически найденные фазы подачи (2-2,5 ч) и прекращения охлаждения (0,25-0,5 ч). Расчет по формуле (16) с использованием параметров модели ($\eta_{\text{охл}} = 0,7$, $\chi_{\text{ст}} = 1,0$, $\delta = 0,8$) дает теоретическую верхнюю границу допустимого

времени паузы $t_{\text{пауз}} \approx 3,44$ ч. Применение гарантийного запаса $\delta_{\text{практ}} = 0,07-0,15$ позволяет получить безопасное время паузы 0,25-0,5 ч, что согласуется с данными реальных пожаров.

Выявлены ключевые ограничения модели: линейная зависимость в уравнении (4) является эвристическим упрощением; при резких изменениях обстановки вероятны нелинейные эффекты (гиперболизация рисков); параметры приоритета боевой задачи $U_{\text{орг}}$ содержат весовые коэффициенты, определяемые в настоящее время экспертным путем (хотя согласованность экспертов подтверждена значением $CR = 0,016$); применение законов Кирхгофа к информационным потокам основано на допущении о материальном носителе информации, что не отражает смыслового содержания передаваемых данных.

Сравнение с результатами других исследователей [4–13] показывает, что предложенный подход органично дополняет существующие разработки, заполняя нишу формализованного описания тактической деятельности при тушении пожаров. Предложенный в настоящей работе метод электрогидравлических аналогий дополняет существующие подходы к тактике тушения пожаров и формализации тактического управления [17–23], предлагая альтернативный – детерминированный – инструмент описания переходных процессов в оперативно-тактических структурах, что особенно важно при резких изменениях обстановки в ходе тушения пожаров.

Перспективы дальнейших исследований связаны с проведением ретроспективного анализа пожаров различных типов (здания, резервуарные парки, лесные массивы) для независимой верификации и уточнения параметров модели; разработкой методики объективного расчета приоритета боевой задачи на основе данных систем мониторинга (площадь пожара, стоимость объекта, число людей в зоне риска); интеграцией предложенного математического аппарата в геоинформационные системы и программные тренажеры для РТП.

Список литературы

1. Heaviside Oliver (1850-1925). *Electromagnetic theory*. London: The Electrician, 1893. XXI, 466 p.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: в 2 т. Т. 1: Электрические цепи: учебник для вузов. 12-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2023. 831 с.
3. Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика: учебник для вузов по специальности

«Теплогазоснабжение и вентиляция». М.: Стройиздат, 1987. 413 с.

4. Мареев М. А. Особенности применения метода электрогидравлических аналогий для поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 3 (44). С. 22–29.

5. Parsa V., Santiago A., Laím L. *Computational Fluid Dynamics of Compartment Fires: A Review of Methods and Applications*. Applied Sciences, 2025, vol. 15, issue 5, P. 2342.

6. Fully-developed compartment fire dynamics in large-scale mass timber compartments / Pope I., Gupta V., Xu H. [et al.]. *Fire Safety Journal*, 2023, vol. 141, p. 104022.
7. Самошин Д. А., Холщевников В. В. Проблемы нормирования времени начала эвакуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. Т. 25, № 5. С. 37–51.
8. Bakhshian E., Martinez-Pastor B. Evaluating human behaviour during a disaster evacuation process: A literature review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, vol. 10, issue 10, pp. 485–507.
9. Comfort L., Chang S. Transition in dynamic events: The 2020 lightning complex fires in Northern California as an adaptive system. *Risk Analysis*, 2025, vol. 45, issue 12, pp. 4318–4331.
10. Мареев М. А. Моделирование процессов управления, используя метод электрогидравлических аналогий при тушении пожаров на промышленных объектах // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2024. № 2 (51). С. 161–166.
11. Моделирование ситуационных задач по ликвидации чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах в современных условиях / П. В. Данилов, А. К. Кокурин, А. О. Семенов [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 4 (45). С. 13–18.
12. Тараканов Д. В., Баканов М. О., Захаров Д. Ю. Использование агентного моделирования при тушении пожаров в зданиях // *Августовские научные чтения: сборник научных трудов по материалам II и IV Международных научно-практических конференций*. Смоленск: Общество с ограниченной ответственностью «НОВАЛЕНСО», 2017. С. 161–164.
13. Поддержка принятия управленческих решений выбора оптимальной боевой позиции лафетного ствола с осциллятором / А. В. Ермилов, С. Н. Никишов, А. В. Кузнецов [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2024. № 1 (50). С. 30–36.
14. Денисов А. Н. Формализация задачи управления ствольщиком на позиции по тушению пожара // *Технологии техносферной безопасности*. 2017. № 2 (72). С. 122–129.
15. Саати Т. Л. Принятие решений с помощью метода анализа иерархий // *Методы менеджмента качества*. 2022. № 7. С. 54–60.
16. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами 3-е изд. М.: Лепан, 2019. 480 с.
17. Мареев М. А. Поддержка управления при ведении боевых действий по тушению пожаров в случаях с ударными беспилотными летательными аппаратами // *Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов*. М.: Академия государственной противопожарной службы, 2024. № 13. С. 119–125.
18. Аникин С. Н., Данилов М. М., Денисов А. Н. Управление альтернативами выбора принятия опорных решений в тактике тушения пожаров // *Computational Nanotechnology*. 2020. Т. 7, № 4. С. 39–47. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-4-39-47. EDN: TEEGJR.
19. Условия многозадачности управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении подвижного железнодорожного состава на металлургических предприятиях / А. Н. Денисов, М. М. Данилов, С. Н. Аникин [и др.] // *Computational Nanotechnology*. 2022. Т. 9, № 1. С. 39–46. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-1-39-46. EDN: MWXKIY.
20. Моделирование выбора решений управленческих задач при тушении пожара в подземных сооружениях / С. Н. Аникин, М. М. Данилов, А. Н. Денисов [и др.] // *Computational Nanotechnology*. 2023. Т. 10, № 3. С. 72–82. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-3-72-82. EDN: RNTIBJ.
21. Денисов А. Н., Нгуен Т. Т. Формализация граничных условий для моделей и алгоритмов задачи идентификации ситуаций, складывающихся на месте пожара // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 1-2. С. 26–30. DOI: 10.37882/2223-2966.2023.01-2.05. EDN: ETADMQ.
22. Denisov, A., Gundar, S., Danilov, M., Podkosov, S. (2023). Aviation Method of Extinguishing Landscape Fires - Experimental Substantiation of Parameters. In: Beskopylny, A., Shamtsyan, M., Artiukh, V. (eds) XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022". INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 575. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_284
23. Генезис развития, современные реалии научно-методического и нормативного правового обоснования понятий «крупный пожар», «сложный (затяжной) пожар» / А. Н. Денисов, А. А. Порошин, М. М. Данилов [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. 2025. Т. 34, № 2. С. 5–19. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.5-19. EDN: XVYUPE.

References

1. Heaviside Oliver (1850-1925). *Electromagnetic theory*. London: The Electrician, 1893. XXI, 466 p.
2. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V 2 t. Tom 1. Elektricheskie tsepi* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering.

In 2 vols. Vol. 1. Electrical Circuits]. 12th ed. Moscow: Yurayt, 2023. 831 p.

3. Altshul A. D., Zhivotovskiy L. S., Ivanov L. P. *Gidravlika i aerodinamika* [Hydraulics and Aerodynamics]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 413 p.

4. Mareev M. A. Osobennosti primeneniya metoda elektrogidravlicheskih analogiy dlya podderzhki upravleniya pozharno-spasatel'nymi podrazdeleniyami pri tushenii pozharov [Features of Applying the Method of Electrohydraulic Analogies to Support the Management of Fire and Rescue Units in Fire Fighting]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, issue 3 (44), pp. 22–29.

5. Parsa V., Santiago A., Laím L. Computational Fluid Dynamics of Compartment Fires: A Review of Methods and Applications. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15, issue 5, P. 2342.

6. Fully-developed compartment fire dynamics in large-scale mass timber compartments / Pope I., Gupta V., Xu H. [et al.]. *Fire Safety Journal*, 2023, vol. 141, p. 104022.

7. Samoshin D. A., Kholshchevnikov V. V. Problemy normirovaniya vremeni nachala evakuatsii [Problems of regulating the time of the beginning of evacuation]. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, issue 5, pp. 37–51.

8. Bakhshian E., Martinez-Pastor B. Evaluating human behaviour during a disaster evacuation process: A literature review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, vol. 10, issue 10, pp. 485–507.

9. Comfort L., Chang S. Transition in dynamic events: The 2020 lightning complex fires in Northern California as an adaptive system. *Risk Analysis*, 2025, vol. 45, issue 12, pp. 4318–4331.

10. Mareev M. A. Modelirovanie protsessov upravleniya, ispol'zuya metod elektrogidravlicheskih analogiy pri tushenii pozharov na promyshlennykh ob'ektakh [Modeling of control processes using the method of electrohydraulic analogies in extinguishing fires at industrial facilities]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2024, vol. 2 (51), pp. 161–166.

11. Modelirovanie situatsionnykh zadach po likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy na potencial'no opasnykh ob'ektakh v sovremennykh usloviyakh [Modeling of Situation Tasks for Emergency Response at Potentially Dangerous Facilities in Modern Conditions] / P. V. Danilov, A. K. Kukurin, A. O. Semenov [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, vol. 4 (45), pp. 13–18.

12. Tarakanov D. V., Bakanov M. O., Zakharov D. Yu. Ispol'zovanie agentnogo modelirovaniya pri tushenii pozharov v zdaniyakh [The use of agent-based modeling in the firefighting of

buildings]. *Avgustovskie nauchnye chteniya: sbornik nauchnykh trudov po materialam II i IV Mezhdunarodnykh nauchno-prakticheskikh konferentsiy*, 2017, pp. 161–164.

13. Podderzhka prinyatiya upravlencheskikh resheniy vybora optimal'noy boevoy pozitsii lafetnogo stvola s ostsillyatorom [Support for Making Management Decisions on Choosing the Optimal Combat Position for a Gun Barrel with an Oscillator] / A. V. Ermilov, S. N. Nikishov, A. V. Kuznetsov [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2024, vol. 1 (50), pp. 30–36.

14. Denisov A. N. Formalizatsiya zadachi upravleniya stvol'shchikom na pozitsii po tusheniyu pozhara [Formalization of the Task of Controlling a Firefighter at a Firefighting Position]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*, 2017, vol. 2 (72), pp. 122–129.

15. Saaty T. L. Prinyatie resheniy s pomoshch'yu metoda analiza ierarkhiy [Decision Making with the Analytic Hierarchy Process]. *Metody menedzhmenta kachestva*, 2022, issue 7, pp. 54–60.

16. Novikov D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. 3rd ed. Moscow: Lenand, 2019. 480 p.

17. Mareev M. A. Podderzhka upravleniya pri vedenii boevykh deystviy po tusheniyu pozharov v sluchayakh s udarnymi bespilotnymi letatel'nymi apparatami: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodyh uchenykh i specialistov [Support for control during combat operations to extinguish fires in cases with strike unmanned aerial vehicles: materials of the international scientific and practical conference of young scientists and specialists]. *Problemy tekhnosfernoy bezopasnosti*, 2024, issue 13, pp. 119–125.

18. Anikin S. N., Danilov M. M., Denisov A. N. Upravlenie al'ternativami vybora prinyatiya opornykh resheniy v taktike tusheniya pozharov [Management of Alternatives for Making Supportive Decisions in Fire Fighting Tactics]. *Computational Nanotechnology*, 2020, vol. 7, issue 4, pp. 39–47. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-4-39-47.

19. Usloviya mnogozaadachnosti upravleniya pozharno-spasatel'nymi podrazdeleniyami pri tushenii podvizhnogo zheleznodorozhnogo sostava na metallurgicheskikh predpriyatiyakh [Conditions for Multitasking in the Management of Fire and Rescue Units during the Extinguishing of Rolling Stock at Metallurgical Enterprises] / A. N. Denisov, M. M. Danilov, S. N. Anikin [et al.]. *Computational Nanotechnology*, 2022, vol. 9, issue 1, pp. 39–46. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-1-39-46.

20. Modelirovanie vybora resheniy upravlencheskikh zadach pri tushenii pozhara v podzemnykh sooruzheniyakh [Modeling the choice of solutions for managerial tasks in extinguishing fires in underground structures] / S. N. Anikin, M. M. Danilov A. N. Denisov [et al.]. *Computational Nanotechnology*, 2023, vol. 10, issue 3, pp. 72–82. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-3-72-82.

21. Denisov, A. N., Nguyen, T. T. Formalizatsiya granichnykh usloviy dlya modeley i algoritmov zadachi identifikatsii situatsiy skladyvayushchikhsya na meste pozhara [Formalization of boundary conditions for models and algorithms of the problem of identification of situations developing at the fire site]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2023, issue 1-2, pp. 26–30. DOI: 10.37882/2223-2966.2023.01-2.05.

22. Denisov, A., Gundar, S., Danilov, M., Podkosov, S. Aviation Method of Extinguishing Landscape Fires – Experimental Substantiation of Parameters. In: Beskopylny, A., Shamtsyan, M., Artiukh, V. (eds.) *XV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2022»*. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 575. Cham: Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_284.

23. Genezis razvitiya, sovremennye realii nauchno-metodicheskogo i normativnogo pravovogo obosnovaniya ponyatiy «krupnyy pozhar», «slozhnyy (zatyazhnoy) pozhar» [Genesis of Development, Current Realities of Scientific and Methodological and Regulatory Legal Justification of the Concepts of «Major Fire» and «Complex (Prolonged) Fire»] / A. N. Denisov, A. A. Poroshin, M. M. Danilov [et al.]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2025, vol. 34, issue 2, pp. 5–19. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.5-19.

Мареєв Михаил Александрович

Главное управление пожарной охраны МЧС России,

Российская Федерация, г. Москва

старший инспектор

Академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Москва

преподаватель

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

соискатель ученой степени

E-mail: mareev.mikhail@mail.ru

Mareev Mikhail Alexandrovich

Main Directorate of Fire Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

Russian Federation, Moscow

Senior Inspector

Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

Russian Federation, Moscow

lecturer

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

applicant for an academic degree

E-mail: mareev.mikhail@mail.ru

УДК 614.84

DOI 10.48612/ntp/mahh-eg63-2mdx

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЧ/СВЧ-СУШКИ ПОЖАРНЫХ РУКАВОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ

А. Л. НИКИФОРОВ, С. Н. УЛЬЕВА, И. А. ЛЕГКОВА, Н. Ю. НОВИЧКОВА, И. Ю. ШАРАБАНОВА

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: anikiforoff@list.ru; jivotjagina@mail.ru; legkovai@mail.ru; n.nature@mail.ru; sharabanova@bk.ru

Обеспечение работоспособности пожарных рукавов в условиях эксплуатации сводится к надлежащему обслуживанию данных изделий, что, в первую очередь, определяется своевременной очисткой, промывкой, сушкой и обработкой препаратами, препятствующими слеживанию и слипанию полимерных покрытий. Среди этих операций больше всего затрат времени и энергии приходится на осуществление операции сушки. В статье рассматриваются способы сушки пожарных рукавов. Изложены требования к традиционной и искусственной сушке. Цель исследования заключается в поиске способов, позволяющих существенно сократить продолжительность процесса сушки пожарных рукавов. Предложен метод сушки, основанный на использовании диэлектрического нагрева. Данный метод отличается высоким КПД по преобразованию электрической энергии в тепловую (80–85 %) и высокими скоростями удаления влаги. Представлены схемы устройства сушки расправленного рукава внутри рукавной базы и СВЧ-аппликатора, представляющего собой резонаторную камеру, которая перемещается по направляющей. Делается вывод о том, что использование волновых способов нагрева при сушке пожарных рукавов позволит существенно снизить затраты времени и сил на обслуживание данного оборудования. Предложенные схемы СВЧ-сушилок камерного типа позволят проводить мероприятия, связанные с сушкой пожарных рукавов в помещениях, имеющих малую площадь. Отмечается, что в силу высокого коэффициента полезного действия ВЧ/СВЧ-оборудования по преобразованию электрической энергии в тепловую предложенный метод положительно скажется на снижении экономических затрат, связанных с обслуживанием пожарных рукавов.

Ключевые слова: напорные пожарные рукава, сушка рукавов, тепловая обработка, волновой нагрев.

POSSIBILITIES OF USING HF/MICROWAVE DRYING OF FIRE HOSES IN OPERATION AND MAINTENANCE CONDITIONS

A. L. NIKIFOROV, S. N. UL'EVA, I. A. LEGKOVA, N. Yu. NOVICHKOVA, I. Yu. SHARABANOVA

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education

«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

E-mail: anikiforoff@list.ru; jivotjagina@mail.ru; legkovai@mail.ru; n.nature@mail.ru; sharabanova@bk.ru

Ensuring the functionality of fire hoses in operational conditions is reduced to proper maintenance of these products, which is primarily determined by timely cleaning, rinsing, drying, and treatment with agents that prevent the polymer coatings from caking and sticking. Among these operations, drying is the most time-consuming and energy-intensive process. The article discusses methods for drying fire hoses. It outlines the requirements for traditional and artificial drying. The purpose of this research is to find ways to significantly reduce the drying time of fire hoses. A method for drying fire hoses based on the use of dielectric heating is proposed. This method is characterized by a high efficiency of converting electrical energy into thermal energy (80–85 %) and high rates of moisture removal. The article presents diagrams of a device for drying a straightened hose inside a hose base and a microwave applicator, which is a resonator chamber that moves along a guide. The authors conclude that the use of wave-based heating methods for drying of fire hoses can significantly reduce the time and effort required for maintenance of this equipment. The proposed diagrams of microwave chamber-type dryers allow for the drying of fire hoses in small-sized rooms. It is noted that due to the high efficiency of RF/microwave equipment for converting electrical energy into thermal energy, the proposed

method will have a positive effect on reducing the economic costs associated with the maintenance of fire hoses.

Key words: fire hoses, fire hoses drying, heat treatment, wave heating.

Одной из рутинных, но, тем не менее, ответственных работ, с которыми сталкиваются ежедневно пожарные, является обслуживание пожарных рукавов. После использования на пожаре рукава должны быть очищены от загрязнений и высушены. Данная технологическая операция необходима для удаления избыточной влаги и позволяет поддерживать прочность наружного защитного покрытия и гидроизоляционного слоя [1, 2].

Сушка пожарных рукавов производится на основании требований технических регламентов, в частности, технического регламента Евразийского экономического союза ТР ЕАЭС 043/2017 «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения»¹ и другой нормативной документации^{2, 3}.

Если процесс сушки напорных пожарных рукавов происходит вне помещения, то рукава подвешиваются в вертикальном положении или размещаются в развернутом состоянии на специальном решётчатом наклонном стеллаже с учетом того, чтобы оборудование не подвергалось воздействию солнечных лучей и осадков. При сушке в закрытых помещениях с отопительными приборами не допускается размещать пожарные рукава на расстоянии менее 1 м от приборов⁴.

Также запрещается производить просушивание при прямом контакте оборудования с отопительными приборами (батареями центрального отопления, котлами и т.д.).

Режим сушки пожарных рукавов определяется согласно рекомендациям завода-изготовителя. Полный цикл сушки продолжается в пределах 24 ч. После завершения процесса сушки производится скатывание пожарных рукавов методом одинарной или двойной скатки. Поскольку при долгом хранении рукавов в скатанном состоянии в них могут образоваться

заломы, рекомендуется производить их перекачку на другое ребро.

Из указанного видно, что лимитирующей стадией является процесс сушки, который занимает достаточно много времени. Сокращение продолжительности сушки пожарных рукавов положительно отразится на показателях боеготовности пожарных подразделений и, безусловно, является актуальной задачей [2].

Цель настоящего исследования заключалась в поиске способов, позволяющих существенно сократить продолжительность процесса сушки пожарных рукавов.

В настоящее время пожарные рукава обычно сушат естественным или искусственным способом. Традиционно сушка рукавов производится естественным образом, когда очищенные от загрязнений и промытые рукава развешиваются или раскладываются внутри помещения, либо на улице в защищённом от солнечных лучей месте. При этом температура окружающей среды должна быть не ниже 20 °С при влажности менее 80 %.

Искусственная сушка осуществляется принудительно в сушилках, где в качестве рабочей среды используется нагретый воздух. С этой целью могут быть использованы 2 типа сушилок: башенные и камерные. В сушилках первого типа (башенных) установлены калориферы или другие приборы для нагрева воздуха. Сушка пожарных рукавов происходит в подвешенном положении, плотность заполнения составляет 10-15 рукавов на 1 м².

Сушилки второго типа (камерные) используются для просушивания пожарных рукавов, свёрнутых в свободную скатку с зазорами 20-25 мм между витками⁵.

В настоящее время для сокращения продолжительности процесса используют устройства принудительной сушки (рис. 1).

¹ Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 23 июня 2017 г. №40 «О техническом регламенте Евразийского экономического союза «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения».

² ГОСТ Р 51049-2019 Техника пожарная. Рукава пожарные напорные. Общие технические требования. Методы испытаний.

³ ГОСТ Р 53277-2009 «Техника пожарная. Оборудование по обслуживанию пожарных рукавов. Общие технические требования. Методы испытаний».

⁴ Приказ МЧС России от 01.10.2020 № 737 «Об утверждении Руководства по организации материально-технического обеспечения Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (ред. от 17.10.2025).

⁵ <https://www.pogtehsnab.ru/rukava/sushka.htm>.

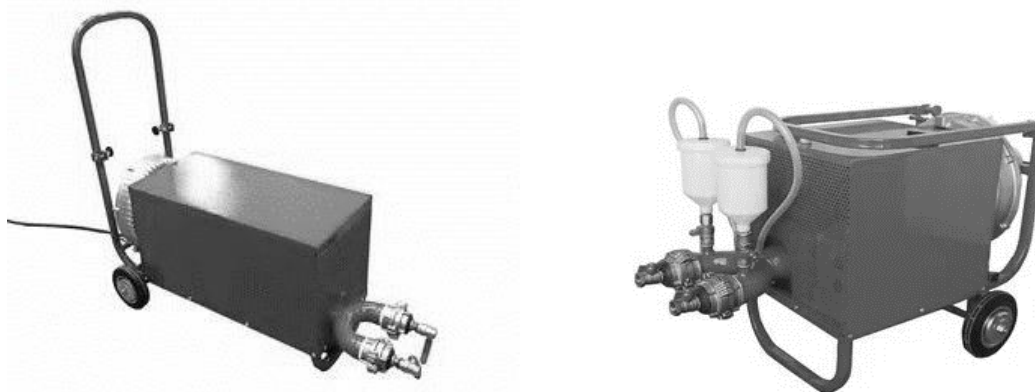


Рис. 1. Установка для сушки пожарных рукавов

Пожарные рукава различных типоразмеров и диаметром 150 мм после эксплуатации и мойки подвергаются сушке с помощью специальных сушильных установок АИСТ-1 и АИСТ-150⁶.

Для качественного просушивания внутренней поверхности пожарных рукавов после их применения на пожаре используется установка СР-3. При применении данной установки процесс сушки осуществляется путем направления потока нагретого воздуха на внутреннюю поверхность пожарного рукава⁷.

Следует отметить, что все перечисленные методы сушки имеют высокую продолжительность, исчисляющуюся часами при принудительной сушке и сутками при естественной. Кроме этого, установки, генерирующие горячий воздух, потребляют значительное количество электрической энергии, а сам процесс конвективной сушки имеет достаточно низкий коэффициент полезного действия, обычно не превышающий 30 %⁶.

В качестве альтернативного способа может быть предложена сушка пожарных рукавов, основанная на использовании диэлектрического нагрева [3-5]. Данный метод отличается высоким КПД по преобразованию электрической энергии в тепловую (80-85 %) и высокими скоростями удаления влаги.

Сущность метода заключается в том, что полярные молекулы или полярные фрагменты макромолекул при помещении в переменное электромагнитное поле высокой (ВЧ) или сверхвысокой (СВЧ) частоты, приходят в движение, стремясь занять положение в соответствии с направлением силовых линий поля. Следует отметить, что, чем выше частота внешнего поля, тем интенсивнее происходит

движение молекул, которое сопровождается выделением большого количества тепла, высвобождающегося за счет возникающего межмолекулярного трения.

В результате данного процесса в обрабатываемом материале будет выделяться мощность, которая, в соответствии с литературными данными [5-8], может быть рассчитана по формуле:

$$P_m = 0,55 \cdot 10^{-12} \cdot K \cdot f \cdot E^2 \text{ [Вт/м}^3\text{]},$$

где f – частота электромагнитного поля, Гц;

E – напряженность электромагнитного поля, $E = U/d$, [В/м]; здесь, соответственно, U – напряжение на обкладках аппликатора (конденсатора или стенках резонаторной СВЧ-камеры), В; d – расстояние между обкладками аппликатора, м;

K – фактор потерь, $K = \varepsilon \cdot \tan \delta$, ε и $\tan \delta$ – диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь обрабатываемого материала.

Особенностью протекания тепломассообменных процессов, инициированных нагревом не проводящих электрический ток материалов, является условие одинакового тепловыделения в каждой точке однородного обрабатываемого материала. Однако, при таком способе происходит нагрев только самого материала, что сказывается на распределении температурного поля внутри его объема – на поверхности температура оказывается ниже, чем в глубинных слоях из-за теплообмена с окружающим обрабатываемый объект воздухом. Именно это сказывается на показателе КПД процесса. Поэтому при разработке реальных установок сушки необходимо закладывать условие выбора потребляемой ВЧ/СВЧ-генератором мощ-

⁶ <https://www.tcpb.ru/oborudovanie/obslyuzhivanie-pozharnyh-rukavov/ustanovka-dlya-sushki-pozharnyh-rukavov-aist-1/>

⁷ <https://alero.ru/product/sr-3/>

ности. Мощность источника ($P_{и}$) ВЧ/СВЧ-энергии может быть рассчитана в соответствии с формулой:

$$P_{в} = 1,25P_{м},$$

в основе которой использовано ранее приведенное положение, показывающее количество генерируемой тепловой энергии ($P_{м}$) в диэлектрике, помещенном в электромагнитное поле [6, 7].

При разработке ВЧ/СВЧ-устройств выбор мощности определяет скорость сушки. В соответствии с работами [3-5] авторами было показано, что продолжительность сушки тяжелых тканей, таких как авизент арт. 4200 с поверхностной плотностью 400 г/м² и влажностью 100 %, составляет от 8 до 20 с, в то время как традиционная конвективная сушка подобных материалов на промышленном оборудовании занимает не менее 120 с.

Авторами в статье [9] приведены уравнения, позволяющие рассчитать продолжительность процесса сушки влажных материалов от начального влагосодержания W_0 до заданного текущего или равновесного (например, $W_p = 15\%$) в зависимости от мощности генератора. Уравнения имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} T_0 / T &= \exp(2,5W / W_0) \\ T / T_0 &= \exp(-2,5W / W_0) \end{aligned} \right\}'$$

где T_0 – время сушки до равновесного влагосодержания $W_p = 15\%$ для каждого режима сушки.

Кроме этого, авторами было выведено уравнение кинетики сушки применительно непосредственно к СВЧ-нагреву [9].

Таким образом, можно констатировать факт того, что процесс сушки пожарного рукава стандартной длины при использовании волновых источников нагрева будет составлять не более 10 мин. Кроме этого, такой вид обработки, в соответствии с эффектами, описанными в [3-5], должен положительно отразиться на повышении прочностных свойств полимерных покрытий пожарных рукавов.

Важным вопросом является разработка и расчет параметров емкостных аппликаторов для ВЧ-обработки и объемных резонаторов для СВЧ-процессов. На рис. 2 представлена схема устройства сушки расправленного рукава внутри рукавной базы. В данном случае параллельно вывешенному рукаву монтируется вертикальная направляющая (3), вдоль которой вверх-вниз перемещается ВЧ/СВЧ-аппликатор (2) внутри которого располагается рукав (1). Скорость сушки регулируется мощностью ВЧ/СВЧ-генератора и скоростью перемещения аппликатора.

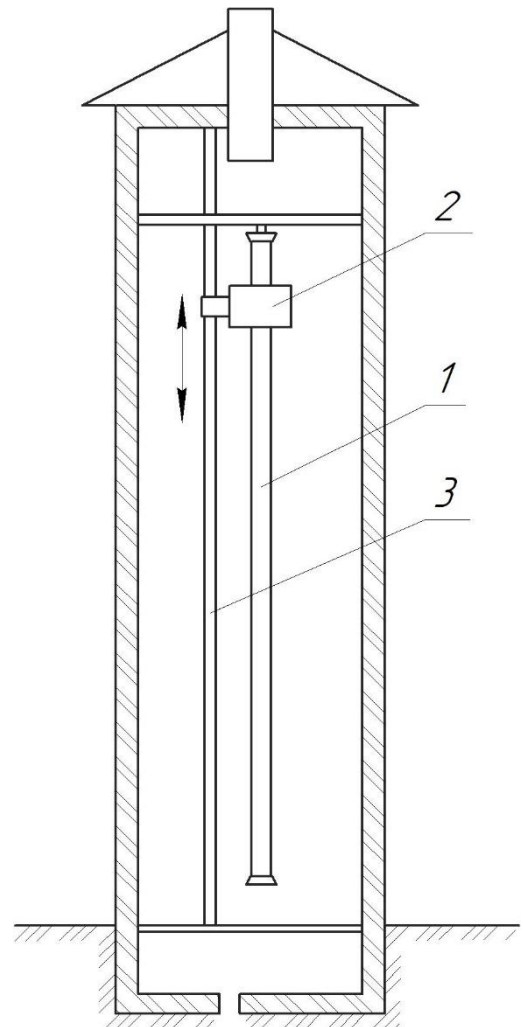


Рис. 2. Башенная сушилка с ВЧ/СВЧ-устройством:

- 1 – пожарный рукав;
- 2 – аппликатор с генератором (ВЧ или СВЧ);
- 3 – направляющая для перемещения ВЧ/СВЧ-устройства для сушки

На рис. 3 представлена схема СВЧ-аппликатора, который представляет собой резонаторную камеру (3), которая перемещается по направляющей (6). Гашение СВЧ-излучения происходит в патрубках (4). Гашению СВЧ-излучения также способствуют устройства расправки рукава из плоского состояния в трубу (5). СВЧ-генератор (2) выполнен по типу генератора бытовой СВЧ-печи, где может быть использован бытовой магнетрон мощностью от 0,8 до 1,5 кВт. Генератор крепится непосредственно на резонаторную камеру. Питание (220 В, 50 Гц) подается на генератор посредством кабеля, подключенного к обычной однофазной цепи.

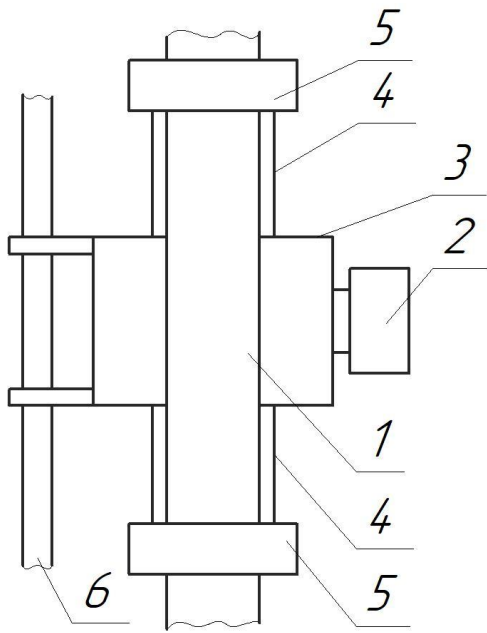


Рис. 3. СВЧ-аппликатор:

- 1 – пожарный рукав; 2 – СВЧ-генератор;
- 3 – СВЧ-резонаторная камера;
- 4 – устройство для гашения СВЧ-излучения;
- 5 – узел расправки рукава из плоского состояния в «трубу»;
- 6 – направляющая для перемещения СВЧ-устройства вдоль рукава

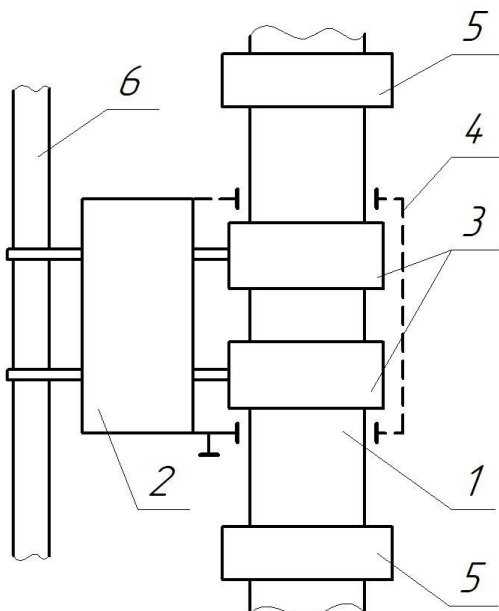


Рис. 4. ВЧ-аппликатор:

- 1 – пожарный рукав; 2 – ВЧ генератор;
- 3 – электроды; 4 – защитный заземленный экран;
- 5 – узел расправки рукава из плоского состояния в «трубу»;
- 6 – направляющая для перемещения ВЧ-устройства вдоль рукава

В качестве альтернативного варианта (рис. 4) вместо СВЧ-генератора может быть использован высокочастотный генератор (2), который подает питание на аппликатор, выполненный в виде пары кольцевых электродов (3), образующих конденсатор, в котором в качестве диэлектрика выступает пожарный рукав (1). Частота генератора может быть выбрана из линейки разрешенных для использования частот. Защита от ВЧ-излучения осуществляется помещением устройства в заземленный короб (4), выполненный из мелкоячеистой металлической сетки.

Основываясь на данных, изложенных в работах [3-5], использование волновых методов нагрева в ВЧ/СВЧ-диапазонах для сушки рукава длиной 20 м составит 240-300 с при потребляемой мощности 1 кВт.

Следует отметить, что сушка рукавов может быть реализована не в расправленном, а в свернутом (не плотно) виде. Для этого может быть использовано устройство, схема которого приведена на рис. 5. Такое устройство для сушки по своему строению схоже с бытовой СВЧ-печью. Свернутый рукав (1) помещается в резонаторную камеру (2). Полугайки (3) выводятся за пределы СВЧ-камеры (2) через отверстия (4) в дверце (5). СВЧ-генератор (6), оснащенный бытовым магнетроном мощностью 0,8-1,5 кВт, крепится непосредственно на резонаторной камере (2). В данном случае удаление влаги происходит как из объема материалов, которые способны ее впитывать, т.е. тканей текстильных основ, так и с поверхности полимерных материалов. Отметим, что вода обладает существенно более высоким фактором диэлектрических потерь, чем полимеры и текстильные материалы. Этот факт необходимо учитывать при выборе режимов волнового нагрева, чтобы при сушке пожарного рукава наиболее эффективным происходило удаление влаги и не приводило к перегреву полимеров.

Данное устройство предполагает периодическую обработку рукавных изделий. В реальных условиях может быть смонтировано необходимое количество камер, рассчитанных на сушку нескольких рукавов.

При расчёте ВЧ/СВЧ-аппликаторов осуществляется моделирование и оптимизация электродинамических и тепловых процессов, происходящих в СВЧ-камерах. Такие расчёты помогают осуществлять проектирование камер для СВЧ-обработки диэлектриков, например, для тепловой или нетепловой модификации материалов [10]. При проектировании данного оборудования важно учитывать тип СВЧ-камеры и ее габариты [11].

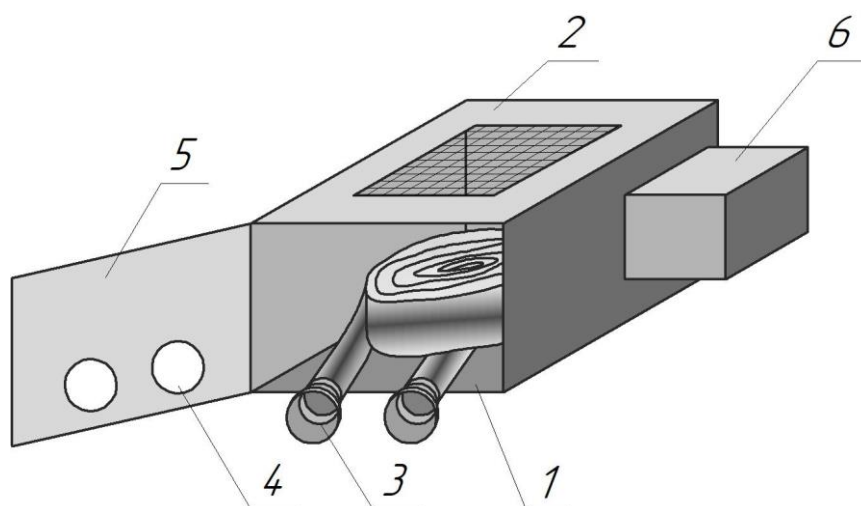


Рис. 5. Резонаторная камера для сушки скатанных пожарных рукавов:

1 – пожарный рукав; 2 – резонаторная камера; 3 – полугайки;
4 – отверстия; 5 – дверца; 6 – СВЧ-генератор

Следует отметить, что методы расчета СВЧ-камер могут быть различными, так, например, при расчете пирамидальной камеры с линейным раскрытием рупора применяется самосогласованная математическая модель с учётом поглощающей диэлектрической вставки [10].

Таким образом, по проделанной работе можно сделать следующие выводы:

– показано, что использование волновых способов нагрева при сушке пожарных рукавов позволит существенно снизить затраты

времени и сил на обслуживание данного оборудования;

– предложенные схемы СВЧ-сушилок камерного типа позволят проводить мероприятия, связанные с сушкой пожарных рукавов в помещениях, имеющих малую площадь;

– в силу высокого коэффициента полезного действия ВЧ/СВЧ-оборудования по преобразованию электрической энергии в тепловую предложенный метод положительно скажется на снижении экономических затрат, связанных с обслуживанием пожарных рукавов.

Список литературы

1. Семенов А. Д., Бубнов А. Г., Моисеев Ю. Н. Особенности сушки пожарных напорных рукавов диаметром более 150 мм // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2021. № 2 (39). С. 88–95.
2. Пожарные рукава – требования по производству, эксплуатации и хранению. Мировой опыт / Н. Ю. Новичкова, И. А. Легкова, С. Н. Ульева [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2024. № 1 (50). С. 84–91.
3. Никифоров А. Л., Мельников Б. Н. Применение токов высокой частоты в текстильном отделочном производстве // *Текстильная промышленность*. 2001. Часть I. № 5. С. 27–30.
4. Никифоров А. Л., Мельников Б. Н. Применение токов высокой частоты в текстильном отделочном производстве // *Текстильная промышленность*. 2001. Часть II. № 6. С. 29–30.
5. Никифоров А. Л., Шубина Е. В., Мельников Б. Н. Использование высокочастотного нагрева для интенсификации процессов

малосминаемой отделки хлопчатобумажных тканей // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 2001. № 6. С. 41–43.

6. Княжевская Н. П., Фирсова М. Г. *Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов*. Л.: Машиностроение, 1980. 293 с.

7. Глуханов Н. П. *Физические основы ВЧ-нагрева*. Л.: Машиностроение, 1989. 56 с.

8. Обеспечение пожарной безопасности технологических процессов переработки полимерных материалов на ВЧ/СВЧ-оборудовании / А. Л. Никифоров, О. Г. Циркина, С. Н. Ульева [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2020. № 4 (37). С. 111–117.

9. Ольшанский А. И., Ольшанский В. И., Жерносек С. В. Исследование СВЧ сушки тканей // *Вестник Витебского государственного технологического университета*. 2013. № 24. С. 55.

10. Расчет пирамидальной СВЧ-камеры с линейным раскрытием рупора / И. Н. Кижлай, А. А. Кураев, А. К. Синицын [и др.] // *Доклады Белорусского государственного универ-*

ситета информатики и радиоэлектроники. 2008. № 6 (36). С. 123–126.

11. Андрусевич Л. К., Беленький В. Г. Основы электродинамики. Новосибирск: СибГУТИ, 2000. 157 с.

References

1. Semenov A. D., Bubnov A. G., Moiseyev Yu. N. Osobennosti sushki pozharnykh napornykh rukavov diametrom boleye 150 mm [Features of drying fire pressure hoses with a diameter of more than 150 mm]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2021, vol. 2 (39), pp. 88–95.

2. Pozharnyye rukava – trebovaniya po proizvodstvu, ekspluatatsii i khraneniyu. Mirovoy opyt [Fire hoses – requirements for production, operation and storage. World experience] / N. Yu. Novichkova, I. A. Legkova, S. N. Ul'yeva [et al.]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2024, vol. 1 (50), pp. 84–91.

3. Nikiforov A. L., Mel'nikov B. N. Primeeniye tokov vysokoy chastoty v tekstil'nom otdelochnom proizvodstve [Application of high-frequency currents in textile finishing production]. *Tekstil'naya promyshlennost'*, 2001, chast' I, issue 5, pp. 27–30.

4. Nikiforov A. L., Mel'nikov B. N. Primeeniye tokov vysokoy chastoty v tekstil'nom otdelochnom proizvodstve [Application of high-frequency currents in textile finishing production]. *Tekstil'naya promyshlennost'*. 2001, chast' II, issue 6, pp. 29–30.

5. Nikiforov A. L., Shubina Ye. V., Mel'nikov B. N. Ispol'zovaniye vysokochastotnogo nagreva dlya intensivatsii protsessov

malosminayemoy otdelki khlopchatobumazhnykh tkaney [Using high-frequency heating to intensify the processes of low-wrinkle finishing of cotton fabrics]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2001, issue 6, pp. 41–43.

6. Knyazhevskaya N. P., Firsova M. G. *Vysokochastotnyy nagrev dielektricheskikh materialov* [High-frequency heating of dielectric materials]. L.: Mashinostroyeniye, 1980. 293 p.

7. Glukhanov N. P. *Fizicheskiye osnovy VCH-nagreva* [Physical principles of high-frequency heating]. L.: Mashinostroyeniye, 1989. 56 p.

8. Obespecheniye pozharnoy bezopasnosti tekhnologicheskikh protsessov pererabotki polimernykh materialov na VCH/SVCH-oborudovaniy [Ensuring fire safety of technological processes for processing polymeric materials on HF/microwave equipment] / A. L. Nikiforov, O. G. Tsirkina, S. N. Ul'yeva [et al.]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2020, vol. 4 (37), pp. 111–117.

9. Ol'shanskiy A. I., Ol'shanskiy V. I., Zhernosek S. V. Issledovaniye SVCH sushki tkaney [Study of microwave drying of fabrics]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, issue 24, p. 55.

10. Raschet piramidal'noy SVCH-kamery s lineynym raskryvom rupora [Calculation of a pyramidal microwave chamber with a linear aperture of the horn] / I. N. Kizhlay, A. A. Kurayev, A. K. Sinitsyn [et al.]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2008, vol. 6 (36), pp. 123–126.

11. Andrusевич Л. К., Беленький В. Г. *Osnovy elektrodinamiki* [Fundamentals of Electrodynamics]. Novosibirsk: SibGUTI, 2000. 157 p.

Никифоров Александр Леонидович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

доктор технических наук, профессор

E-mail: anikiforoff@list.ru

Nikiforov Alexander Leonidovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

Doctor of technical sciences, professor

E-mail: anikiforoff@list.ru

Ульева Светлана Николаевна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат химических наук, доцент

E-mail: jivotjagina@mail.ru

Ulyeva Svetlana Nikolaevna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
candidate of chemical sciences, associate professor
E-mail: jivotjagina@mail.ru

Легкова Ирина Анатольевна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
кандидат технических наук, доцент
E-mail: legkovai@mail.ru

Legkova Irina Anatolyevna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
candidate of technical sciences, associate professor
E-mail: legkovai@mail.ru

Новичкова Наталия Юрьевна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
доктор культурологии, профессор
E-mail: n.nature@mail.ru

Novichkova Natalia Yurievna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
doctor of cultural studies, professor
E-mail: n.nature@mail.ru

Шарабанова Ирина Юрьевна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
заместитель начальника академии по научной работе, кандидат медицинских наук, доцент

Sharabanova Irina Yurievna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Deputy Head of the Academy for Scientific Work, candidate of medical sciences, associate professor
E-mail: sharabanova@bk.ru

УДК: 614.84:678

DOI 10.48612/ntp/1hfg-hbht-m7ve

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ХРАНЕНИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛАСТИЧНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ НА ОСНОВЕ РАСЧЁТА ВРЕМЕНИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ОБОЛОЧКИ И ОБОСНОВАНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ

Г. Х. САМИГУЛЛИН, А. Е. ЗАХАРОВ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
E-mail: samigullin.gh@yandex.ru, frzakhsach@mail.ru

В статье рассмотрена проблема обеспечения пожарной безопасности при хранении нефтепродуктов в полимерных эластичных резервуарах. Показано, что при групповом размещении ПЭР пожар пролива одного резервуара может привести к тепловому воздействию на соседние резервуары, нагреву их оболочек и последующему распространению пожара.

Предложена методика обеспечения пожарной безопасности при хранении нефтепродуктов в ПЭР, основанная на расчёте времени воспламенения оболочки при тепловом воздействии пожара пролива и обосновании противопожарных разрывов между резервуарами. Методика учитывает параметры пожара пролива, расстояние до соседнего резервуара, теплофизические характеристики оболочки и возможность применения эластомерного защитного слоя, модифицированного астраленами.

В качестве экспериментальной базы использованы результаты термогравиметрических, механических и огневых испытаний исходного и модифицированного материалов. Установлено, что применение защитного слоя на основе эластомера с содержанием 10 % масс. астраленов повышает устойчивость материала к тепловому воздействию и увеличивает время до воспламенения оболочки. Разработанный алгоритм позволяет определять время достижения температуры воспламенения и минимальное безопасное расстояние между резервуарами. Предложенная методика может быть использована при проектировании объектов хранения нефтепродуктов в ПЭР и обосновании мероприятий по предотвращению эскалации пожара.

Ключевые слова: полимерный эластичный резервуар; ПЭР; нефтепродукты; пожар пролива; тепловой поток; прогрев оболочки; время воспламенения; противопожарные разрывы; эскалация пожара; защитное покрытие; астралены.

METHODOLOGY FOR ENSURING FIRE SAFETY DURING PETROLEUM PRODUCT STORAGE IN POLYMERIC ELASTIC RESERVOIRS BASED ON CALCULATING SHELL IGNITION TIME AND JUSTIFYING FIRE SEPARATION DISTANCES

G. Kh. SAMIGULLIN, A. E. ZAKHAROV

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Russian Federation, Saint Petersburg,
E-mail: samigullin.gh@yandex.ru, frzakhsach@mail.ru

The article addresses the problem of ensuring fire safety during the storage of petroleum products in polymeric elastic reservoirs (PERs). It is shown that, when PERs are arranged in groups, a pool fire resulting from the failure of one reservoir may cause thermal exposure to adjacent reservoirs, heating of their shells, and subsequent fire spread.

A fire safety methodology for petroleum product storage in PERs is proposed. The methodology is based on calculating the shell ignition time under thermal exposure from a pool fire and substantiating fire separation distances between reservoirs. The method takes into account pool fire parameters, the distance to an adjacent reservoir, the thermophysical properties of the shell, and the possibility of using an elastomeric protective layer modified with astralenes.

The experimental basis of the study includes the results of thermogravimetric, mechanical, and fire tests of both unmodified and modified materials. It was found that the application of an elastomeric protective layer containing 10 wt.% astralenes increases the material's resistance to thermal exposure and extends the

time to shell ignition. The developed calculation algorithm makes it possible to determine the time required to reach the shell ignition temperature and to establish the minimum safe distance between reservoirs. The proposed methodology can be applied in the design of petroleum product storage facilities using PERs and in the justification of measures aimed at preventing fire escalation.

Keywords: flexible polymer reservoir; PER; petroleum products; pool fire; heat flux; shell heating; ignition time; fire separation distances; fire escalation; protective coating; astralenes.

Введение

Полимерные эластичные резервуары применяются для хранения и транспортирования нефтепродуктов благодаря малой массе, мобильности, технологичности монтажа, меньшей себестоимости изготовления и эксплуатации, а также устойчивости к воздействию коррозионно-активных сред. Такие резервуары могут использоваться при создании мобильных резервуарных парков, временных складов и объектов оперативного хранения моторных топлив [1].

Вместе с тем применение полимерных эластичных резервуаров (далее – ПЭР) сопровождается рядом пожарно-технических ограничений. В отличие от традиционных стальных резервуаров, оболочки ПЭР изготавливаются из полимерных материалов, которые при тепловом воздействии пожара пролива способны нагреваться, терять прочность, воспламеняться и приводить к разгерметизации резервуара [2, 3]. При групповом размещении ПЭР это создаёт опасность распространения пожара на соседние резервуары и последующего развития аварийной ситуации [3].

Наиболее опасным для рассматриваемых условий является сценарий пожара пролива [3], при котором после разгерметизации одного резервуара образуется горящий пролив нефтепродукта, создающий лучистое тепловое воздействие на соседние ПЭР. Если расстояние между резервуарами недостаточно, оболочка соседнего резервуара может за расчётное время достигнуть температуры воспламенения. В этом случае локальный пожар одного резервуара может перейти в сценарий с вовлечением соседних резервуаров, создавая возможность эскалации пожара на территории нефтебазы.

Существующие расчётные подходы позволяют определять параметры пожара пролива, оценивать тепловое излучение пламени и принимать решения по обеспечению пожарной безопасности объектов хранения нефтепродуктов [4, 5]. Однако применительно к ПЭР требуется дополнительный учёт особенностей полимерной оболочки: её теплофизических характеристик, малой тепловой инерции, температуры воспламенения, изменения свойств при нагреве, а также возможности применения модифицированного защитного слоя.

В работе рассматривается сценарий пожара пролива при разгерметизации одного ПЭР и тепловом воздействии на соседний резервуар. В качестве основного опасного фактора пожара учитывается лучистый тепловой поток.

В связи с этим актуальной является разработка методики, позволяющей связать параметры пожара пролива, свойства оболочки ПЭР и время её воспламенения с обоснованием противопожарных разрывов между резервуарами. Такая методика должна обеспечивать выбор инженерных решений по предотвращению эскалации пожара, включая увеличение расстояния между резервуарами и применение защитных покрытий.

Цель статьи – разработка методики обеспечения пожарной безопасности при хранении нефтепродуктов в ПЭР, основанной на расчёте времени воспламенения оболочки при тепловом воздействии пожара пролива и обосновании противопожарных разрывов между резервуарами.

Для достижения поставленной цели выполнены: обоснование расчётного сценария пожара пролива, определение экспериментальных характеристик материалов, разработка алгоритма расчёта времени воспламенения оболочки ПЭР и методики определения минимального безопасного расстояния между резервуарами.

Научная новизна работы заключается в разработке расчётной методики, связывающей параметры пожара пролива нефтепродукта, теплофизические характеристики оболочки ПЭР, наличие модифицированного эластомерного покрытия и время достижения температуры воспламенения с определением минимального безопасного расстояния между резервуарами.

Материалы и методы исследования *Расчётный сценарий пожара пролива*

В качестве расчётного сценария рассматривается неблагоприятная аварийная ситуация, связанная с разгерметизацией одного полимерного эластичного резервуара, образованием пролива нефтепродукта и последующим воспламенением пролива [3]. В расчёте принимается вариант развития аварии, при

котором пожар пролива формирует лучистое тепловое воздействие на соседний ПЭР и может привести к прогреву его оболочки до температуры воспламенения. Такой сценарий принят как определяющий для оценки возможности вовлечения соседнего ПЭР в пожар.

Расчётная последовательность развития аварийной ситуации принимается следующей: разгерметизация одного ПЭР – образование пролива нефтепродукта – воспламенение пролива – тепловое воздействие на соседний

резервуар – прогрев полимерной оболочки – достижение температуры воспламенения оболочки – возможное вовлечение соседнего ПЭР в пожар. В рамках настоящей статьи под эскаляцией пожара понимается переход от локального пожара пролива одного резервуара к сценарию с вовлечением соседних резервуаров под действием теплового излучения [3].

Расчётная схема теплового воздействия пожара пролива на оболочку соседнего ПЭР представлена на рис. 1.

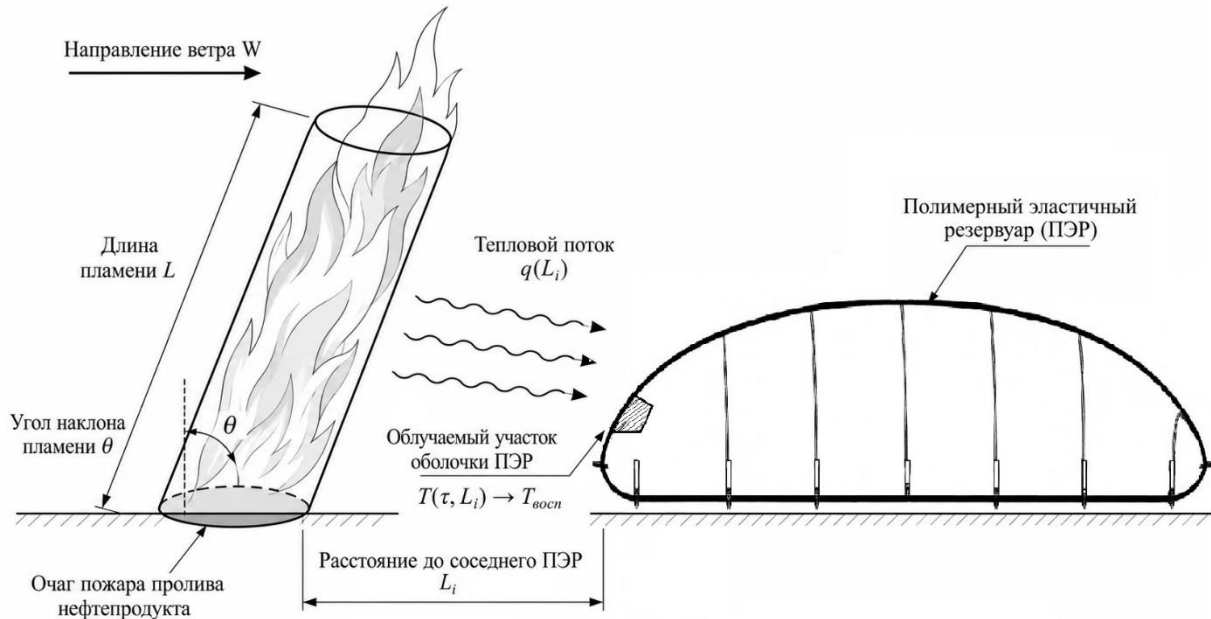


Рис. 1. Расчётная схема теплового воздействия пожара пролива на оболочку соседнего ПЭР

Для выбора наиболее неблагоприятного варианта предварительно оценивалось тепловое воздействие пожара пролива бензина [3, 4]. В качестве расчётного сценария рассматривается пожар пролива нефтепродукта, приводящий к тепловому воздействию на оболочку соседнего ПЭР. Целью расчёта является определение времени достижения температуры воспламенения оболочки в зависимости от расстояния между резервуарами и свойств защитного покрытия. Поэтому пожар пролива бензина принят в качестве неблагоприятного расчётного сценария для дальнейшего определения теплового воздействия на оболочку соседнего ПЭР.

В рамках рассматриваемого сценария основным опасным воздействием на соседний резервуар является лучистый тепловой поток от пламени пожара пролива [4, 5]. Его воздействие приводит к повышению температуры наружной поверхности оболочки ПЭР, последующему прогреву материала и возможному достижению температуры воспламенения. При этом опасность определяется не только величиной теплового потока, но и временем его

действия, теплофизическими свойствами оболочки, наличием защитного покрытия и расстоянием между резервуарами.

Критерием безопасности принимается условие, при котором за расчётное время теплового воздействия оболочка соседнего ПЭР не достигает температуры воспламенения. Если данное условие выполняется, расстояние между резервуарами рассматривается как достаточное для предотвращения вовлечения в пожар соседнего ПЭР. Если температура воспламенения достигается, возникает возможность эскаляции пожара, что требует увеличения противопожарного разрыва, применения модифицированного защитного покрытия либо совместного использования указанных мер.

Таким образом, расчётный сценарий пожара пролива является исходной основой для последующего построения методики. Он позволяет перейти от общей оценки пожарной опасности ПЭР к количественному определению теплового потока, времени воспламенения оболочки и минимального безопасного расстояния между резервуарами.

Экспериментальные характеристики материалов, используемые в расчёте

В качестве исходных данных для расчётной методики использованы экспериментально определённые характеристики материала оболочки ПЭР и модифицированного эластомерного защитного слоя. Указанные характеристики необходимы для расчёта прогрева оболочки, определения времени достижения температуры воспламенения и обоснования минимального безопасного расстояния между резервуарами.

В качестве исходного варианта рассматривалась оболочка ПЭР на основе термопластичного полиуретана (ТПУ) [2, 6]. В качестве модифицированного варианта рассматривалась оболочка с защитным слоем на основе эластомера TIP TOP Solution MTR-NF REMA (далее эластомер REMA), модифицированного астраленами [9–11]. Модифицированный слой использовался для оценки влияния защитного покрытия на процесс прогрева оболочки и на время достижения температуры воспламенения.

В расчёте учитывались термические, механические и пожарно-технические характеристики материалов: температура начала термического разложения, остаточная масса после нагрева, предел прочности, модуль Юнга, время до воспламенения и температуру в момент воспламенения или окончания испытания.

Наиболее выраженный эффект в исследованном диапазоне концентраций получен при содержании астраленов 10 % масс. [9, 10]. При данной концентрации остаточная масса материала при 800 °С увеличилась с 3,3 до 29,7 %, предел прочности возрос в 2,8 раза, а модуль Юнга – в 3,2 раза [9]. Указанный состав принят в качестве модифицированного варианта для дальнейших расчётов.

Экспериментальные характеристики модифицированного эластомера REMA были получены в ходе проведённых термогравиметрических, механических и огневых испытаний [9-11]. Сводные экспериментальные характеристики исходной оболочки и модифицированного эластомерного слоя, используемые в расчётной методике, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Экспериментальные характеристики материалов, используемые в расчётной методике

Показатель	Исходная оболочка ПЭР на основе ТПУ	Модельный эластомер REMA + 10 % масс. астраленов
Температура начала активной термодеструкции, °С	285,7	336
Температура максимальной скорости потери массы, °С	293,8 / 411,0	400
Время до воспламенения при огневом воздействии, с	210	не менее 420
Температура в момент воспламенения / окончания испытания, °С	240	более 285

Огневые испытания подтвердили различие поведения исходного и модифицированного вариантов при тепловом воздействии. Исходный образец ТПУ воспламенился через 210 с при температуре около 240 °С. Образец с покрытием на основе эластомера REMA, содержащего 10 % масс. астраленов, в пределах эксперимента не воспламенился: испытание было остановлено на 420-й секунде при температуре более 285°С [11].

Полученные характеристики используются в расчётной методике для задания теплофизических параметров оболочки и защитного слоя, определения критических условий вос-

пламенения и сопоставления исходного и модифицированного вариантов ПЭР.

Алгоритм расчёта времени воспламенения оболочки

Для определения условий возможного вовлечения соседнего ПЭР в пожар разработан расчётный алгоритм оценки времени достижения температуры воспламенения полимерной оболочки при тепловом воздействии пожара пролива [12]. Алгоритм позволяет рассматривать два варианта: исходную оболочку ПЭР без дополнительной защиты и оболочку с модифицированным эластомерным защитным покрытием.

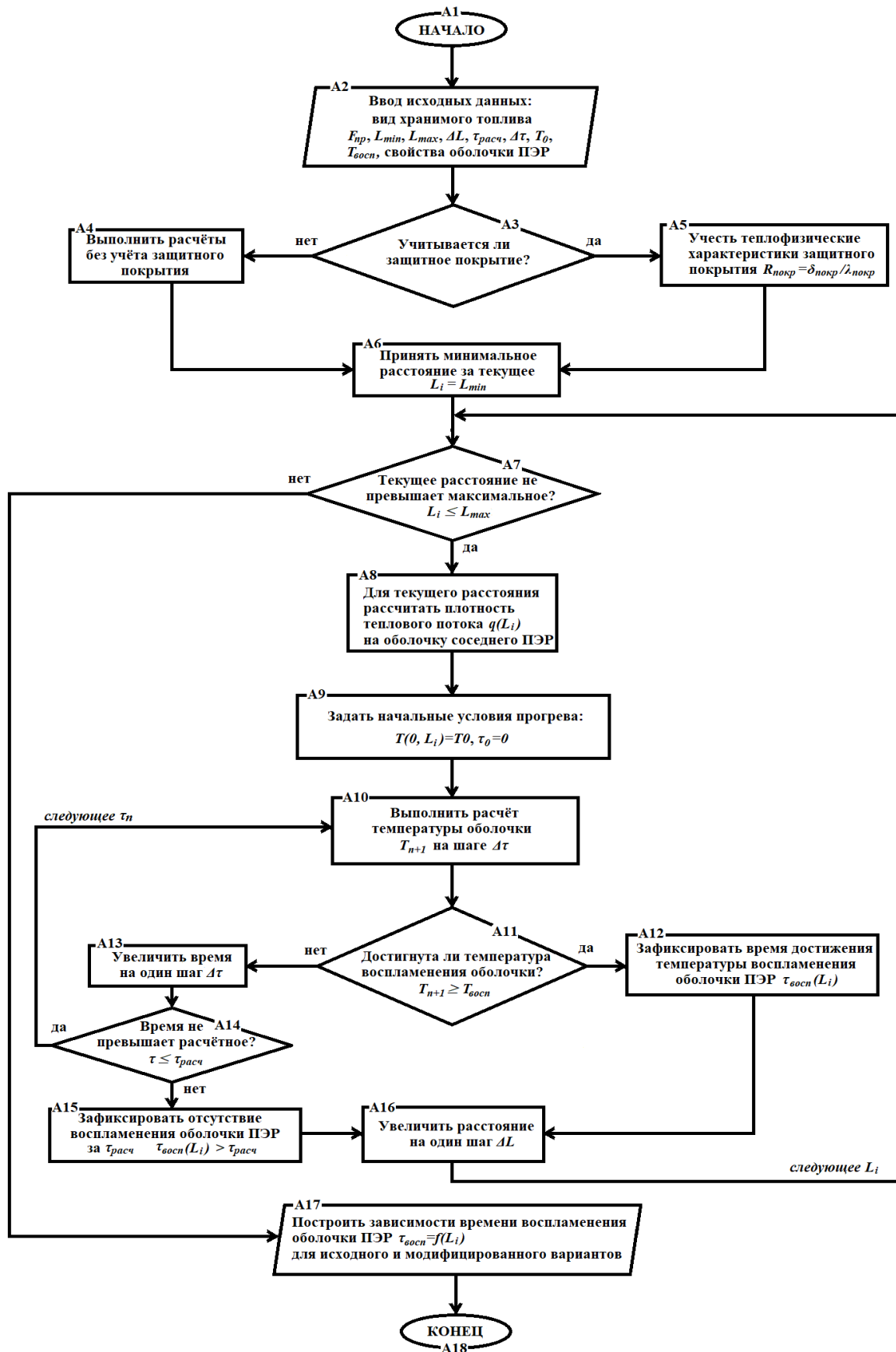


Рис. 2. Расчётный алгоритм определения времени воспламенения оболочки ПЭР при тепловом воздействии пожара пролива

Структура расчётного алгоритма представлена на рис. 2. Алгоритм включает пошаговый расчёт по расстоянию L_i и пошаговый расчёт по времени τ_n . Для каждого значения расстояния рассчитывается плотность теплового потока $q(L_i)$, после чего выполняется расчёт температуры оболочки до достижения температуры воспламенения либо до окончания расчётного времени $\tau_{расч}$.

На рис. 2 в блоках А1–А2 задаются исходные данные: вид топлива, площадь пролива $F_{пр}$, диапазон расстояний $L_{min}–L_{max}$, шаг по расстоянию ΔL , расчётная продолжительность теплового воздействия $\tau_{расч}$, шаг по времени Δt , начальная температура T_0 , температура воспламенения $T_{восп}$ и свойства оболочки ПЭР. В блоках А3–А5 выбирается расчётный вариант: без защитного покрытия или с учётом модифицированного защитного слоя. В блоках А6–А17 реализуется расчёт для заданного диапазона расстояний и формируется зависимость $T_{восп}=f(L_i)$. Тепловое сопротивление защитного покрытия определяется по выражению:

$$R_{покр} = \frac{\delta_{покр}}{\lambda_{покр}}, \quad (1)$$

где $R_{покр}$ – тепловое сопротивление покрытия, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $\delta_{покр}$ – толщина покрытия, м; $\lambda_{покр}$ – коэффициент теплопроводности покрытия, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

На следующем этапе рассчитывается плотность лучистого теплового потока от пожара пролива, воздействующего на оболочку соседнего резервуара [4, 5, 12]:

$$q(L_i) = E_f \cdot \psi(L_i) \cdot \varphi, \quad (2)$$

где $q(L_i)$ – плотность лучистого теплового потока на расстоянии L_i , $\text{кВт}/\text{м}^2$; E_f – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, $\text{кВт}/\text{м}^2$; $\psi(L_i)$ – угловой коэффициент облучённости оболочки ПЭР; φ – коэффициент пропускания атмосферы [4, 5, 12].

Для учёта различий между исходной оболочкой и модифицированным защитным покрытием в расчёт вводится эффективная степень черноты облучаемой поверхности. В исходном варианте она принимается для поверхности полимерной оболочки, в модифицированном варианте – для наружной поверхности защитного покрытия.

На последнем этапе определяется прогрев оболочки во времени [12]. Для этого используется нестационарный тепловой баланс, учитывающий поступающий тепловой поток, теплоотдачу от наружной поверхности в окружающую среду и теплоотвод внутрь резервуара к нефтепродукту. Для инженерной оценки

прогрева оболочки используется сосредоточенная тепловая модель [12], в которой температура рассматриваемого участка оболочки принимается усреднённой по толщине. Такое допущение позволяет связать поступающий тепловой поток, теплоёмкость материала, толщину оболочки и теплоотвод к окружающей среде и нефтепродукту:

$$c \cdot \rho \cdot \delta \cdot \frac{dT}{d\tau} = q_{воспр}(L_i) - \left(\alpha_k + \frac{\lambda_f}{\delta_f} \right) \cdot (T - T_0), \quad (3)$$

где c – теплоёмкость материала оболочки, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; ρ – плотность материала оболочки, $\text{кг}/\text{м}^3$; δ – толщина оболочки, м; T – температура оболочки, $^{\circ}\text{C}$; τ – время теплового воздействия, с; $q_{воспр}(L_i)$ – тепловой поток, воспринимаемый оболочкой на расстоянии L_i , $\text{Вт}/\text{м}^2$; α_k – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; λ_f – коэффициент теплопроводности нефтепродукта, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; δ_f – высота заполнения резервуара нефтепродуктом, м; T_0 – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

Для численной реализации расчёта уравнение записывается в пошаговой форме:

$$T_{n+1} = T_n + \frac{\Delta\tau}{c \cdot \rho \cdot \delta} \cdot \left[q_{воспр}(L_i) - \left(\alpha_k + \frac{\lambda_f}{\delta_f} \right) \cdot (T_n - T_0) \right], \quad (4)$$

где T_n – температура оболочки на текущем временном шаге, $^{\circ}\text{C}$; T_{n+1} – температура оболочки на следующем временном шаге, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta\tau$ – шаг расчёта по времени, с.

На пятом этапе для каждого расчётного расстояния выполняется проверка условия достижения температуры воспламенения оболочки. Если температура оболочки достигает или превышает температуру воспламенения, фиксируется соответствующее время:

$$\tau_{восп}(L_i) = \min\{\tau_n: T(\tau_n, L_i) \geq T_{восп}\}, \quad (5)$$

где $\tau_{восп}(L_i)$ – время достижения температуры воспламенения оболочки на расстоянии L_i , с; $T_{восп}$ – температура воспламенения материала оболочки, $^{\circ}\text{C}$.

Если за расчётную продолжительность теплового воздействия температура оболочки не достигает температуры воспламенения, принимается условие:

$$\tau_{восп}(L_i) > \tau_{расч} \quad (6)$$

где $\tau_{расч}$ – расчётная продолжительность теплового воздействия, с.

Таким образом, результатом работы алгоритма является зависимость времени достижения температуры воспламенения оболочки от расстояния до очага пожара пролива. Эта зависимость используется далее для оценки достаточности фактического расстояния между

резервуарами и последующего обоснования противопожарных разрывов.

Методика обоснования противопожарных разрывов

Разработанный алгоритм расчёта времени воспламенения оболочки ПЭР используется как расчётная основа методики обоснования противопожарных разрывов между резервуарами [12]. Методика предназначена для оценки достаточности фактического расстояния между ПЭР при пожаре пролива и выбора инженерных мер, направленных на предотвращение вовлечения соседних резервуаров в пожар. Общая схема методики обоснования противопожарных разрывов и выбора мер защиты представлена на рис. 3.

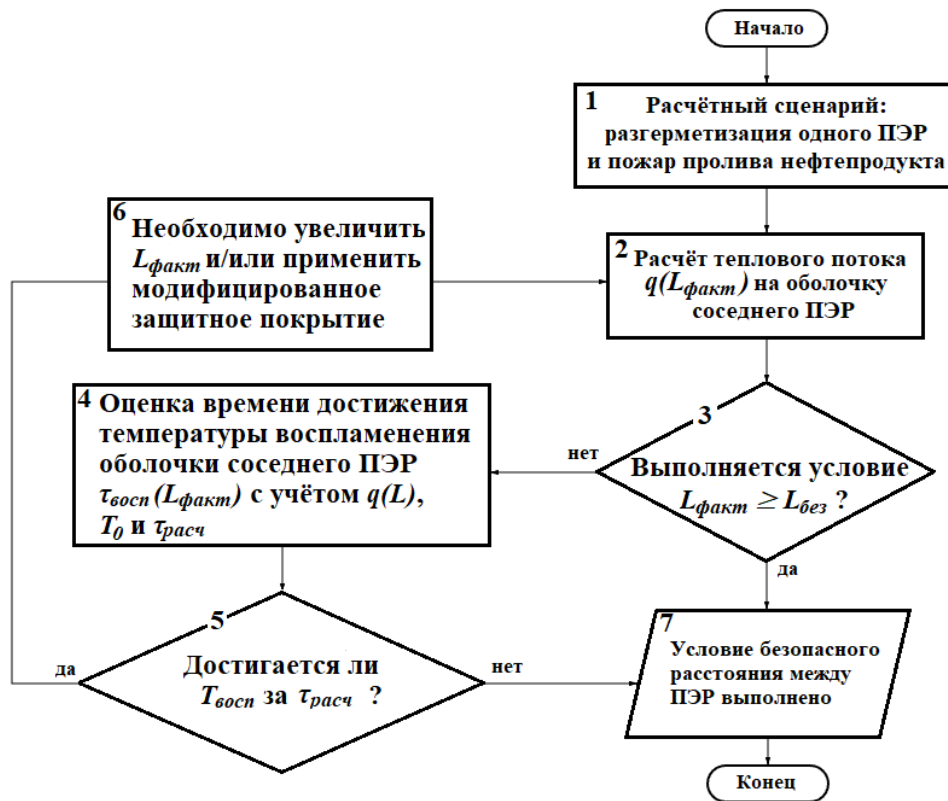


Рис. 3. Методика обоснования противопожарных разрывов и выбора мер защиты при хранении моторных топлив в ПЭР [12]

На рис. 3 блок 1 задаёт расчётный сценарий пожара пролива. В блоке 2 определяется тепловой поток на оболочку соседнего ПЭР. В блоке 3 проверяется выполнение условия $L_{факт} \geq L_{без}$. Если условие выполняется, методика завершается выводом о достаточности расстояния между резервуарами. Если условие не выполняется, в блоке 4 проводится оценка времени достижения температуры воспламенения

оболочки соседнего ПЭР $\tau_{восп}(L_{факт})$ с учётом $q(L)$, T_0 и $\tau_{расч}$.

В блоке 5 проверяется достижение температуры воспламенения за расчётное время. При положительном результате в блоке 6 принимается решение об увеличении расстояния между ПЭР и/или применении модифицированного защитного покрытия, после чего расчёт повторяется.

На первом этапе задаётся расчётный сценарий аварии: разгерметизация одного ПЭР, образование пролива нефтепродукта, воспламенение пролива и тепловое воздействие на соседний резервуар. В качестве основного опасного фактора рассматривается лучистый тепловой поток от пламени пожара пролива.

На втором этапе задаются исходные данные для расчёта: вид нефтепродукта, площадь пролива, расстояние между резервуарами, температура окружающей среды, продолжительность теплового воздействия, свойства материала оболочки, температура воспламенения, а также наличие или отсутствие модифицированного защитного покрытия. Для варианта с защитным покрытием дополнительно учитываются его толщина, коэффициент теплопроводности и эффективная степень черноты наружной поверхности.

На третьем этапе для каждого рассматриваемого расстояния определяется плотность теплового потока, воздействующего на оболочку соседнего ПЭР. Далее рассчитывается изменение температуры оболочки во времени и определяется момент достижения температуры воспламенения. В результате для каждого расстояния L_i формируется значение времени воспламенения $\tau_{восп}(L_i)$.

Критерием достаточности расстояния принимается условие, при котором время достижения температуры воспламенения оболочки превышает расчётную продолжительность теплового воздействия:

$$\tau_{восп}(L_{факт}) > \tau_{расч} \quad (7)$$

где $\tau_{восп}(L_{факт})$ – время достижения температуры воспламенения оболочки при фактическом расстоянии между резервуарами, с;
 $L_{факт}$ – фактическое расстояние между очагом пожара пролива и соседним ПЭР, м;
 $\tau_{расч}$ – расчётная продолжительность теплового воздействия, с.

Если данное условие выполняется, фактическое расстояние между резервуарами считается достаточным для предотвращения вовлечения соседнего ПЭР в пожар. Если условие не выполняется, то существует риск достижения оболочки температуры воспламенения в пределах расчётного времени воздействия, что указывает на возможность эскалации пожара.

Минимальное безопасное расстояние определяется как наименьшее из рассматриваемых расстояний [12], при котором температура оболочки не достигает температуры воспламенения за расчётное время теплового воздействия:

$$L_{без} = \min\{L_i: \tau_{восп}(L_i) > \tau_{расч}\}, \quad (8)$$

где $L_{без}$ – минимальное безопасное расстояние между резервуарами, м; L_i – рассматриваемое расстояние между очагом пожара пролива и соседним ПЭР, м; $\tau_{восп}(L_i)$ – время достижения температуры воспламенения оболочки при расстоянии L_i , с.

Проверка фактического размещения резервуаров выполняется по условию:

$$L_{факт} \geq L_{без} \quad (9)$$

Если $L_{факт} \geq L_{без}$, размещение резервуаров принимается допустимым по условию предотвращения воспламенения оболочки соседнего ПЭР. Если $L_{факт} < L_{без}$, расстояние между резервуарами считается недостаточным, и требуется принятие дополнительных мер пожарной безопасности.

В качестве таких мер методика предусматривает два основных варианта. Первый вариант – увеличение противопожарного разрыва между резервуарами до значения, при котором выполняется условие безопасности. Второй вариант – применение модифицированного защитного покрытия, повышающего устойчивость оболочки к тепловому воздействию и увеличивающего время до достижения температуры воспламенения. В практических условиях возможно совместное применение указанных мер: корректировка расстояния между ПЭР и использование защитного покрытия на основе эластомерного материала, модифицированного астраленами.

Расчёт выполняется отдельно для исходной оболочки и для оболочки с модифицированным защитным слоем. Сопоставление двух вариантов позволяет определить, как изменение пожарно-технических и теплофизических характеристик материала влияет на время воспламенения и требуемую величину противопожарного разрыва. За счёт этого методика позволяет перейти от лабораторно установленных характеристик материала к инженерному решению по безопасному размещению резервуаров.

Таким образом, методика обоснования противопожарных разрывов между ПЭР основана на последовательной связи: пожар пролива – тепловой поток – прогрев оболочки – время воспламенения – безопасное расстояние – выбор меры защиты. Такой подход позволяет оценивать условия предотвращения эскалации пожара при групповом размещении ПЭР и использовать расчётные результаты при проектировании объектов хранения нефтепродуктов. Для демонстрации работоспособности предложенной методики выполнен расчёт времени

воспламенения оболочки ПЭР для сценария пожара пролива бензина площадью 1000 м² при температуре окружающей среды 20 °С [3, 4, 12]. Расчёт выполнен в диапазоне расстояний от 5 до 50 м с шагом 5 м для исходного и модифицированного вариантов оболочки.

Результаты и обсуждение.
Сравнение исходного
и модифицированного варианта

Сравнение исходного и модифицированного варианта выполнялось для оценки

влияния защитного эластомерного слоя, модифицированного астраленами, на устойчивость оболочки ПЭР к тепловому воздействию пожара пролива. В качестве исходного варианта рассматривалась оболочка ПЭР на основе ТПУ без дополнительной защиты. В качестве модифицированного варианта рассматривалась оболочка с нанесённым защитным слоем на основе эластомера REMA, содержащего 10 % масс. астраленов.

Таблица 2. Результаты расчёта времени воспламенения оболочки ПЭР при различных расстояниях от границы пожара пролива

L Расстояние до границы пожара пролива, м.	q Тепловой поток, кВт/м ²	τ_{восп} (без защиты), Исходный, с.	τ_{восп} (с защитой), Модифицированный, с.
5,0	96,8	8,0	14,0
10,0	75,9	10,0	18,0
15,0	61,5	13,0	22,0
20,0	50,7	16,0	27,0
25,0	42,3	19,0	33,0
30,0	35,7	22,0	40,0
35,0	30,3	27,0	48,0
40,0	26,0	31,0	57,0
45,0	22,5	37,0	68,0
50,0	19,6	43,0	80,0

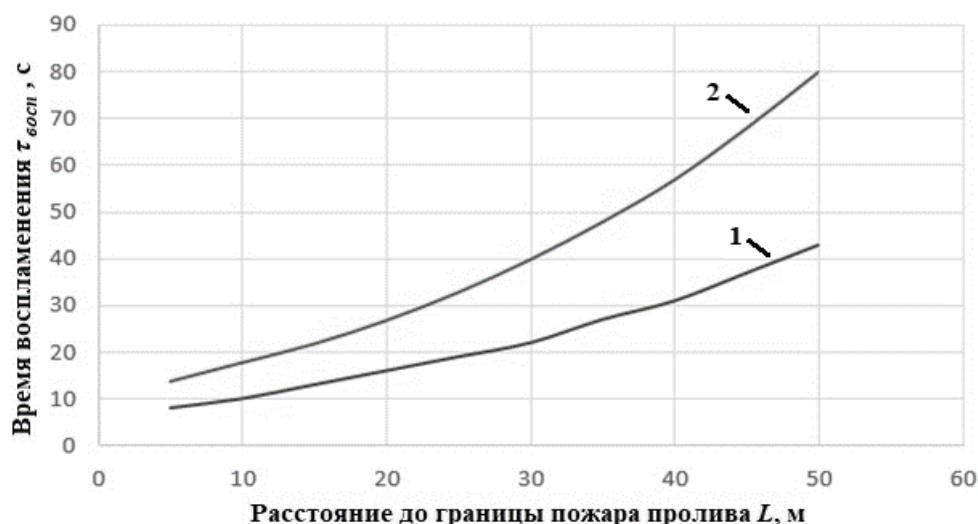


Рис. 4. Зависимость времени воспламенения оболочки ПЭР от расстояния до границы пожара пролива: линия 1 – исходная оболочка, линия 2 – оболочка с модифицированным защитным покрытием

Полученные расчётные данные позволяют оценить влияние расстояния между резервуарами и применения модифицированного защитного покрытия на время достижения температуры воспламенения оболочки ПЭР.

Расчёт выполнен для сценария пожара пролива бензина площадью 1000 м² при температуре окружающей среды 20 °С. Диапазон расстояний от границы пролива до соседнего резервуара составил от 5 до 50 м с шагом 5 м.

Результаты расчёта представлены в табл. 2 и на рис. 4. Установлено, что с увеличением расстояния от очага пожара плотность падающего теплового потока закономерно снижается с 96,8 до 19,6 кВт/м². Одновременно наблюдается увеличение времени достижения температуры воспламенения оболочки как для исходного варианта, так и для варианта с защитным покрытием.

Для исходной оболочки время воспламенения увеличивается с 8 до 43 с при изменении расстояния от 5 до 50 м. Для модифицированного варианта аналогичный показатель возрастает с 14 до 80 с. Таким образом, применение защитного покрытия обеспечивает увеличение времени воспламенения в 1,75-1,9 раза во всём рассматриваемом диапазоне расстояний.

Анализ полученных зависимостей показывает, что по мере увеличения расстояния между резервуарами абсолютный выигрыш по времени воспламенения возрастает. Если на расстоянии 5 м дополнительный резерв времени составляет 6 с, то на расстоянии 50 м он достигает 37 с. Это связано со снижением плотности теплового потока и более выраженным влиянием теплоизоляционных свойств защитного слоя на процесс прогрева оболочки.

Представленные зависимости могут использоваться для определения минимального безопасного расстояния между резервуарами по условию $\tau_{\text{восп}}(L_i) > \tau_{\text{расч}}$. При заданной продолжительности теплового воздействия значение $L_{\text{без}}$ определяется как минимальное расстояние, при котором температура оболочки не достигает температуры воспламенения в течение расчётного времени.

При $\tau_{\text{расч}}=60$ с для исходной оболочки минимальное безопасное расстояние в рассмотренном диапазоне 5–50 м не достигается, поскольку даже при $L=50$ м время воспламенения составляет $\tau_{\text{восп}}=43$ с, что меньше расчётной продолжительности теплового воздействия. Для модифицированного варианта условие $\tau_{\text{восп}} > \tau_{\text{расч}}$ выполняется при расстоянии не менее 45 м: при $L=40$ м $\tau_{\text{восп}}=57$ с, а при $L=45$ м $\tau_{\text{восп}}=68$ с. Следовательно, для заданных исходных условий минимальное безопасное расстояние для оболочки с модифицированным защитным покрытием составляет $L_{\text{без}}=45$ м.

Для исходного варианта требуется либо увеличение расстояния более 50 м, либо применение дополнительных мер защиты, поскольку в заданном диапазоне расстояний условие безопасности не выполняется.

Полученные результаты подтверждают возможность использования расчётной зависимости $\tau_{\text{восп}}=f(L)$, получаемой в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 2 [12], для

обоснования минимально допустимых расстояний между резервуарами. При заданной продолжительности теплового воздействия можно определить расстояние, при котором температура оболочки не достигает температуры воспламенения, либо оценить необходимость применения модифицированного защитного покрытия для предотвращения эскалации пожара.

При одинаковом тепловом воздействии от пожара пролива исходная оболочка быстрее достигает критического состояния, тогда как защитный слой замедляет прогрев основной полимерной оболочки. Это связано с дополнительным тепловым сопротивлением покрытия, изменением излучательных свойств поверхности и образованием углеродистого остатка, выполняющего барьерную функцию [7–10].

Использование указанных зависимостей в рамках методики, представленной на рис. 3, позволяет определять безопасные расстояния между резервуарами и оценивать эффективность применения защитного покрытия на стадии проектирования.

Таким образом, сопоставление исходного и модифицированного варианта показывает, что применение защитного слоя с астраленами повышает устойчивость оболочки ПЭР к тепловому воздействию пожара пролива [9–11], увеличивает время до воспламенения оболочки и создаёт расчётное основание для обоснования безопасных расстояний между резервуарами.

Заключение

В результате исследования разработана методика обеспечения пожарной безопасности при хранении нефтепродуктов в полимерных эластичных резервуарах, основанная на последовательной оценке теплового воздействия пожара пролива, прогрева оболочки, времени достижения температуры воспламенения и минимального безопасного расстояния между резервуарами. В качестве критерия безопасности принято условие, при котором время достижения температуры воспламенения оболочки соседнего ПЭР превышает расчётную продолжительность теплового воздействия.

Показано, что определяющим фактором возможной эскалации пожара при групповом размещении ПЭР является лучистый тепловой поток от пожара пролива, вызывающий прогрев полимерной оболочки соседнего резервуара. Использование расчётной зависимости $\tau_{\text{восп}} = f(L)$ позволяет оценивать достаточность фактического расстояния между резервуарами и определять необходимость дополнительных мер защиты.

Установлено, что применение эластомерного защитного слоя REMA, модифи-

цированного 10 % масс. астраленов, повышает устойчивость оболочки ПЭР к тепловому воздействию и увеличивает время до воспламенения по сравнению с исходным материалом [9–11]. Полученные экспериментальные характеристики использованы в расчётном алгоритме, позволяющем перейти от лабораторных данных к инженерному обоснованию противопожарных разрывов. Так, при $\tau_{расч}=60$ с для рассмотренных исходных условий минимальное безопасное расстояние для оболочки с модифицированным защитным покрытием сос-

тавило $L_{без}=45$ м, тогда как для исходной оболочки в диапазоне 5–50 м условие безопасности не выполняется.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании объектов хранения нефтепродуктов, выборе компоновки резервуарного парка и обосновании применения модифицированных защитных покрытий в качестве технического решения по предотвращению эскалации пожара при групповом размещении ПЭР.

Список литературы

1. Барышев И. Г. Полимерные эластичные резервуары – опыт применения // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 7 (32). С. 86–89.

2. Нестеров С. В., Бакирова И. Н., Самуилов Я. Д. Термическая и термоокислительная деструкция полиуретанов: механизмы протекания, факторы влияния и основные методы повышения термической стабильности. Обзор по материалам отечественных и зарубежных публикаций // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 14. С. 10–23.

3. Самигуллин Г. Х., Захаров А. Е. Оценка возможности эскалации пожара при хранении моторных топлив в полимерных эластичных резервуарах // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2024. № 1. С. 1–12.

4. Wang W., Tao G., Zhang L. Comparative and analysis study of pool fire radiant heat models under different view factor calculations. *Emergency Management Science and Technology*, 2024, vol. 4, article e003. DOI: 10.48130/emst-0024-0005.

5. Modest M. F. Radiative Heat Transfer. 3rd ed. Oxford: Academic Press, 2013. 904 p.

6. Ширяев Е. В., Шабунин С. А., Швырков С. А. Оценка пожарной опасности эластичных резервуаров на основе термогравиметрического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33, № 3. С. 37–46.

7. Flame retarding performance of elastomeric nanocomposites: A review / P. S. Khobragade, D. P. Hansora, J. B. Naik [et al.]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, vol. 130, pp. 194–244. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2016.06.001.

8. Nanocarbon-Based Flame Retardant Polymer Nanocomposites / Y. Yang, J. L. Díaz Palencia, N. Wang [et al.]. *Molecules*, 2021, vol. 26, issue 15, article 4670. DOI: 10.3390/molecules26154670.

9. Самигуллин Г. Х., Захаров А. Е. Снижение пожарной опасности при хранении

нефтепродуктов в полимерных эластичных резервуарах, модифицированных нанокремнеземными компонентами // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 148–158.

10. Захаров А. Е. Термогравиметрический анализ наномодифицированного материала для внешнего огнезащитного слоя оболочек полимерных эластичных резервуаров // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 4 (57). С. 19–28.

11. Самигуллин Г. Х., Захаров А. Е., Гончаров Г. И. Повышение термостойкости внешнего слоя полимерных эластичных резервуаров путём нанесения модифицированных нанокремнеземных компонентов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXVI Международной научно-практической конференции, посвященной 375-й годовщине образования пожарной охраны России. М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. С. 511–516.

12. Захаров А. Е. Алгоритм расчёта критического времени прогрева оболочки полимерного эластичного резервуара при пожаре пролива с учётом огнезащиты // Естественные науки и пожаробезопасность: проблемы и перспективы исследований: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2026. С. 514–519.

References

1. Baryshev I. G. Polimernye elastichnye rezervuary – opyt primeneniya [Polymeric elastic reservoirs: application experience]. *Ekspozitsiya Neft Gaz*, 2013, no. 7(32), pp. 86–89.

2. Nesterov S. V., Bakirova I. N., Samuilov Ya. D. Termicheskaya i termookislitel'naya destruktziya poliuretanov: mekhanizmy protekaniya, faktory vliyaniya i osnovnye metody povysheniya termicheskoy stabilnosti. *Obzor po*

materialam otechestvennykh i zarubezhnykh publikatsiy [Thermal and thermo-oxidative degradation of polyurethanes: mechanisms, influencing factors and main methods for improving thermal stability. A review of Russian and foreign publications]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2011, issue 14, pp. 10–23.

3. Samigullin G. Kh., Zakharov A. E. Otsenka vozmozhnosti eskalatsii pozhara pri khraneniі motornykh topliv v polimernykh elastichnykh rezervuarakh [Assessment of the possibility of fire escalation during motor fuel storage in polymeric elastic reservoirs]. *Vestnik Sankt-Peterburskogo universiteta GPS MChS Rossii*, 2024, issue 1, pp. 1–12. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-1-12.

4. Wang W., Tao G., Zhang L. Comparative and analysis study of pool fire radiant heat models under different view factor calculations. *Emergency Management Science and Technology*, 2024, vol. 4, article e003. DOI: 10.48130/emst-0024-0005.

5. Modest M. F. Radiative Heat Transfer. 3rd ed. Oxford: Academic Press, 2013. 904 p.

6. Shiryayev E. V., Shabunin S. A., Shvyrkov S. A. Otsenka pozharnoy opasnosti elastichnykh rezervuarov na osnove termogravimetriceskogo analiza [Assessment of fire hazard of elastic reservoirs based on thermogravimetric analysis]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2024, vol. 33, issue 3, pp. 37–46.

7. Flame retarding performance of elastomeric nanocomposites: A review / P. S. Khobragade, D. P. Hansora, J. B. Naik [et al.]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, vol. 130, pp. 194–244. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.001.

8. Nanocarbon-Based Flame Retardant Polymer Nanocomposites / Y. Yang, J. L. Díaz Palencia, N. Wang [et al.]. *Molecules*, 2021, vol. 26, issue 15, article 4670. DOI: 10.3390/molecules26154670.

9. Samigullin G. Kh., Zakharov A. E. Snizhenie pozharnoy opasnosti pri khraneniі

nefteproduktov v polimernykh elastichnykh rezervuarakh, modifitsirovannykh nanouglerodnymi komponentami [Reduction of fire hazard during petroleum product storage in polymeric elastic reservoirs modified with nanocarbon components]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2023, vol. 2 (66), pp. 148–158.

10. Zakharov A. E. Termogravimetriceskii analiz nanomodifitsirovannogo materiala dlya vneshnego ognезashchitnogo sloya obolochek polimernykh elastichnykh rezervuarov [Thermogravimetric analysis of a nanomodified material for the external fire-protective layer of polymeric elastic reservoir shells]. *Sovremennye problemy grazhdanskoй zashchity*, 2025, vol. 4 (57), pp. 19–28.

11. Samigullin G. Kh., Zakharov A. E., Goncharov G. I. Povyshenie termostoykosti vneshnego sloya polimernykh elastichnykh rezervuarov putem naneseniya modifitsirovannykh nanouglerodnykh komponentov [Increasing the thermal resistance of the external layer of polymeric elastic reservoirs by applying modified nanocarbon components]. *Aktualnye problemy pozharnoy bezopasnosti: materialy XXXVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 375-y godovshchine obrazovaniya pozharnoy okhrany Rossii*. Moscow: FGBU VNIPO MChS Rossii, 2024, pp. 511–516.

12. Zakharov A. E. Algoritm rascheta kriticheskogo vremeni progreva obolochki polimernogo elastichnogo rezervuara pri pozhare proliva s uchetom ognезashchity [Algorithm for calculating the critical heating time of a polymeric elastic reservoir shell under pool fire exposure with account for fire protection]. *Estestvennyye nauki i pozharobezopasnost: problemy i perspektivy issledovaniy: sbornik materialov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu Ivanovskoy pozharno-spasatelnoy akademii GPS MChS Rossii*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MChS Rossii, 2026, pp. 514–519.

Самигуллин Гафур Халафович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»,

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения

E-mail: samigullin.gh@yandex.ru

Samigullin Gafur Khalafovich

FSBEI HE «Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia»,

Russian Federation, Saint Petersburg

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physical and Chemical Fundamentals of Combustion and Fire Suppression Processes

E-mail: samigullin.gh@yandex.ru

Захаров Александр Евгеньевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

старший преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств

E-mail: frzakhsach@mail.ru

Zakharov Aleksandr Evgenievich

FSBEI HE «Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia»,
Russian Federation, Saint Petersburg

Senior Lecturer, Department of Fire Safety of Technological Processes and Productions

E-mail: frzakhsach@mail.ru

УДК 614.841.3+711.4

DOI 10.48612/ntp/za2b-77t1-3k44

АНАЛИЗ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ РОСТА МЕГАПОЛИСОВ

Д. Н. САРАТОВ, Ю. Н. БЕЛЬШИНА, О. М. МАЕР

Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы
МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
E-mail: belshina112@mail.ru

Активная урбанизация планеты Земля влечёт увеличение количества высотных зданий, их этажности и сложности конструкций. В свою очередь, эти факторы осложняют обеспечение пожарной безопасности и усложняют процесс тушения пожара в случае его возникновения. По мере активного строительства мегаполисов данная проблема становится все более острой, особенно в городах с высокой плотностью населения. В статье проведен анализ сферы обеспечения пожарной безопасности высотных зданий в условиях современной урбанизации, в результате которого вскрыт ряд проблемных вопросов. Проанализированы актуальные исследования в данной предметной области и выявлена зависимость взрывного роста количества высотных зданий (высотой более 200 метров), увеличение пожаров в них и общего количества населения больших городов. Резюмируется, что внешняя теплоизоляция и противопожарная защита высотных зданий будут не только оказывать более серьезное влияние на безопасность жизни и имущества жителей высотных жилых домов, но и играть ключевую роль в будущем развитии и строительстве мегаполисов. Для улучшения внешней теплоизоляции и противопожарной защиты крайне важно содействовать исследованиям и разработке негорючих и огнеупорных изоляционных материалов, а также их широкому применению.

Ключевые слова: анализ, проблема, обеспечение, пожарная безопасность, высотное здание, урбанизация.

CURRENT PROBLEMS OF ENSURING FIRE SAFETY OF HIGH-RISE BUILDINGS IN THE CONDITIONS OF GROWTH OF MEGAPOLITIES

D. N. SARATOV, Yu. N. BELSHINA, O. M. MAER

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia
named after the Hero of the Russian Federation General of the Army E. N. Zinicheva
Russian Federation, Saint Petersburg
E-mail: belshina112@mail.ru

The rapid urbanization of planet Earth is leading to an increase in the number of high-rise buildings, their height, and structural complexity. These factors, in turn, complicate fire safety and make fire suppression more difficult. With the rapid construction of megacities, this problem is becoming increasingly acute, especially in cities with high population density. This article analyzes the fire safety of high-rise buildings in the context of modern urbanization, revealing a number of problematic issues. Current research in this area is analyzed, revealing a correlation between the explosive growth in the number of high-rise buildings (over 200 meters tall), the increase in fires within them, and the overall population of large cities. It is concluded that external thermal insulation and fire protection of high-rise buildings will not only have a more significant impact on the safety of the lives and property of residents of high-rise residential buildings but will also play a key role in the future development and construction of megacities. To improve external thermal insulation and fire protection, it is crucial to promote the research and development of non-combustible and fireproof insulation materials and their widespread use.

Key words: analysis, problem, provision, fire safety, high-rise building, urbanization.

Введение

Тенденция перенаселения городов наиболее выражена в крупнейших мегаполисах мира – Нью-Йорк, Токио, Лондон (развитые страны), а также Шанхай, Гуанчжоу, Мумбаи, Дубай (развивающиеся страны). Именно в этих экономических центрах высокая плотность населения и дефицит земли стимулируют строительство зданий повышенной этажности. В настоящей статье анализируются страны, которые вносят наибольший вклад в мировой парк высотных зданий (>200 м) – Китай (лидер по абсолютному числу), США, ОАЭ и страны Юго-Восточной Азии. Остальные государства исключены из анализа в силу пренебрежимо малого количества сверхвысоких зданий.

Под урбанизацией в данной работе понимается процесс концентрации населения и экономической активности в крупных городах, сопровождающийся ростом плотности застройки, дефицитом свободных территорий и необходимостью вертикального расширения

городского пространства. Согласно данным ООН, доля городского населения мира выросла с 30 % в 1950 году до 57 % в 2023 году, а к 2050 году достигнет 68 %. Именно в ведущих экономических центрах развитых стран (Нью-Йорк, Токио, Лондон) и развивающихся стран (Шанхай, Гуанчжоу, Мумбаи) этот процесс идёт наиболее интенсивно, что напрямую стимулирует строительство зданий высотой более 200 метров. Однако анализ всех стран мира нецелесообразен, так как 80 % сверхвысоких зданий (>200 м) сосредоточено в Китае, ОАЭ, США и Саудовской Аравии. Поэтому в настоящей статье выборка сфокусирована на государствах – лидерах по темпам высотного строительства, с особым вниманием к Китаю как абсолютному мировому лидеру (количество зданий >200 м выросло с 0 в 1990 г. до 340 000 (выше 75 м) и 1478 в мире на 2025 г.). Эту тенденцию отражает рисунок [1], в частности, количество высотных зданий (высотой более 200 метров) линейно росло в период с 1990 по 2025 год.

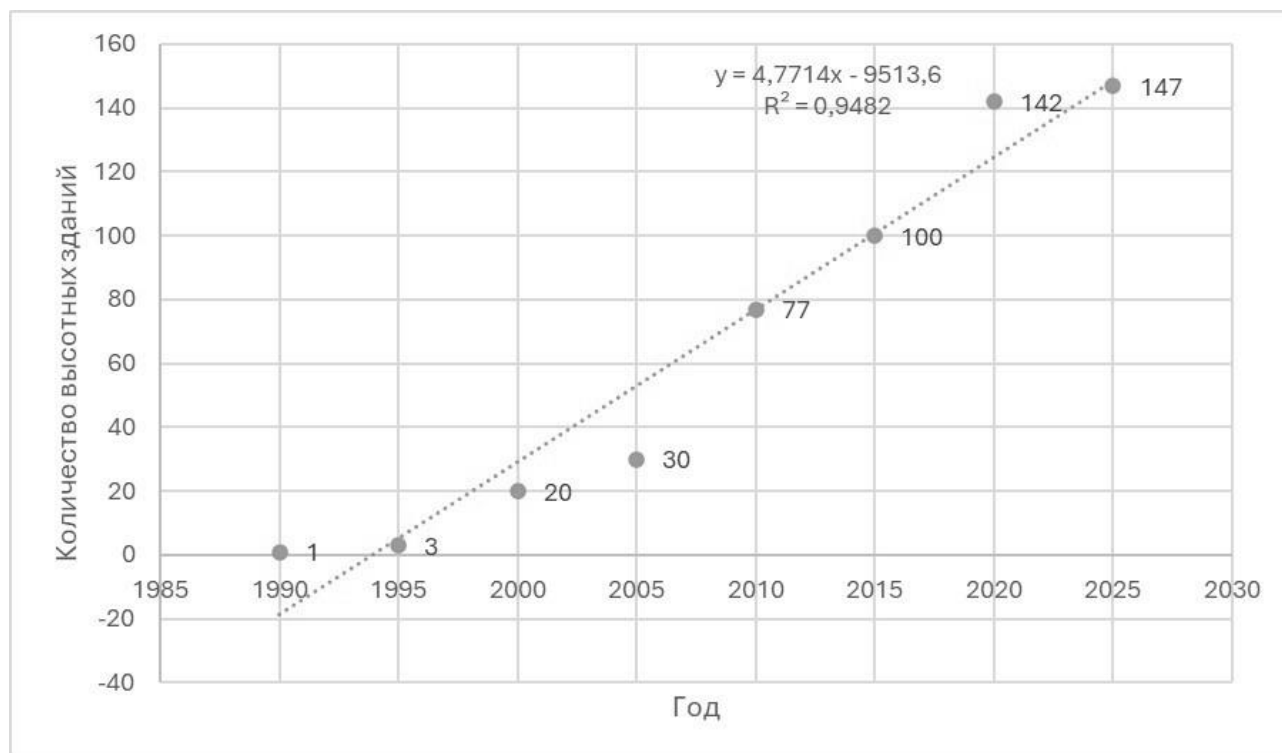


Рисунок. Количество высотных зданий высотой более 200 метров в Китае с 1990 по 2025 год

На текущий момент в мире существует 1478 высотных зданий высотой 200 метров и более, что по сравнению с 2010 годом (614 зданий) отличается на 141 % [2]. С точки зрения обеспечения пожарной безопасности высотные здания – это места массового скопления людей. Любое возгорание может нанести большой материальный и социальный ущерб [3]. В

настоящее время в Китае насчитывается более 340 000 высотных зданий (более 75 метров), и по количеству сверхвысоких сооружений страна занимает первое место в мире. Безопасность инженерных сооружений при пожарах и взрывах стала актуальной и сложной темой в академических и инженерных кругах после теракта 11 сентября 2021 г. [4]. За последние несколько

десятилетий в высотных или сверхвысоких зданиях (>200 м) различной конструкции происходили обрушения, вызванные пожарами [5]. Наиболее демонстративными из них являются обрушения зданий со стальным каркасом в США [6], Испании [7], Нидерландах [8]. Также отмечены случаи, когда применяемые средства пожарной автоматики не справлялись с контролем дыма [9, 10] и распространением огня [11]. В Китае в период с 2019 по 2025 год ежегодно происходило более 312 000 пожаров, в результате которых погибло 1628 человек, 501110 получили травмы, а прямой материальный ущерб составил до 38,59 миллиарда рублей. Количество пожаров в многоэтажных жилых домах с каждым годом возрастает, и почти 80 % смертельных случаев, связанных с пожарами, происходят в жилых домах. Наибольшую опасность представляют пожары, происходящие в ночное время. Порядка 70 % всех смертей от удушья происходит, когда человек спит [12, 13]. В 2025 году в экстренные службы одной из стран Азии поступило 252 000 сообщений о пожарах, в результате которых погибли 1183 человека, 775 получили ранения, а материальный ущерб составил до 45,39 млрд рублей. Из них 109 000 возникли в жилой зоне. Общее число пожаров в высотных зданиях составило 6987, что более чем на 10 % больше, чем в предыдущем году. Также наблюдается тенденция ежегодного роста количества пожаров во всем мире. Таким образом, целью статьи является анализ актуальных проблем и особенностей обеспечения пожарной безопасности высотных зданий в условиях современной урбанизации и выработка рекомендаций по дальнейшему проведению исследований в данной предметной области. Актуальность исследования подтверждается активной урбанизацией мегаполисов и бурным ростом количества высотных зданий.

Материалы и методы исследования

Основным источником материалов исследования были выбраны базы данных научных исследований русскоязычного (E-library) и англоязычного (Google Scholar) сегментов. Методологической базой для проведения анализа выступили основные положения критического анализа научных публикаций.

Поиск и отбор исследований, представляющих интерес для проведения анализа, осуществлялся в несколько этапов.

В начале были выделены критерии отбора:

- тип публикации: статья в журнале или диссертация;
- год публикации: не позднее 2016 года (включительно);

– статья должна быть в открытом доступе (доступна для прочтения).

Далее был осуществлен поиск публикаций в базах данных научных исследований, отобранных по критериям, указанным выше с использованием следующих ключевых словосочетаний:

- актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности высотных зданий;
- инновационные подходы к обеспечению пожарной безопасности высотных зданий;
- актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности высотных зданий в условиях современной урбанизации;
- инновационные подходы к обеспечению пожарной безопасности высотных зданий в условиях современной урбанизации.

При поиске публикаций в E-library и Google Scholar также была использована опция нейропоиска (поиска с применением методов искусственного интеллекта) исследований, с целью более обширного охвата.

Выбор стран для анализа (преимущественно Китай, а также США, Испания, Нидерланды) обусловлен следующими критериями: наличие в стране не менее 50 высотных зданий высотой >200 метров либо наличие задокументированных случаев обрушений высотных зданий при пожарах (для анализа инцидентности). Китай выбран в качестве основного объекта ввиду его лидерства по абсолютному числу высотных зданий (более 340 000 зданий >75 м) и темпам прироста (рисунок). Выборка не является сплошной, а репрезентативной – для выявления ключевых проблем пожарной безопасности.

В результате проведенного анализа был вскрыт ряд актуальных проблем обеспечения пожарной безопасности высотных зданий в условиях современной урбанизации, и на основе опыта исследований учёных в данной предметной области предложены инновационные подходы к их решению. Полученные данные были структурированы по блокам, представленным ниже.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам проведенного анализа было выделено 3 основных кластера, отражающих актуальные проблемы и особенности обеспечения пожарной безопасности высотных зданий в условиях современной урбанизации.

1. Особенности обеспечения пожарной безопасности высотных зданий.

1.1. *Сложность спасения людей.* Поскольку лифты являются основным средством передвижения внутри высотных жилых зданий, и большинство пассажирских лифтов не имеют

средств защиты от воздействия опасных факторов пожара (ОФП), спасение людей при возникновении пожара в таких зданиях представляет собой сложную задачу. Из-за возникновения тяги в лифтовой шахте во время пожара невозможно использовать лифты как средства эвакуации, вынуждая людей использовать пожарные лестницы для эвакуации на нижний этаж. Однако пожарные лестницы довольно узкие, что затрудняет данный процесс. Согласно статистическим данным, допустимое время эвакуации по пожарным лестницам из высотных зданий, как правило, превышает время наступления критических значений ОФП, что приводит к гибели людей и блокированию путей эвакуации [12]. Следует отметить, что высокие потолки и большие внутренние пространства в высотных зданиях приводят к быстрому задымлению, которое ухудшает зрение и физическое самочувствие людей, что затрудняет процесс эвакуации. Также многие высотные здания имеют стеклянные навесные стены, что увеличивает риск их повреждения в случае пожара и затрудняет спасательные операции на строительных площадках высотных зданий [13].

1.2. Сложность тушения пожаров. Тушение пожаров в высотных зданиях затрудняется рядом факторов. В частности, длина пожарных автолестниц ограничена и зачастую оказывается меньше высоты здания. Также при возникновении пожара в высотном здании может произойти продольное скопление дымовых газов в лестничных клетках, шахтах лифтов и других местах. В небольшом пространстве накапливается большое количество высокотемпературных газов и водяного пара, что затрудняет срабатывание автоматических систем пожаротушения, а также обеспечения эвакуации. Как следствие, большое количество дыма не может быть оперативно удалено, что может привести к удушью и смерти людей, которые будут эвакуироваться [14]. По мере роста

численности персонала в высотных зданиях увеличивается и количество их автомобилей. Однако количество парковочных мест ограничено, в связи с чем некоторые домовладельцы начали парковать свои машины, загораживая пожарный проезд, сильно затрудняя процесс прибытия спасательных служб к месту пожара [15].

1.3. Быстрое распространение пламени. На текущий момент для утепления высотных жилых зданий, как правило, используются горючие материалы. В связи с чем, при возникновении пожара огонь быстро распространяется, заполняя собой лестницы и лифты. Это приводит к возникновению «эффекта дымовой трубы» в вертикальных трубных колодцах, таких как лестничные клетки, шахты лифтов и вытяжные каналы, что является причиной нанесения большого материального и социального ущерба при пожарах в высотных зданиях [16, 17]. В рамках настоящего исследования особое внимание уделялось применяемым теплоизоляционным материалам посредством анализа основных характеристик высотных сооружений.

2. Специфика изоляционных материалов.

2.1. Классификация изоляционных материалов. В настоящее время во всем мире для наружных стен зданий используются три основные категории изоляционных материалов (Таблица): неорганические изоляционные материалы на основе минеральной ваты, стекловаты и каменной ваты, которые обычно считаются негорючими материалами; изоляционный материал на основе резиновой крошки и полистирола, представляющий собой органически-неорганический композитный изоляционный материал, который обычно относят к огнестойким материалам; органические изоляционные материалы из жесткого пенополиуретана и полистирола, которые принято считать горючими веществами.

Таблица. Теплопроводность, преимущества и недостатки различных изоляционных материалов

Теплоизоляционный материал	Теплопроводность, Вт/(м*К)	Преимущества	Недостатки
Плита из вспененного полистирола (пенополистирол)	0,038-0,041	Хорошая паропроницаемость и теплоизоляция, низкая цена	Невысокая прочность
Экструзионный пенополистирол	0,028-0,030	Отличная теплоизоляция, высокая прочность и влагостойкость	Высокая цена, требует подготовки основания
Минераловатная плита (каменная вата)	0,041-0,045	Пожаробезопасность, негорючесть	Высокая гигроскопичность, нестабильность теплоизоляционных свойств

Теплоизоляционный материал	Теплопроводность, Вт/(м*К)	Преимущества	Недостатки
Теплоизоляционная паста на основе гранул полистирола и связующего	0,057-0,06	Негорючесть, низкие требования к основанию	Низкая эффективность утепления, высокие требования к монтажу
Пенополиуретан	0,025-0,028	Хорошая гидроизоляция, отличная теплоизоляция, высокая прочность	Высокая цена, низкая огнестойкость
Перлитовые и другие штукатурные смеси/пасты	0,07-0,09	Хорошая огнестойкость, высокая термостойкость	Низкая эффективность утепления, высокое водопоглощение

2.2. Огнестойкость органических изоляционных материалов. На текущий момент невозможно полностью исключить применение органических материалов для теплоизоляции, в виду их выдающихся показателей по теплоизоляции, высокой плотности и низкой теплопроводности. Для снижения воспламеняемости можно использовать технологию покрытия огнезащитными свойствами, однако для этого необходимо провести ряд дополнительных исследований. С целью повышения огнестойкости органических изоляционных материалов необходимо разработать промышленные образцы легких, малотоксичных и огнестойких материалов, обладающих теплоизоляционными свойствами и минимизировать применение горючих компонентов.

2.3. Изоляционные системы для неорганических наружных стен. При использовании негорючих теплоизоляционных материалов, как правило не возникает существенных проблем пожарной безопасности [18]. В результате широкого использования легковоспламеняющихся пенополистирольных плит для утепления стен высотного здания значительно повышается риск возникновения пожара. Поэтому следует отдавать предпочтение негорючим неорганическим изоляционным материалам. Кроме того, в мире наблюдается отсталость в производстве высококачественных изоляционных материалов. В настоящее время доля применения этого типа наружных изоляционных систем во всем мире очень низка. В условиях огромного рынка наружной теплоизоляции минеральные ресурсы неорганических изоляционных материалов относительно ограничены и дороги [19]. Поэтому в дальнейшем необходимо проводить исследования в области разработки неорганических теплоизоляционных материалов.

3. Анализ архитектурных решений и применяемых средств пожарной автоматики.

3.1. Проектирование дымоотводных систем. Различные газы ОФП являются основной причиной гибели людей при пожарах [20].

Поэтому при проектировании строительных конструкций крайне важно учитывать меры по предотвращению задымления. В высотных жилых зданиях обычно рассматриваются как естественные, так и механические методы дымоотвода. Механический дымоотвод – это использование оборудования с вытяжными вентиляторами для осуществления принудительного дымоудаления, способствующего проведению противопожарных мероприятий. Эффективность механического дымоотвода, как правило, находится на высоком уровне, однако его использование в высотных зданиях имеет ряд недостатков. В связи с этим способ дымоотвода следует выбирать на этапе фактического проектирования противопожарной защиты, исходя из сложившейся обстановки. Первым вариантом должна быть естественная дымоуловительная система, поскольку во многих высотных зданиях лестничные клетки имеют определенную разницу температур, и дымовые газы остаются внутри. Поэтому при проектировании конструкции лестничной клетки необходимо точно спроектировать и расположить окна, устанавливая дымоотводные окна на стене, чтобы обеспечить вентиляцию, и функционирование системы дымоудаления. Для эффективной интеграции механического и естественного дымоудаления необходимо устанавливать окна во внутреннем дворе, а также дымонепроницаемые лестницы и пожарные лифты внутри высотных жилых зданий [21]. Например, можно построить систему подачи воздуха на эвакуационной лестнице и систему дымоудаления перед лифтом.

3.2. Автоматическая система пожарной сигнализации. В связи с увеличением числа высотных зданий, автоматическая система пожарной сигнализации играет незаменимую роль в прогнозировании развития пожара, своевременном тушении, эвакуации персонала и предотвращении распространения пламени. Ее сложность обусловлена многочисленными точками обнаружения и контроля, а также сложной

логикой управления. В проектирование системы управления пожарной сигнализацией включены системы пожаротушения с использованием пожарных гидрантов и автоматической спринклерной системы. Её главная цель – обеспечить контроль за запуском и остановкой пожарного насоса, чтобы контролировать процесс тушения пожара. При этом следует предусматривать возможность ручного запуска насоса, при выходе из строя средств пожарной автоматики [22].

Таким образом обеспечение пожарной безопасности высотных зданий в условиях современной урбанизации является перспективным и очень важным направлением дальнейших исследований. Резюмируя результаты проведенного анализа, можно сделать следующие выводы:

1. Планировка лестничного пролета должна обеспечивать безопасное расстояние для эвакуации и, насколько это возможно, предотвращать образование мешкообразных проходов.

2. Для обеспечения двусторонней эвакуации лестничный пролет должен располагаться вплотную к торцам стандартного перекрытия или огнеупорной перегородки.

3. Положение эвакуационной лестницы на каждом этаже должно быть вертикальным и не должно изменяться, за исключением лестниц, ведущих в подвал, и лестниц, ведущих на смещенный эвакуационный этаж в сверхвысоком здании.

4. На первом этаже должна быть дверь, ведущая непосредственно наружу. Изменение расположения лестничного пролета затруднит поиск ступеней персоналом в чрезвычайной ситуации, увеличит время эвакуации и повысит риск ненужных жертв, особенно в общественных зданиях, таких как гостиницы, рестораны и коммерческие здания.

5. Высотные здания должны быть спроектированы с наличием вертолетной площадки

на верхнем уровне для обеспечения быстрой транспортировки и эвакуации людей, оказавшихся в затруднительном положении на верхнем этаже.

6. Необходимо создавать лестничные клетки, обеспечивая их высокую огнестойкость.

7. Нецелесообразно делить лестницу с верхним этажом. На первом этаже обычно используется перегородка с пределом огнестойкости не менее 2 часов, разделяющая помещения на зоны и ведущая непосредственно наружу. Лестничные пролеты подвала и полуподвала на первом этаже должны вести непосредственно наружу для обеспечения быстрой эвакуации персонала. Для предотвращения случайного попадания эвакуируемых в подвал или полуподвал, а также для предотвращения распространения огня и дыма, противопожарные перегородки должны быть предусмотрены на лестничных пролетах первого этажа, а также в подвале и полуподвале.

Выводы

В современном процессе урбанизации, строительства и развития городов доля высотных зданий неуклонно растёт. Внешняя теплоизоляция и противопожарная защита высотных зданий будут не только оказывать более серьёзное влияние на безопасность жизни и имущества жителей высотных жилых домов, но и играть ключевую роль в будущем развитии и строительстве мегаполисов. Проведенный в статье анализ сферы обеспечения пожарной безопасности высотных зданий в условиях современной урбанизации, позволил выявить ряд актуальных проблемных вопросов и на основе опыта последних исследований выработать конструктивные подходы к их решению. В частности, для улучшения внешней теплоизоляции и противопожарной защиты крайне важно осуществить разработку негорючих и огнеупорных изоляционных материалов, а также обеспечить их широкое применение.

Список литературы

1. X. X. Chen and C. Tang. Analysis on fire safety status of high-rise buildings and research on fire prevention and control countermeasures, *Fire. Protect. Tod.*, 2019, vol. 4, issue 8, pp. 36–37.

2. H. Chen and J. Y. Liew. Explosion and fire analysis of steel frames using mixed element approach, *J. Eng. Mech.*, 2005, vol. 131, issue 6, pp. 606–616. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:6\(606\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:6(606)).

3. A. Cowlard, A. Bittern, C. Abecassis-Empis, and J. Torero. Fire safety design for tall

buildings, *Procedia. Engineer.*, 2013, vol. 62, pp. 169–181, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.053>.

4. Седов Д. С. Вопросы пожарной безопасности высотных зданий // *Экономика строительства*. 2025. № 2. С. 374–377.

5. Медяник М. В. Особенности обеспечения пожарной безопасности в высотных жилых зданиях // *Естественные и технические науки*. 2023. № 4 (179). С. 305–307.

6. Final report on the collapse of the World Trade Center towers, NIST-NCSTAR-1, 2005, Gaithersburg, MD, US: National Institute of Standards, & Technology.

7. D. Parker. Madrid tower designer blames missing fire protection for collapse, *New. Civil. Engineer.*, 2005, vol. 2005, pp. 5-7,.

8. B. Meacham, M. Engelhardt and V. Kodur. Collection of data on fire and collapse, faculty of architecture building, delft university of technology, In Proc of NSF Engineering Research and Innovation Conference, (ERIC 2009), Honolulu, Hawaii, 2009, ResearchGate.

9. D. Madrzykowski and W. D. Walton. Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations, US: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, 2004.

10. Y. Wang, S. L. Shi, R. Q. Li, Y. Liu and X. Y. Chen. Statistical analysis and countermeasures of national fire accidents from 2013 to 2016, *Safety.*, 2018, vol. 39, no. 11, pp. 60–63.

11. G. B. Li. Analysis of fire safety status of high-rise buildings and research on fire prevention and control countermeasures, *China. Residential. Facilities.*, 2019, vol. 2019, no. 4, pp. 73–74.

12. J. C. Bai and L. Shang. Problem analysis and countermeasures on fire protection design of high-rise civil buildings, *Architecture. and Cult.*, 2020, vol. 2020, no. 5, pp. 212–213.

13. S. Y. Chen. Analysis and countermeasures of fire protection design problem of high-rise civil buildings, *Fire Prot. Circle*, 2019, vol. 5, issue 14, pp. 26-27. <https://doi.org/10.16859/j.cnki.cn12-9204/tu.2019.14.013>.

14. K. Zhang. Exploration of prefabricated prefabricated building design practice and engineering technology innovation of high-rise residential buildings, *Housing. and Real. Estate.*, 2020, vol. 2020, issue 24, pp. 80–80.

15. L. Zheng. Some thoughts on the design of smoke prevention and exhaust of high-rise buildings, *Fire Technol. and Product Inform.*, 2017, vol. 2017, issue 3, pp. 21–22.

16. Q. L. Meng. Analysis and countermeasures of fire protection design of high-rise civil buildings, *Shanxi Archit.*, 2020, vol. 46, issue 20, pp. 195–196. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6825.2020.20.076>.

17. W. Y. Zhang and Y. Q. Wang. Fire hazards and fire countermeasures of building exterior wall insulation engineering, *Fire Prot. Technol. and Product Inform.*, 2013, vol. 2013, issue 5, pp. 3–7. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-784X.2013.05.001>.

18. S. H. Lai. Discussion on fire prevention measures for external wall insulation system of high-rise buildings, *J. of Armed Police College*, 2013, vol. 29, issue 4, pp. 52–54.

19. H. C. Ding, Y. D. Xu, Q. L. Deng, and Z. X. Lian. Simulation study on influence of fire

smoke flow on evacuation in high-rise buildings, *China Safety Science J.*, 2020, vol. 30, issue 12, pp. 118–124. <https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2020.12.017>.

20. L. H. Mai. Discussion on the application of green building design in residential building design, *Eng. Technol. Res.*, 2020, vol. 5, issue 14, pp. 202–203.

21. Z. M. Huang. Research on fire protection design problems and countermeasures of high-rise civil buildings, *Fire. Protect. Tod.*, 2021, vol. 6, issue 11, pp. 94–96.

22. L. D. Huang, K. Z. Luo, Y. Liu, J. J. Xu, X. X. Xu, and X. C. Wang. Crowd evacuation simulation of fire scene in elderly apartment, *Chinese J. of Safety Science*, 2020, vol. 30, issue 3, pp. 137-142. <https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2020.03.021>.

References.

1. X. Chen and C. Tang. Analysis on fire safety status of high-rise buildings and research on fire prevention and control countermeasures, *Fire. Protect. Tod.*, 2019, vol. 4, issue 8, pp. 36–37.

2. H. Chen and J. Y. Liew. Explosion and fire analysis of steel frames using mixed element approach, *J. Eng. Mech.*, 2005, vol. 131, issue 6, pp. 606–616. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:6\(606\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:6(606)).

3. A. Cowlard, A. Bittern, C. Abecassis-Empis, and J. Torero. Fire safety design for tall buildings, *Procedia. Engineer.*, 2013, vol. 62, pp. 169–181, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.053>.

4. Седов Д. С. Вопросы пожарной безопасности высотных зданий // *Экономика строительства*. 2025. № 2. С. 374–377.

5. Медяник М. В. Особенности обеспечения пожарной безопасности в высотных жилых зданиях // *Естественные и технические науки*. 2023. № 4 (179). С. 305–307.

6. Final report on the collapse of the World Trade Center towers, NIST-NCSTAR-1, 2005, Gaithersburg, MD, US: National Institute of Standards, & Technology.

7. D. Parker. Madrid tower designer blames missing fire protection for collapse, *New. Civil. Engineer.*, 2005, vol. 2005, pp. 5-7,.

8. B. Meacham, M. Engelhardt and V. Kodur. Collection of data on fire and collapse, faculty of architecture building, delft university of technology, In Proc of NSF Engineering Research and Innovation Conference, (ERIC 2009), Honolulu, Hawaii, 2009, ResearchGate.

9. D. Madrzykowski and W. D. Walton. Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS

Simulations, US: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, 2004.

10. Y. Wang, S. L. Shi, R. Q. Li, Y. Liu and X. Y. Chen. Statistical analysis and countermeasures of national fire accidents from 2013 to 2016, *Safety.*, 2018, vol. 39, no. 11, pp. 60–63.

11. G. B. Li. Analysis of fire safety status of high-rise buildings and research on fire prevention and control countermeasures, China. Residential. Facilities., 2019, vol. 2019, no. 4, pp. 73–74.

12. J. C. Bai and L. Shang. Problem analysis and countermeasures on fire protection design of high-rise civil buildings, *Architecture. and Cult.*, 2020, vol. 2020, no. 5, pp. 212–213.

13. S. Y. Chen. Analysis and countermeasures of fire protection design problem of high-rise civil buildings, *Fire Prot. Circle*, 2019, vol. 5, issue 14, pp. 26–27. <https://doi.org/10.16859/j.cnki.cn12-9204/tu.2019.14.013>.

14. K. Zhang. Exploration of prefabricated prefabricated building design practice and engineering technology innovation of high-rise residential buildings, *Housing. and Real. Estate.*, 2020, vol. 2020, issue 24, pp. 80–80.

15. L. Zheng. Some thoughts on the design of smoke prevention and exhaust of high-rise buildings, *Fire Technol. and Product Inform.*, 2017, vol. 2017, issue 3, pp. 21–22.

16. Q. L. Meng. Analysis and countermeasures of fire protection design of high-rise civil buildings, *Shanxi Archit.*, 2020, vol. 46, issue 20, pp.

195–196. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6825.2020.20.076>.

17. W. Y. Zhang and Y. Q. Wang. Fire hazards and fire countermeasures of building exterior wall insulation engineering, *Fire Prot. Technol. and Product Inform.*, 2013, vol. 2013, issue 5, pp. 3–7. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-784X.2013.05.001>.

18. S. H. Lai. Discussion on fire prevention measures for external wall insulation system of high-rise buildings, *J. of Armed Police College*, 2013, vol. 29, issue 4, pp. 52–54.

19. H. C. Ding, Y. D. Xu, Q. L. Deng, and Z. X. Lian. Simulation study on influence of fire smoke flow on evacuation in high-rise buildings, *China Safety Science J.*, 2020, vol. 30, issue 12, pp. 118–124. <https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2020.12.017>.

20. L. H. Mai. Discussion on the application of green building design in residential building design, *Eng. Technol. Res.*, 2020, vol. 5, issue 14, pp. 202–203.

21. Z. M. Huang. Research on fire protection design problems and countermeasures of high-rise civil buildings, *Fire. Protect. Tod.*, 2021, vol. 6, issue 11, pp. 94–96.

22. L. D. Huang, K. Z. Luo, Y. Liu, J. J. Xu, X. X. Xu, and X. C. Wang. Crowd evacuation simulation of fire scene in elderly apartment, *Chinese J. of Safety Science*, 2020, vol. 30, issue 3, pp. 137–142. <https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2020.03.021>.

Саратов Дмитрий Николаевич

Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург кандидат технических наук, доцент

E-mail: saratovdn@mail.ru

Saratov Dmitry Nikolaevich

Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia named after the Hero of the Russian Federation General of the Army E. N. Zinicheva, Russian Federation, Saint-Petersburg

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

E-mail: saratovdn@mail.ru

Бельшина Юлия Николаевна

Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург кандидат технических наук, доцент

E-mail: belshina112@mail.ru

Belshina Yulia Nikolaevna

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia
named after the Hero of the Russian Federation General of the Army E. N. Zinicheva,
Russian Federation, Saint-Petersburg
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: belshina112@mail.ru

Маер Олег Михайлович

Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России
им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
кандидат экономических наук
E-mail: oleg.maer.84@mail.ru

Maer Oleg Mikhailovich

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia
named after the Hero of the Russian Federation General of the Army E. N. Zinicheva,
Russian Federation, Saint-Petersburg
Candidate of Economic Sciences
E-mail: oleg.maer.84@mail.ru

УДК 614.842.612

DOI 10.48612/ntp/tu2h-gma7-b66h

СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И УНИВЕРСАЛЬНЫХ ОГНЕТУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ СОЛЕЙ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

E-mail: anikiforoff@list.ru

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

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

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

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

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

Химическое ингибирование: аэрозоли и температурно-активированная вода

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

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

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

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

открывает перспективы применения ОТВ для класса пожаров С.

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

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

Структурная модификация воды: гидрогели, термовспенивающиеся системы и стабилизаторы пен

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

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

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

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

Плёнообразующие пенообразователи: фторированные системы и экологически безопасные альтернативы

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

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

Порошковые системы с кристаллогидратами солей

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

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

Адаптация пенных систем к воде повышенной жёсткости и солёности

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

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

Попытки создания комплексных универсальных составов

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

Критическая оценка:

системные ограничения и перспективы

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

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

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

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

Отсутствие единой методологии оптимизации

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

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

Антагонизм многофункциональных добавок

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

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

Модельно-экспериментальный разрыв

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

Электробезопасность многофазных ОТВ

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

Эколого-эксплуатационные аспекты

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

Научные пробелы и обоснование направлений исследований

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

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

воды (жёсткость, солёность) и класса пожарной нагрузки.

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

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

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

Заключение

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

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

Список литературы

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Серов Владимир Вячеславович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

адъюнкт адъюнктуры

Главное управление МЧС России по Ивановской области,

Российская Федерация, г. Иваново

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

E-mail: wws37@rambler.ru

Serov Vladimir Vyacheslavovich

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

Russian Federation, Ivanovo

adjunct of post-graduate courses

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

Russian Federation, Ivanovo

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

E-mail: wws37@rambler.ru

Никифоров Александр Леонидович

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

доктор технических наук, старший научный сотрудник

E-mail: anikiforoff@list.ru

Nikiforov Alexander Leonidovich

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

Russian Federation, Ivanovo

Doctor of Technical Sciences, senior researcher

E-mail: anikiforoff@list.ru

Новожилова Ксения Александровна

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

Старший преподаватель

E-mail: novozhilovax@yandex.ru

Novozhilova Kseniya Aleksandrovna

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

Russian Federation, Ivanovo

senior lecturer

E-mail: novozhilovax@yandex.ru

УДК 614.841.411

DOI 10.48612/ntp/kbnb-g16r-tv42

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ОГНЕЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ НА ДРЕВЕСИНЕ: РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ, ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ И ИСПЫТАНИЯ ПОКРЫТИЙ

Е. А. СИПЛАТОВ

ФГБУ ВНИИПО МЧС России
Российская Федерация, г. Балашиха
E-mail: siplatov82@mail.ru

Статья посвящена разработке методики и экспериментальной установки для определения теплоизолирующих свойств огнезащитных составов для древесины. Оценено влияние количества последовательно формируемых слоёв на кинетику прогрева поверхностной области древесного композита. Исследованы теплоизолирующие свойства огнезащитных покрытий различной толщины в условиях стационарного теплового воздействия. Полученные результаты с применением разработанной экспериментальной установки могут быть востребованы при создании огнезащитных композиций как на основе силикатных систем, так и альтернативных типов покрытий.

Ключевые слова: жидкое стекло, тепловое воздействие, эффективная теплопроводность, огнезащитное покрытие.

INVESTIGATION OF HEAT-INSULATING PROPERTIES OF FIRE-RETARDANT COATINGS ON WOOD: SETUP DEVELOPMENT, UNCERTAINTY ASSESSMENT, AND COATING TESTING

E. A. SIPLATOV

«Federal State-Financed Establishment All-Russian Research Institute
for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies
and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Balashikha
E-mail: siplatov82@mail.ru

The article is devoted to the development of a methodology and experimental setup for determining the heat-insulating properties of flame retardants for wood. The influence of the number of successively formed layers on the kinetics of heating of the surface area of the wood composite is estimated. The heat-insulating properties of flame-retardant coatings of various thicknesses under conditions of stationary thermal exposure have been studied. The results obtained using the developed experimental setup may be in demand when creating flame-retardant compositions based on both silicate systems and alternative types of coatings.

Keywords: liquid glass, thermal effect, effective thermal conductivity, flame retardant coating.

Введение

Древесина и материалы на её основе широко применяются в строительстве, отделке и производстве конструкций благодаря доступности, технологичности и эксплуатационным свойствам. Однако низкая огнестойкость древесины требует использования эффективных огнезащитных составов. В настоящее время известно большое количество огнезащитных составов для древесины, которые позволяют снизить показатели пожарной опасности (например, горючесть, воспламеняемость и др.).

Собственно эффективность огнезащитного действия защитных составов определяется по стандартному методу¹. Согласно данному стандарту эффективность огнезащитных составов определяется по значению изменения массы образца, обработанного огнезащитным составом, в результате воздействия пламени горелки. При этом пламя воздействует на нижний край образца, обеспечивая наиболее жесткие условия проведения испытаний.

Недостатком стандартных методик испытаний является то обстоятельство, что они

© Сиплатов Е. А., 2026

¹ ГОСТ Р 53292-2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе. Общие требования. Методы испытаний».

не учитывают способность огнезащитных составов препятствовать термической деструкции древесины.

В отличие от натуральных (крупномасштабных) экспериментов, которые характеризуются высокими материальными затратами, необходимостью использования крупногабаритных образцов и длительной подготовкой, лабораторные методы, напротив, являются более экономичными и обладают возможностью воспроизведения условий испытаний, что обеспечивает повторяемость и сходимостью результатов. Однако при интерпретации полученных данных опускается количественная оценка неопределённости измерений воздействующих факторов (плотности теплового потока, температурных режимов), что напрямую снижает достоверность сравнения различных огнезащитных составов между собой.

В связи с этим целью данной работы явилась разработка лабораторной установки и методики испытаний для количественной оценки теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по древесине, обеспечивающие достоверность и повторяемость результатов.

Предлагаемый подход позволяет проводить сравнительный анализ теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий, контролировать качество составов на этапе производства и эксплуатации, а также оптимизировать разработку новых огнезащитных составов при снижении материальных и временных затрат. Полученные результаты могут служить основой для планирования крупномасштабных огневых испытаний.

Подготовка образцов

Эксперименты проводили на образцах берёзовой фанеры толщиной $(3,0 \pm 0,1)$ мм и диаметром $(65,0 \pm 0,1)$ мм. На подготовленные образцы наносили огнезащитные составы и покрытия. В качестве огнезащитных составов использовали интумесцентный состав на основе ПВА-дисперсии, огнезащитный состав, огнезащитных покрытий – отвердевшую пену на основе жидкого стекла толщиной 10 и 15 мм. Образцы высушивали в течение не менее 48 ч, после чего подвергали термическому воздействию. Толщину образца и нанесённого слоя измеряли штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм, массу образца после нанесения покрытия определяли на лабораторных аналитических весах с ценой деления 1 мг.

Экспериментальная часть

Сущность предлагаемого подхода состоит в следующем: в процессе теплового воздействия регистрируют время, по истечении которого температура на стороне образца,

удалённой от источника нагрева, достигает критического значения.

Исследование теплового воздействия на образцы с покрытиями проводили на разработанной экспериментальной установке (рис. 1). В её состав входят следующие основные узлы: нагревательная печь с наружным кожухом, устройство регулирования температуры, узел фиксации исследуемого образца, измеритель-регулятор для регистрации температуры и плотности тепловых потоков, термоэлектрические преобразователи.

Нагревательная камера (см. рис. 1) служит для создания теплового воздействия на образец в соответствии с требуемым температурным режимом. Конструктивно она выполнена в виде металлического короба, закреплённого на опорной раме. Внутреннее пространство камеры имеет цилиндрическую форму с диаметром 120 ± 5 мм и глубиной 150 ± 5 мм. Источником нагрева служат трубчатые электронагреватели (ТЭНы). Контроль за режимом их работы ведётся с помощью термоэлектрических преобразователей.

Контроль температуры внутри печи в процессе нагрева осуществляется термопарой, которая монтируется в центре держателя образца на удалении (10 ± 1) мм от его поверхности. Для отвода газообразных продуктов, образующихся при нагреве, в тыльной части печи выполнено вентиляционное отверстие.

Блок управления нагревом обеспечивает возможность программирования режима испытаний. Узел крепления образца выполняет несколько функций: фиксацию испытываемого материала, его размещение внутри нагревательной камеры и тепловую изоляцию тыльной (необогреваемой) стороны. Изоляция реализована с помощью вермикулитового элемента, в котором выполнено углубление глубиной $(3 \pm 0,1)$ мм. Размещение образца в углубление позволяет блокировать прогрев через боковые стороны нанесённого огнезащитного слоя.

Регистрация температуры на необогреваемой поверхности образца производится термоэлектрическим преобразователем. Прижатие термоэлектрического преобразователя вермикулитовой крышкой создаёт устойчивый контакт с поверхностью образца.

Измеритель-регулятор служит для снятия показаний с двух термопар: одна контролирует режим нагрева печи, вторая фиксирует температуру прогрева образца. Диапазон измерений от -270 до 2500 °С, класс точности – не ниже 0,25, градуировка соответствует типу хромель-алюмель (ХА). Термоэлектрические преобразователи относятся к типу ХА (ТХА) и рассчитаны на измерение температур в интервале от -40 до 800 °С.

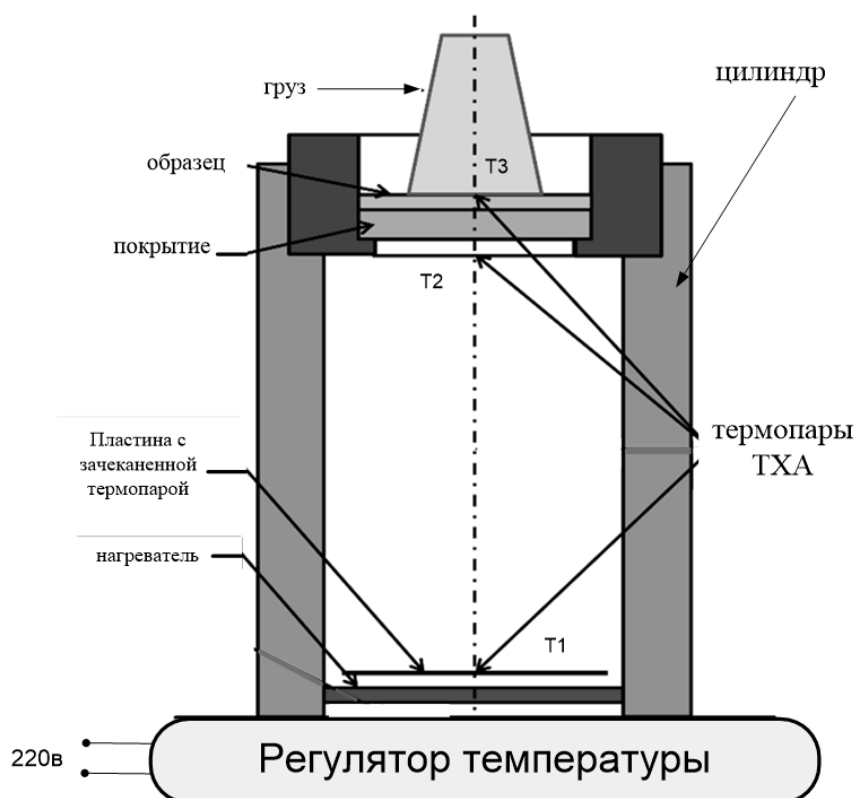


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. ТХА-термопара «хромель-алюмель»

Испытания проводятся при следующих климатических условиях: температура окружающей среды 10–30 °С, относительная влажность воздуха 40–80 %, атмосферное давление 84–106 кПа. Для каждого эксперимента готовят не менее пяти идентичных образцов – кружков из фанеры диаметром (65 ± 1) мм и толщиной $(3 \pm 0,1)$ мм.

Эксперимент выполняют при включённой вытяжной вентиляции. Перед началом испытаний образец помещают в углубление фланца и проверяют правильность установки термопары, фиксирующей температуру перед лицевой поверхностью образца. К тыльной стороне образца прижимают термоэлектрический преобразователь, измеряющий температуру прогрева. Включают регистрирующий прибор, который отображает температуру на ТЭНах.

В ходе эксперимента непрерывно фиксируют показания обеих термопар. Ключевым оценочным параметром теплоизолирующих

свойств покрытия служит промежуток времени от начала испытаний до момента, когда температура на необогреваемой стороне образца достигнет критического значения. По достижении этого значения испытание прекращают. Перед проведением последующего опыта печь должна быть охлаждена до температуры, превышающей температуру окружающей среды не более чем на 10 °С.

Для установления значений плотности тепловых потоков, воздействующих на поверхность образца, получены градуировочные зависимости падающего теплового потока в центре экспонируемой зоны от температуры нагревательного элемента, которые представлены в табл. 1. Измерения теплового потока выполнялись преобразователем ТП-2000 с относительной погрешностью не более 5 %, температуры – термоэлектрическими преобразователями типа ХА (класс допуска 2) (ТХА).

Таблица 1. Зависимость плотности падающего теплового потока от температуры перед образцом в камере печи

№ п/п	Температура на нагревательном элементе T_1 , °C	Температура в камере перед образцом T_2 , °C	Падающий тепловой поток Q , кВт/м ²
1	275 ± 4	150 ± 4	2,7±0,2
2	375 ± 5	200 ± 4	4,8±0,3
3	450 ± 5	250 ± 4	6,7±0,5
4	510 ± 5	300 ± 4	9,0±0,6
5	555 ± 6	350 ± 4	11,8±0,8
6	605 ± 6	400 ± 5	16,0±1,0
7	660 ± 6	450 ± 5	20,0±1,0
8	695 ± 6	500 ± 5	24,0±2,0

Оценку неопределённости измерений выполняли в соответствии со стандартными методиками^{2,3}.

Оценка неопределённости измерений – это процесс, который позволяет оценить разброс измеренных значений, в пределах которого они могут быть объективно приписаны измеряемой величине³.

Рассмотрим на примере расчет при $T_2 = (200 \pm 4) \text{ }^\circ\text{C}$.

Значения температуры при температуре установки на нагревательном элементе 375,1 °C, зарегистрированные преобразователем ТХА (термопара хромель-алюмель), составили 200,1; 200,0; 200,0; 200,1; 200,1 °C. Показания приемника теплового потока составили 4,8; 4,7; 4,9; 4,7; 4,8 кВт/м².

Расчет неопределенности типа А для измерений температуры преобразователем ТХА выполнялся по следующим формулам [1-3].

Среднее арифметическое значение определялось по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где x_i – результаты отдельных измерений, n – количество измерений.

$$\bar{x} = \frac{(200,1 + 200,0 + 200,0 + 200,1 + 200,1)}{5} = 200,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Стандартное отклонение выборки рассчитывалось по формуле:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

В результате вычислений получено $s = 0,05477 \text{ }^\circ\text{C}$.

Стандартная неопределенность типа А определялась по формуле:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$u_A = \frac{0,05477}{\sqrt{5}} = 0,0245 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Расчет неопределенности типа В выполнялся на основе паспортных данных средств измерений [1-3].

Для измерителя-регулятора, используемого при измерении температуры преобразователем ТХА, относительная погрешность составляет 0,5 %. Границы интервала, в которых находится измеряемая величина, определялись как произведение относительной погрешности на среднее значение температуры (200,1 °C). При предполагаемом равномерном распределении вероятность нахождения величины внутри интервала одинакова, поэтому стандартная неопределенность типа В рассчитывалась по формуле [1-3]:

$$u_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где Δ – полуширина интервала, в котором равномерно распределена случайная величина.

² ГОСТ 8.736 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения многократные. Методы обработки результатов измерений».

³ ГОСТ 34100.3-2017 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения».

Подстановка значений для измерителя-регулятора (при работе с ТХА):

$$\Delta = 0,005 \cdot 200,1 = 1,0005 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$u_{B1} = \frac{1,0005}{\sqrt{3}} = 0,5777 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для преобразователя термоэлектрического ТХА класса допуска 2 пределы допускаемой погрешности составляют $\Delta = 2,5, ^\circ\text{C}$ (без учета слагаемого, зависящего от температуры, так как в паспортных данных указано большее значение). При равномерном распределении стандартная неопределенность равна [1-3]:

$$u_{B2} = \frac{2,5}{\sqrt{3}} = 1,443 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчет суммарной стандартной неопределенности для измерений температуры преобразователем ТХА. Суммарная стандартная неопределенность определяется путем суммирования стандартных неопределенностей типа А и типа В по формуле:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad (6)$$

$$u_c = \sqrt{(0,0245)^2 + (0,5777)^2 + (1,443)^2} = 1,554 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчет расширенной неопределенности для измерений. Расширенная неопределенность определяется путем умножения суммарной стандартной неопределенности на коэффициент охвата. Коэффициент Стьюдента (t) используется при обработке результатов измерений с малым количеством данных – менее 30 измерений [1-3].

Коэффициент Стьюдента для:

$$P = 0,95, \nu = n - 1 = 4:$$

$$t_{0,95;4} = 2,776$$

$$U = t_{0,95;4} \times u_c$$

В результате вычислений получено $U = 2,776 \times 1,554 = 4,314 \text{ } ^\circ\text{C}$

Температура, измеренная преобразователем ТХА, составила: $T_2 = (200 \pm 4) \text{ } ^\circ\text{C}$, где расширенная неопределенность $U = 4,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ получена при коэффициенте охвата $t_{0,95;4} = 2,776$, что для нормального распределения соответствует доверительной вероятности $P = 0,95$.

Аналогично были проведены расчёты для всех температурных режимов.

Определение

критической температуры

По разрабатываемой методике необходимо определение критической температуры. Под критической температурой понимается такое значение температуры, при превышении которой начинает происходить термическая деструкция материала. Определение численного значения критической температуры для древесины был использован метод термического анализа. Испытание проводилось на термоанализаторе в среде воздуха, при скорости нагрева $20 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$. Результаты термического анализа представлены на рис. 2.

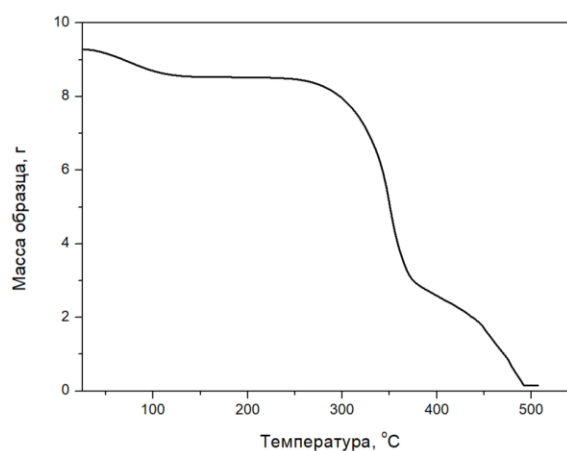


Рис. 2. Кривая термического анализа образца древесины сосны

Термогравиметрическая кривая характеризуется несколькими участками, что согласуется с литературными источниками [4, 5]. На первом участке до температуры $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ происходит удаление воды. Второй участок термодеструкции начинается с температуры $250 \text{ } ^\circ\text{C}$ и продолжается до $370 \text{ } ^\circ\text{C}$ и сопровождается потерей примерно 50 % от изначальной массы образца. Третий участок с $370 \text{ } ^\circ\text{C}$ и до $500 \text{ } ^\circ\text{C}$. Авторами [4] указывается, что процесс термической деструкции непосредственно древесины начинается с температуры $180 \text{ } ^\circ\text{C}$. При этом с увеличением температуры скорость термической деструкции увеличивается. Поэтому, на основе собственных и литературных данных значение критической температуры в эксперименте по оценке эффективности теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий для древесины выбрано значение $200 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Результаты испытаний

По результатам исследований получены следующие зависимости прогрева пластины слоеной фанеры от вида нанесённого покрытия (рис. 3.).

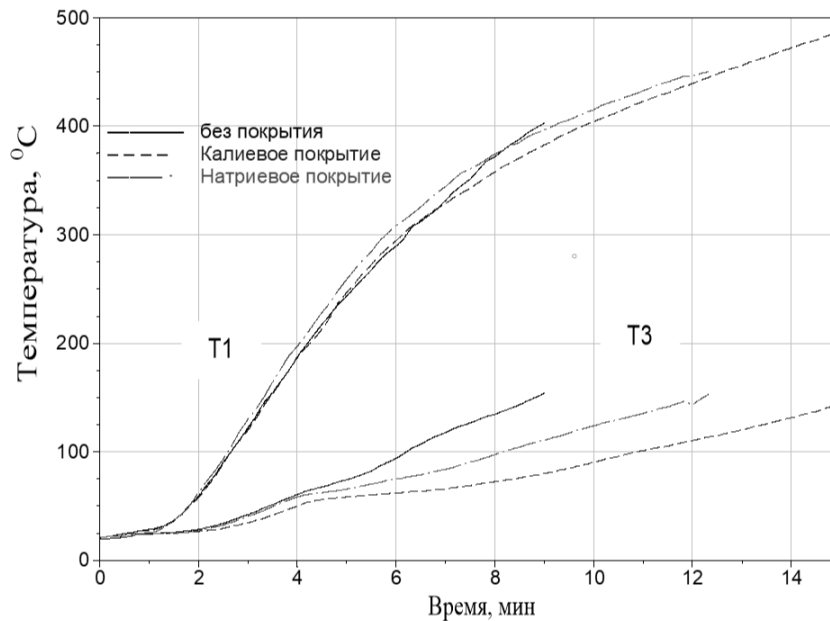


Рис. 3. Температурные зависимости прогрева образцов с различным покрытием и толщиной в 4 слоя. T1 – температура в печи, T3 – температура не обогреваемой стороны образца

Из полученных зависимостей видно, что время прогрева образца без покрытия до 100,0 °C достигает через 6,2 мин, до 150,0 °C через 8,8 мин. Соответственно для образцов с покрытием равной толщины для натриевого стекла составили 6,0 и 9,0 мин, а калиевого стекла – 10,8 и 15,4 мин.

Дальнейшим этапом исследования было определение теплоизолирующих свойств

огнезащитных составов для древесины. В качестве объектов были использованы огнезащитные составы ведущих отечественных производителей различного принципа действия (огнезащитный состав на основе антипиренов, огнезащитный состав интумесцентного типа), а также покрытие, на основе отвердевшей жидкостекольной пены толщиной 10 и 15 мм. Результаты испытаний приведены на рис. 4.

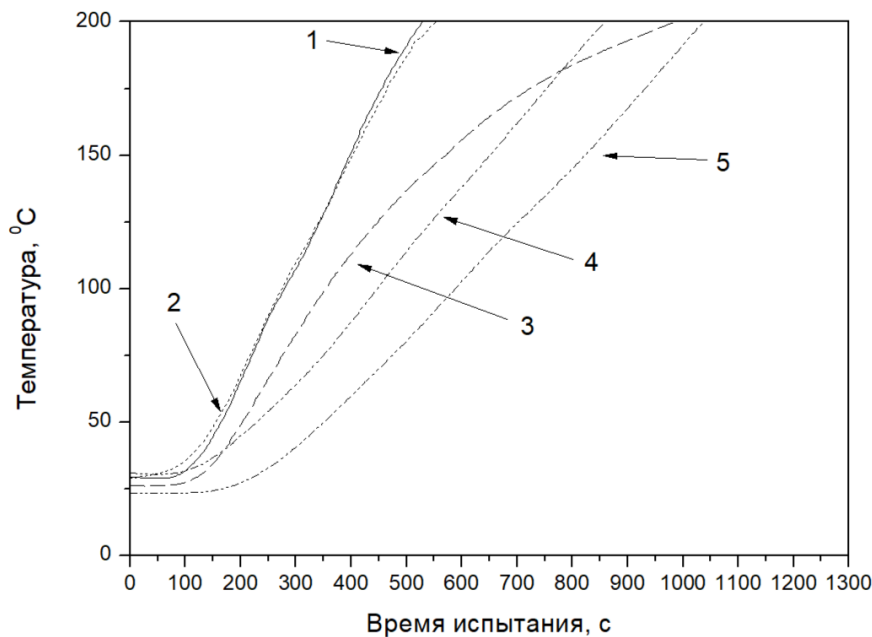


Рис. 4. Температура на необогреваемой стороне образца древесины:
 1 – необработанная древесина;
 2 – древесина, обработанная огнезащитным составом;
 3 – древесина, обработанная огнезащитным составом интумесцентного типа;
 4 – древесина с отвердевшим слоем быстротвердеющей пены толщиной 10 мм;
 5 – древесина с отвердевшим слоем быстротвердеющей пены толщиной 15 мм

Обработка древесины огнезащитным составом на основе антипиренов (3) на ранних этапах обеспечивает более быстрый нагрев образца древесины. В дальнейшем процесс замедляется, что вызвано протеканием химических эндотермических реакций деструкции компонентов огнезащитного состава. Более медленное достижение критической температуры наблюдаются при обработке огнезащитным составом интумесцентного типа. Однако, несмотря на образование вспученного слоя в процессе испытания, критическая температура достигается за 15,5 мин, что больше, чем для состава на основе быстротвердеющей пены толщиной 10 мм, для которого время достижения критической температуры составляет 14 мин. При увеличении толщины состава на основе быстротвердеющей пены до 15 мм время достижения критической температуры увеличивается до 17,5 мин.

Заключение

В результате выполнения работы достигнута поставленная цель – разработана лабораторная установка и методика испытаний для количественной оценки теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по древесине, обеспечивающая достоверность и повторяемость результатов. На основании проведенных исследований сформулированы следующие основные выводы:

1. Разработанная экспериментальная установка позволяет воспроизводить тепловое воздействие в диапазоне плотностей падающего теплового потока от 2,7 до 24,0 кВт/м² при температурах в камере перед образцом от 150 до 500 °С. Выполнена градуировка установки

(табл. 1) и проведена оценка расширенной неопределённости измерений температуры ($U = 4$ °С при доверительной вероятности $P = 0,95$) и теплового потока, что обеспечивает метрологическую корректность сравнения различных огнезащитных составов.

2. На основе данных термического анализа и литературных сведений обосновано значение критической температуры для древесины, равное 200 °С. Превышение данной температуры инициирует активную термическую деструкцию материала с потерей массы до 50 % в диапазоне 250–370 °С.

3. Экспериментально установлено, что применение огнезащитных покрытий на основе жидкого стекла позволяет увеличить время прогрева образца фанеры до 100 °С и 150 °С по сравнению с незащищённым образцом. Покрытие на основе калиевого жидкого стекла обеспечивает более высокие теплоизолирующие свойства (время прогрева до 150 °С – 15,4 мин) по сравнению с натриевым жидким стеклом (9,0 мин) при одинаковой толщине покрытия (4 слоя).

4. Предложенная методика и установка могут быть использованы для:

- сравнительного анализа теплоизолирующей эффективности огнезащитных покрытий различных типов;
- оптимизации толщины и количества слоёв покрытия;
- контроля качества огнезащитных составов на этапе производства и эксплуатации;
- предварительного скрининга новых рецептов перед крупномасштабными огневыми испытаниями, что позволяет существенно снизить материальные и временные затраты.

Список литературы

1. Ольховский А. Н., Крикун В. М. Оценка неопределённости или оценка погрешности? // Методы оценки соответствия. 2009. № 12. С. 30–35. EDN: МТЕНСJ.

2. Воронова Т. С., Пильцов М. В., Кулыгин В. А. Неопределённость измерений при определении их точности // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2023. № 20. С. 12–15. EDN: BGCWGS.

3. Оценка неопределённости измерений: сравнение методов GUM и Монте-Карло на примере биметаллического термометра / Б. Қ. Ермек, Р. С. Беккожин, А. Әлиқызы [и др.] // Вестник Академии гражданской авиации. 2025. № 4 (39). С. 82–97. DOI: 10.53364/24138614_2025_39_4_7. EDN: DHPVXV.

4. Федотов И. О., Сивенков А. Б., Нагановский Ю. К. Эффективность огнезащитных пропиточных составов для деревянных конструкций // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 67–78. EDN: IWXLOX/

5. Котлярова И. А., Степина И. В. Определение кинетических параметров термодеструкции и группы огнезащитной эффективности древесины сосны, модифицированной боразотным антипиреном // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 1. С. 70–77. EDN: CMNSDH.

References

1. Olkhovskiy A. N., Krikun V. M. Otsenka neopredelennosti ili otsenka pogreshnosti?

[Uncertainty Estimation or Error Estimation?]. *Metody otsenki sootvetstviya*, 2009, issue 12, pp. 30-35.

2. Voronova T. S., Piltsev M. V., Kulygin V. A. Neopredelennost' izmereniy pri opredelenii ikh tochnosti [Measurement Uncertainty in Determining Their Accuracy]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2023, issue 20, pp. 12–15.

3. Otsenka neopredelennosti izmereniy: sravneniye metodov GUM i Monte-Karlo na primere bimetallicheskogo termometra [Evaluation of Measurement Uncertainty: Comparison of the GUM and Monte Carlo Methods Using the Example of a Bimetallic Thermometer] / B. K. Yermek, R. S. Bekkozhin, A. Alikyzy [et al.]. *Vestnik Akademii grazhdanskoj aviatsii*, 2025, issue 4(39), pp. 82–97. DOI: 10.53364/24138614_2025_39_4_7.

4. Fedotov I. O., Sivenkov A. B., Nagovskiy Yu. K. Effektivnost' ognezashchitnykh propitochnykh sostavov dlya derevyannykh konstruktiv [Effectiveness of Fire-Retardant Impregnating Compounds for Wooden Structures]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2023, vol. 3 (67), pp. 67–78.

5. Kotlyarova I. A., Stepina I. V. Opredeleniye kineticheskikh parametrov termodestruksii i gruppy ognezashchitnoy effektivnosti drevesiny sosny, modifitsirovannoy borazotnym antipirenom [Determination of Thermal Destruction Kinetic Parameters and Fire Protection Efficiency Group of Pine Wood Modified with Boron-Nitrogen Fire Retardant]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova*, 2020, issue 1, pp. 70–77.

Сиплатов Евгений Александрович

ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Российская Федерация, Московская обл., г. Балашиха

начальник отдела (инструментальных методов контроля в области пожарной безопасности)

научно-исследовательского центра технического регулирования

E-mail: siplatov82@mail.ru

Siplatov Yevgeniy Aleksandrovich

FSBI VNIIPPO of EMERCOM of Russia,

Russian Federation, Balashikha

Head of Department (instrumental control methods in the field of fire safety)

of the Scientific Research Center for Technical Regulation

E-mail: siplatov82@mail.ru

УДК 620.197.3

DOI 10.48612/ntp/kmau-fk1h-h9t1

ОЦЕНКА ИНГИБИРУЮЩЕЙ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ РЕЗЕРВУАРОВ ОТ БИОКОРРОЗИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

И. Ф. ХАФИЗОВ, Р. М. СУЛТАНОВ, В. И. БИКМЕЕВ, Д. Р. БАКИРОВ, И. В. ОЗДЕН

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Российская Федерация, г. Уфа

E-mail: ildar.hafizov@mail.ru, sultanov55@mail.ru, vadudusbikmееv@gmail.com,

damir.bakirov.99@mail.ru, inessa_21bk.ru

В данной статье анализируется проблема коррозионного разрушения металлоконструкций резервуарного парка нефтегазового комплекса, которая представляет собой одну из основных угроз безопасной и рентабельной эксплуатации объектов хранения нефтепродуктов. Помимо значительных экономических потерь и экологических рисков, остро стоит вопрос пожарной безопасности, поскольку коррозионное истончение стенок резервуаров и трубопроводов повышает риск их разгерметизации с последующим возникновением пожаров и взрывов при контакте горючих жидкостей и газов с источниками зажигания. Ключевое влияние на снижение пожарной опасности заключается в предотвращении разгерметизации резервуара: устраняя коррозию, мы предотвращаем утечку горючей среды, тем самым ликвидируя саму возможность образования взрывоопасной паровоздушной смеси в зоне потенциальных источников зажигания.

Исследование сосредоточено на сравнительной оценке эффективности пяти ингибиторов коррозии: КОРБС-имидазолин-неонол, 1,3,5-тиадиазинан-4-тион, 1,3-бис(диметиламинометил)-тиомочевина, N'N'-бис[(тетрагидро-4Н-1,4-оксазин-4-ил)-метил]тиомочевина и реагент ПСМ-1, в условиях микробиологической коррозии при температуре 35 °С в течение 14 суток. Для определения защитных свойств применялся гравиметрический метод в соответствии с ГОСТ 9.506-87, позволяющий на основе измерения потери массы стальных образцов (сталь Ст3) в пластовой воде с ингибитором и без него рассчитать скорость коррозии и степень защиты.

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в виде количественных значений степени защиты, показали высокую эффективность ингибиторов ПСМ-1 (88,91 %) и 1,3,5-тиадиазинан-4-тиона (87,02 %), среднюю эффективность состава КОРБС-имидазолин-неонол (74,4 %), низкую – 1,3-бис(диметиламинометил)-тиомочевина (55,74 %). При этом некоторые комбинации ингибиторов продемонстрировали отрицательные значения степени защиты (от -33 % до 26,5 %), что свидетельствует о неэффективности смесевых составов в исследуемых условиях.

Таким образом, результаты исследования подчёркивают необходимость предварительного тестирования ингибиторов коррозии гравиметрическим методом на образцах-свидетелях перед промышленным применением, а также обосновывают рекомендацию ингибиторов ПСМ-1 и 1,3,5-тиадиазинан-4-тиона (степень защиты >87 %) для защиты внутренней поверхности резервуаров хранения нефтепродуктов от биокоррозии, что позволяет минимизировать риски аварийных ситуаций, продлить межремонтный срок службы оборудования и снизить экономические потери.

Ключевые слова: гравиметрический метод, коррозия, ингибиторы коррозии, скорость коррозии, нефтегазовое оборудование, биокоррозия, степень защиты, резервуарный парк, сталь Ст3, пожарная безопасность.

ASSESSMENT OF INHIBITORY PROTECTION OF METAL STRUCTURES OF TANKS FROM BIOCORROSION BY GRAVIMETRIC METHOD AS A FACTOR OF FIRE HAZARD REDUCTION

I. F. HAFIZOV, R. M. SULTANOV, V. I. BIKMEEV, D. R. BAKIROV, I. V. OZDEN

Ufa State Petroleum Technical University,

Russian Federation, Ufa.

E-mail: ildar.hafizov@mail.ru, sultanov55@mail.ru, damir.bakirov.99@mail.ru,

bakirov_robert@mail.ru, pcpb@mail.ru

This article analyzes the problem of corrosion destruction of metal structures in the tank farm of the oil and gas complex, which is one of the main threats to the safe and cost-effective operation of oil products storage facilities. In addition to significant economic losses and environmental risks, the issue of fire safety is acute, since the corrosive thinning of the walls of tanks and pipelines increases the risk of their depressurization, followed by fires and explosions when flammable liquids and gases come into contact with ignition sources. The key impact on reducing fire hazard is to prevent tank depressurization: by eliminating corrosion, we prevent the leakage of a combustible medium, thereby eliminating the very possibility of an explosive vapor-air mixture forming in the area of potential ignition sources.

The study focuses on a comparative assessment of the effectiveness of five corrosion inhibitors: CORBS-imidazoline-neonol, 1,3,5-thiadiazinan-4-thione, 1,3-bis(dimethylaminomethyl)-thiourea, N'N'-bis[(tetrahydro-4H-1,4-oxazine-4-yl)-methylthiourea and PSM-1 reagent, under conditions of microbiological corrosion at a temperature of 35 ° C for 14 days. To determine the protective properties, the gravimetric method was used in accordance with GOST 9.506-87, which makes it possible to calculate the corrosion rate and degree of protection based on measuring the mass loss of steel samples (St3 steel) in reservoir water with and without an inhibitor.

Experimental studies, the results of which are presented in the form of quantitative values of the degree of protection, showed high efficacy of PSM-1 inhibitors (88.91 %) and 1,3,5-thiadiazinan-4-thione (87.02 %), average efficacy of the composition of CORBS-imidazoline-neonol (74.4 %), low – 1,3-bis(dimethylaminomethyl)-thiourea (55.74 %). At the same time, some combinations of inhibitors demonstrated negative values of the degree of protection (from -33 % to 26.5 %), which indicates the ineffectiveness of the mixtures under the conditions studied.

Thus, the results of the study emphasize the need for preliminary testing of corrosion inhibitors by gravimetric method on witness samples before industrial use, and also justify the recommendation of PSM-1 and 1,3,5-thiadiazinan-4-thion inhibitors (degree of protection >87 %) to protect the internal surface petroleum product storage tanks from biocorrosion, which minimizes the risks of emergency situations, prolong repair the service life of the equipment and reduce economic losses.

Keywords: gravimetric method, corrosion, corrosion inhibitors, corrosion rate, oil and gas equipment, biocorrosion, degree of protection, tank farm, steel St3, fire safety.

Введение

Разрушение металла в результате коррозии представляет собой ключевую угрозу для безопасной и рентабельной эксплуатации объектов нефтегазового комплекса. Это явление напрямую влияет на эксплуатационную целостность технологических систем, снижая несущую способность и герметичность магистралей, емкостей и технологических аппаратов. Последствиями являются повышенные риски аварийных ситуаций, непроизводительные потери сырья, значительные расходы на восстановление и ремонт, а также вероятность экологических инцидентов. С позиций пожарной безопасности коррозионное разрушение опасно, так как даже микротрещины и сквозные дефекты в стенках резервуаров с легковоспламеняющимися жидкостями могут привести к утечке горючей среды и образованию взрывоопасных паровоздушных смесей, способных воспламениться от любого источника зажигания [12–15]. При этом важно подчеркнуть, что сам по себе розлив нефтепродукта из-за коррозии не является горением, однако он создаёт главное условие для пожара – горючую среду; устранение коррозии предотвращает утечку, тем самым ликвидируя саму возможность возникновения пожара от разлива. В этой связи задачи регулярного контроля

и достоверного определения интенсивности коррозионного износа приобретают первостепенное значение для корректного подбора конструкционных материалов, оценки их остаточного ресурса и разработки стратегий защиты.

В арсенале способов оценки коррозии гравиметрический (весовой) подход занимает позицию базового и наиболее достоверного количественного метода. Его суть заключается в точной регистрации уменьшения массы эталонного образца (свидетеля) после его выдержки в исследуемой коррозионной среде. Благодаря своей простоте, наглядности и прямой физической интерпретации, этот способ считается эталонным и широко используется для верификации данных, полученных с помощью косвенных измерительных техник, например, электрохимических или основанных на изменении электрического сопротивления [1, 3].

С помощью данного метода можно в полной мере определить скорость образования биокоррозии на металлическом оборудовании хранения нефтяных продуктов, в частности в Резервуарном парке [6, 8]. Замедление коррозии с помощью ингибиторов, оцениваемое гравиметрическим методом, напрямую увеличивает герметичность и механическую прочность резервуаров, что является одной из ключевых

мер предотвращения пожаров и взрывов на нефтегазовых объектах [10, 12]. Данный метод расчета основан на том, что скорость коррозии определяется по потере массы образцов-свидетелей, выполненных из того же металла, из которого изготовлено оборудование.

В данной работе обзор гравиметрического метода определения коррозии будет использован для определения скорости ее образования на металлических основаниях нефтяных резервуарах.

Материалы и метод исследования

В качестве объекта исследования были выбраны следующие марки ингибиторов коррозии:

- КОРБС-имидазолин-неонол;
- 1,3,5-тиадиазинан-4-тион;
- 1,3-бис(диметиламинометил) тиомочевина;
- N'N'-бис[(тетрагидро-4Н-1,4-оксазин-4-ил)-метил]тиомочевина;
- реагент ПСМ-1 «2-гидрокси-1-пергидро-(1,3,5-дителиазин-5-ил)»;

предназначенные для защиты металлоконструкций от образования биологической коррозии [2, 5, 6].

Уточним, что предлагаемый метод ингибиторной защиты направлен на внутреннюю поверхность резервуара (изнутри), контактирующую с перекачиваемой жидкостью. Защита снаружи (наружная антикоррозийная обработка) решает задачи предотвращения атмосферной коррозии и в данной работе не рассматривается. Все дальнейшие выводы относятся исключительно к ингибированию внутренней стенки резервуара.

КОРБС-имидазолин-неонол – однородная не расслаивающаяся жидкость от светлого до темно-коричневого цвета. Композиция на основе азотсодержащих органических соединений: термически стойкого азотсодержащего органического соединения, неионогенного поверхностно-активного вещества и кубового остатка бутиловых спиртов.

Ингибитор коррозии 1,3,5-тиадиазинан-4-тион – представляет собой белый, кристаллический порошок, без резкого запаха. Растворим в воде.

Таблица 1. Исходные данные для ингибитора КОРБС-имидазолин-неонол

Масса образца до испытания (г)		Масса образца после испытания (г)		Разность массы образцов (г)	
m5	6,9332	m5	6,9288	Δm_5	0,0044
m1	6,4335	m1	6,4307	Δm_1	0,0028
m9	7,0712	m9	7,0707	Δm_9	0,0005
m12	7,0424	m12	7,0414	Δm_{12}	0,0010
m7	6,9332	m7	6,9284	Δm_7	0,0048
m11	6,7087	m11	6,7080	Δm_{11}	0,0007

Таблица 2. Исходные данные для ингибитора 1,3,5-тиадиазинан-4-тион

Масса образца до испытания (г)		Масса образца после испытания (г)		Разность массы образцов (г)	
m5	6,8907	m5	6,8873	$\Delta 5$	0,0034
m7	6,6419	m7	6,6386	$\Delta 7$	0,0033
m12	7,0057	m12	7,0039	$\Delta 12$	0,0018
m7*	6,2103	m7*	6,2026	$\Delta 7^*$	0,0077
m3	6,8138	m3	6,8113	$\Delta 3$	0,0025
m9	7,0415	m9	7,0380	$\Delta 9$	0,0035

Ингибитор коррозии 1,3-бис(диметиламинометил)-тиомочевина – представляет собой белый порошок с резким запахом. В воде не растворяется, при растворении в этиловом спирте дает осадок. Растворение без осадка в диметилсульфоксиде.

Ингибитор коррозии N'N'-бис[(тетрагидро-4Н-1,4-оксазин-4-ил)-

метил]тиомочевина – реагент представляет собой белые кристаллы с резким запахом. Растворим в воде.

Ингибитор коррозии ПСМ-1 «2-гидрокси-1-пергидро-(1,3,5-дителиазин-5-ил)» – реагент представляет собой светло-красную жидкость. Растворим в воде.

Таблица 3. Исходные данные для ингибитора 1,3-бис(диметиламинометил)-тиомочевина

Масса образца до испытания (г)		Масса образца после испытания (г)		Разность массы образцов (г)	
m5	6,8655	m5	6,8610	Δm_5	0,0045
m7	6,6173	m7	6,6152	Δm_7	0,0021
m12	6,7915	m12	6,7907	Δm_{12}	0,0008
m7*	6,1650	m7*	6,1636	Δm_{7^*}	0,0015
m3	6,9816	m3	6,9798	Δm_3	0,0018
m9	7,0137	m9	7,0122	Δm_9	0,0015

Таблица 4. Исходные данные для ингибитора N'N'-бис[(тетрагидро-4Н-1,4-оксазин-4-ил)-метил]тиомочевина

Масса образца до испытания (г)		Масса образца после испытания (г)		Разность массы образцов (г)	
m5	6,9332	m5	6,9328	Δm_5	0,0004
m7	6,6781	m7	6,6748	Δm_7	0,0033
m3	6,8499	m3	6,8467	Δm_3	0,0035
m7*	6,2635	m7*	6,2593	Δm_{7^*}	0,0042
m1*	7,2155	m1*	7,2135	Δm_{1^*}	0,0020
m4	7,1788	m4	7,1773	Δm_9	0,0015

Таблица 5. Исходные данные для ингибитора ПСМ-1 «2-гидрокси-1-пергидро-(1,3,5-дитиазин-5-ил)»

Масса образца до испытания (г)		Масса образца после испытания (г)		Разность массы образцов (г)	
m5*	6,9030	m5	6,9026	Δm_5	0,0004
m7	6,6762	m7	6,6756	Δm_7	0,0006
m3	6,8243	m3	6,8233	Δm_3	0,0010
m7*	6,2667	m7*	6,2655	Δm_{7^*}	0,0012
m1*	7,2056	m1*	7,2049	Δm_{1^*}	0,0007
m4	7,1567	m4	7,1558	Δm_9	0,0009

Метод заключается в определении потери массы металлических образцов за время их пребывания в ингибированной и неингибированной испытуемых средах с последующей оценкой защитной способности ингибитора по изменению скорости коррозии. Коррозионные испытания проводят на пластинах из стали марки Ст3 в ячейках объемом 100 мл при комнатной температуре в течение 6 часов (рис. 1), после чего их помещают в Термостат, отстаиваться в среде с воздействием на них микроорганизмов при температуре 35 градусов в течение 14 суток.



Рис. 1. Подготовка образцов

Образцы готовились к испытанию по ГОСТ 9.506-87¹. Поверхности пластин шлифуют и обезжиривают ацетоном. Для активации поверхности образца перед испытанием его погружают на 1 мин в раствор 15%-ной соляной кислоты, затем тщательно промывают проточной и дистиллированной водой, высушивают фильтровальной бумагой, упаковывают в нее, выдерживают в эксикаторе с влагопоглотителем в течение 1 ч и взвешивают на аналитических весах².

В исследуемые среды дозируют необходимое количество ингибитора: 0,0015 мг на 100 мл пластовой воды. Подготовленные образцы помещают в аппарат с испытуемой средой и выдерживают в течение 6 часов.

После этого, испытуемые образцы, находящиеся в агрессивной среде, помещаются в Термостат на 14 суток.

Сразу после испытаний образцы подвергают визуальному осмотру: определяют наличие и цвет продуктов коррозии, после снятия продуктов коррозии – характер коррозии (рис. 2).



Рис. 2. Образцы после испытания

Для определения потери массы образцов их поверхность должна быть очищена в следующей последовательности:

1) рыхлые продукты коррозии удаляют шпателем, щеткой и одним из растворителей: бензином, керосином или уайт-спиритом;

2) при наличии плотной пленки из продуктов коррозии допускается их удаление

¹ ГОСТ 9.506-87 (СТ СЭВ 5340-85). Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Методы испытаний ингибиторов коррозии металлов в водных системах. Введ. 1989-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1988. 14 с.

растворами, не взаимодействующими с основным металлом;

3) образцы промывают водопроводной и дистиллированной водой, высушивают фильтровальной бумагой, обезжиривают ацетоном, упаковывают в фильтровальную бумагу, выдерживают в эксикаторе с влагопоглотителем в течение 1 ч и взвешивают на аналитических весах [2].

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследования расчет проводился по следующим формулам [1, 3]:

Скорость коррозии (V_k) в $\text{г}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$ вычисляют по формуле:

$$V_k = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot \tau}, \quad (1)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г;
 m_2 – масса образца после испытания, г;
 S – площадь поверхности образца, м^2 ;
 τ – время испытания, ч.

Степень защиты (Z) в процентах вычисляют по формуле:

$$Z = \frac{V_{k0} - V_{k1}}{V_{k0}} \cdot 100, \quad (2)$$

где V_{k0} – скорость коррозии образцов в неингибированной среде, $\text{г}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$;

V_{k1} – скорость коррозии образцов в ингибированной среде, $\text{г}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$.

Для пояснения термина: под защитной способностью ингибитора в данной статье понимается комплексный показатель, характеризующий эффективность подавления электрохимической коррозии, выражаемый в процентах и рассчитываемый по формуле (2). Иными словами, это доля (в процентах), на которую ингибитор снижает скорость разрушения металла. Значение $Z > 90\%$ соответствует высокой защитной способности.

Степень защиты ингибитора КОРБС-имидазолин-неонл

Время проведения опыта: 6 часов.

Для проведения испытания было взято: две колбы с раствором ингибитора, в которые поместили пластины 12–9, 1*–11; одна колба с чистой пластовой водой, в которую поместили пластины 7*–5.

² ГОСТ 9.905-2007. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Методы коррозионных испытаний. Общие требования. Введ. 2009-01-01. М.: Стандартинформ, 2008. 12 с.

Таблица 6. Площадь поверхности пластин

Номер пластины	Площадь пластины (мм ²)	Номер пластины	Площадь пластины (мм ²)
m5	1,4378608	m1*	1,2001216
m7	1,4178854	m9	1,6316246
m3	1,4378608	m11	1,619895
m7*	1,2340246	m12	1,6402854

Рассчитываем скорость коррозии по формуле (1):

$$V_{12-9} = 0,0008 / (0,016360 \cdot 3) = 0,1629992 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{1^*-11} = 0,0018 / (0,0141 \cdot 3) = 0,04255319 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{7^*-5} = 0,0046 / (0,01336 \cdot 3) = 0,11477046 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}.$$

Рассчитываем степень защиты от коррозии по формуле (2):

$$Z_{12-9} = ((0,11477046 - 0,1629992) / 0,11477046) \cdot 100\% = 85,8\%;$$

$$Z_{1^*-11} = ((0,11477046 - 0,04255319) / 0,11477046) \cdot 100\% = 63\%;$$

$$Z_{\text{ср}} = (Z_{12-9} + Z_{1^*-11}) / 2 = (85,8 + 63) / 2 = 74,4\%.$$

Результаты эксперимента приведены на рис. 3.

Вывод: среднее значение степени защиты 74,4 %, относится к среднеэффективным ингибиторам.

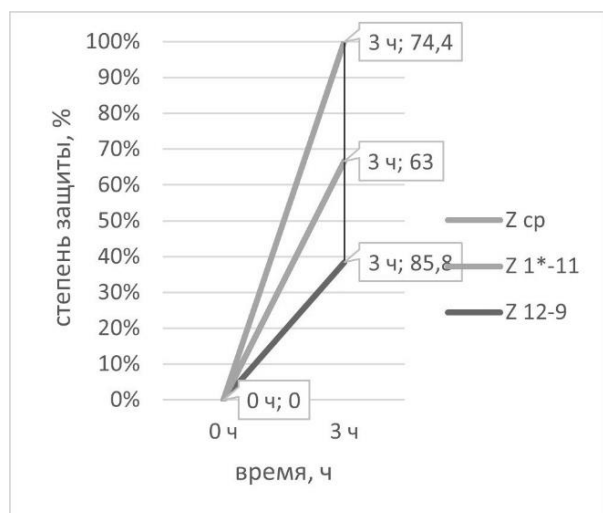


Рис. 3. График зависимости эффективности ингибитора КОРБС-имидазолин-неонол от времени испытания

Степень защиты ингибитора 1,3,5-тиадиазинан-4-тион

Время проведения опыта: 6 часов.

Для проведения испытания было взято: две колбы с раствором ингибитора, в которые поместили пластины 9–3, 12–7; одна колба с чистой пластовой водой, в которую поместили пластины 7*–5.

Рассчитываем скорость коррозии по формуле (1):

$$V_{12-7} = 0,00255 / (1,5290854 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,00279 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{3-9} = 0,003 / (1,534555 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,00935 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{7^*-5} = 0,00375 / (1,3359427 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,0468 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}.$$

Рассчитываем степень защиты от коррозии по формуле (2):

$$Z_{12-7} = ((0,0468 - 0,00279) / 0,0468) \cdot 100\% = 94,03\%;$$

$$Z_{3-9} = ((0,0468 - 0,00935) / 0,0468) \cdot 100\% = 80\%;$$

$$Z_{\text{ср}} = (Z_{12-7} + Z_{3-9}) / 2 = (94,03 + 80) / 2 = 87,02\%.$$

Результаты эксперимента приведены на рис. 4.

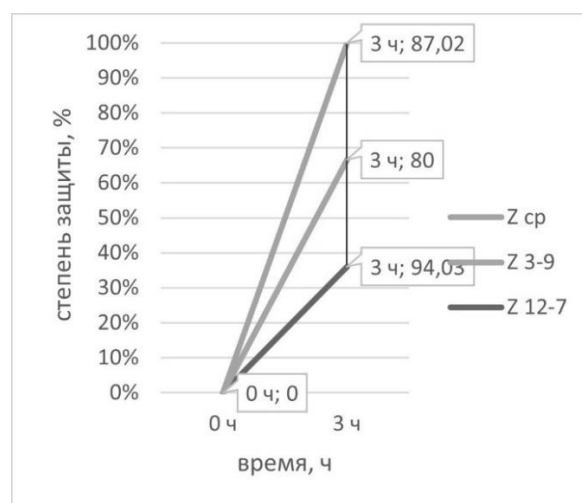


Рис. 4. График зависимости эффективности ингибитора 1,3,5-тиадиазинан-4-тион от времени испытания

Вывод: среднее значение степени защиты 87,02 %, относится к высокоэффективным ингибиторам.

Степень защиты ингибитора

1,3-бис(диметиламинометил)-тиомочевина

Время проведения опыта: 6 часов.

Для проведения испытания было взято: две колбы с раствором ингибитора, в которые поместили пластины 7–3, 12–9; одна колба с чистой пластовой водой, в которую поместили пластины 7*–5.

Рассчитываем скорость коррозии по формуле (1):

$$V_{12-9} = 0,00161 / (1,635955 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,01640 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{3-7} = 0,00145 / (1,427685 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,01693 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{7^*-5} = 0,003 / (1,3359427 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,03743 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}.$$

Рассчитываем степень защиты от коррозии по формуле (2):

$$Z_{12-9} = ((0,03743 - 0,01640) / 0,03743) \cdot 100\% = 56,18\%;$$

$$Z_{3-7} = ((0,03743 - 0,01693) / 0,03743) \cdot 100\% = 54,76\%;$$

$$Z_{\text{ср}} = (Z_{12-9} + Z_{3-7}) / 2 = (56,18 + 54,76) / 2 = 55,74\%.$$

Результаты эксперимента приведены на рис. 5.

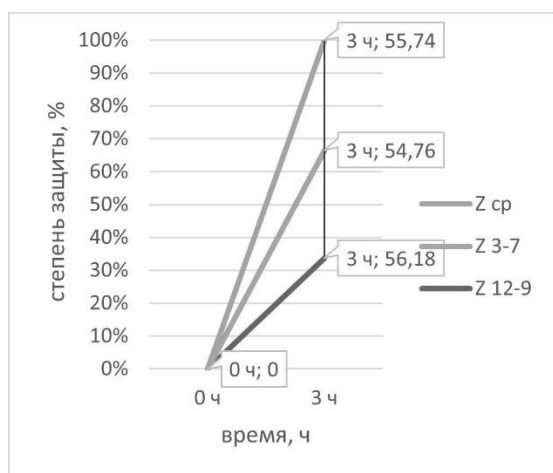


Рис. 5. График зависимости эффективности ингибитора 1,3-бис(диметиламинометил)-тиомочевина от времени испытания

Вывод: среднее значение степени защиты 55,74 %, относится к низкоэффективным ингибиторам.

Степень защиты ингибитора N'N' бис[(тетрагидро-4Н-1,4-оксазин-4-ил)-метил] тиомочевина

Время проведения опыта: 6 часов.

Для проведения испытания было взято: две колбы с раствором ингибитора, в которые поместили пластины 1*–4, 3–7; одна колба с чистой пластовой водой, в которую поместили пластины 7*–5.

Рассчитываем скорость коррозии по формуле (1):

$$V_{1^*-4} = 0,00175 / (1,0787475 \cdot 10^{-2} \cdot 3) = 0,00054 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{3-7} = 0,0034 / (1,4276854 \cdot 10^{-2} \cdot 3) = 0,0008 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{7^*-5} = 0,0023 / (1,3359427 \cdot 10^{-2} \cdot 3) = 0,0006 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}.$$

Рассчитываем степень защиты от коррозии по формуле (2):

$$Z_{1^*-4} = ((0,0006 - 0,00054) / 0,0006) \cdot 100\% = -10\%;$$

$$Z_{3-7} = ((0,0006 - 0,0008) / 0,0006) \cdot 100\% = -33,3\%;$$

$$Z_{\text{ср}} = (Z_{1^*-4} + Z_{3-7}) / 2 = (-33,3 + 10) / 2 = -21,5\%.$$

Результаты эксперимента приведены на рис. 6.

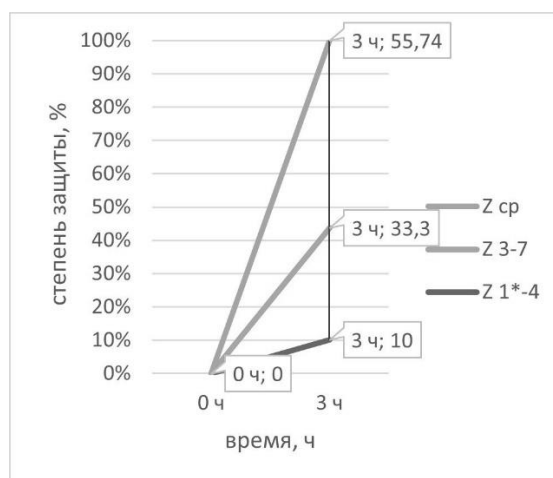


Рис. 6. График зависимости эффективности ингибитора N'N' бис[(тетрагидро-4Н-1,4-оксазин-4-ил)-метил] тиомочевина от времени испытания

Вывод: среднее значение степени защиты минус 12,5 %, относится к неэффективным ингибиторам.

Степень защиты ингибитора 1,3,5-тиадиазиан-4-тион с добавлением КОРБС-имидазолин-неонола

Время проведения опыта: 6 часов.

Для проведения испытания было взято: две колбы с раствором ингибитора, в которые поместили пластины 7*-5, 3-9; одна колба с чистой пластовой водой, в которую поместили пластины 7-12.

Рассчитываем скорость коррозии по формуле (1):

$$V_{7^*-5} = 0,001 / (1,3359247 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,000125 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{3-9} = 0,0018 / (1,534555 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,000195 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{7-12} = 0,002 / (1,5290854 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,000218 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}.$$

Рассчитываем степень защиты от коррозии по формуле (2):

$$Z_{7^*-5} = ((0,000218 - 0,000125) / 0,000218) \cdot 100 \% = 10,5 \%;$$

$$Z_{3-9} = ((0,000218 - 0,000195) / 0,000218) \cdot 100 \% = 42,7 \%;$$

$$Z_{\text{ср}} = (Z_{7^*-5} + Z_{3-9}) / 2 = (10,5 + 42,7) / 2 = 26,5 \%.$$

Результаты эксперимента приведены на рис. 7.

Вывод: среднее значение степени защиты 26,5 %, смесь относится к неэффективным ингибиторам.

Степень защиты ингибитора ПСМ

Время проведения опыта: 6 часов.

Для проведения испытания было взято: две колбы с раствором ингибитора, в которые поместили пластины 7*-5, 3-9; одна колба с чистой пластовой водой, в которую поместили пластины 7-12.

$$V_{12-7} = 0,00255 / (1,5290854 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,00467 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{3-9} = 0,003 / (1,534555 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,01135 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$V_{7^*-5} = 0,00375 / (1,3359247 \cdot 10^{-2} \cdot 6) = 0,0568 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}.$$

Рассчитываем степень защиты от коррозии по формуле (2):

$$Z_{12-7} = ((0,0568 - 0,00467) / 0,0568) \cdot 100 \% = 93,81 \%;$$

$$Z_{3-9} = ((0,0568 - 0,01135) / 0,0568) \cdot 100 \% = 84,01 \%;$$

$$Z_{\text{ср}} = (Z_{12-7} + Z_{3-9}) / 2 = (94,03 + 80) / 2 = 88,91 \%.$$

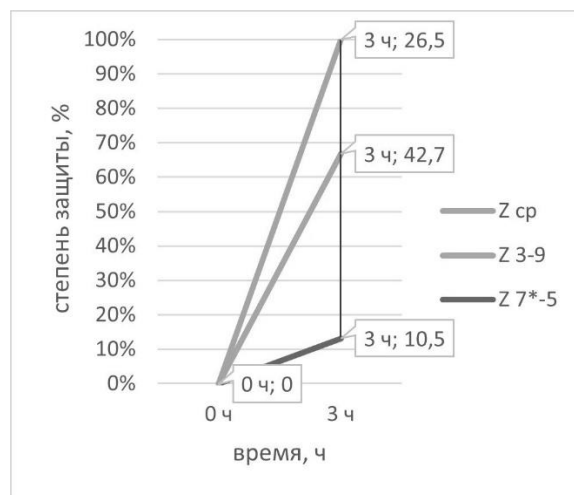


Рис. 7. График зависимости эффективности ингибитора 1,3,5-тиадиазиан-4-тион с добавлением КОРБС-имидазолин-неонола от времени испытания

В табл. 7 приведены результаты экспериментов.

Таблица 7. Результаты экспериментов

Ингибитор коррозии	Время испытания, ч	Степень защиты, %
КОРБС-Имидазолин-Неонол	6	74,4
1,3,5-тиадиазиан-4-тион	6	87,02
1,3-бис(диметиламинометил)-тиомочевина	6	56
N'N' бис[(тетрагидо-4Н-1,4-оксазин-4-ил)-метил] тиомочевина	6	-33
1,3,5-тиадиазиан-4-тион с добавлением КОРБС-имидазолин-неонола	6	26
ПСМ	6	88,91

Для выбора эффективной защиты резервуаров хранения нефтепродуктов от коррозии необходимо проводить исследования и подбирать наиболее технологически и экономически эффективные ингибиторы коррозии, учитывая новые их виды и технологии применения [2, 5, 8]. По результатам проведенных исследований высокую степень защиты 88,91 % проявил ингибитор ПСМ. Ингибитор может быть рекомендован к промышленным испытаниям, если при проверке в водной части водно-нефтяной среды степень защиты составляет не менее 80 % [8, 9].

Рекомендуется проводить обработку ингибиторами коррозии резервуары сразу после ввода с целью повышения сроков эксплуатации.

Заключение

Проведенный обзор гравиметрического метода определения скорости коррозии и результаты экспериментальных исследований позволяют сделать ряд обоснованных выводов. Гравиметрический метод, как показано в работе, остается наиболее достоверным и наглядным способом количественной оценки коррозионных потерь металлов. Его применение для моделирования условий эксплуатации нефтегазового оборудования дает возможность с высокой точностью определять скорость коррозионного разрушения и оценивать эффективность средств антикоррозионной защиты. Несмотря на относительную трудоемкость и длительность подготовки образцов, данный метод является базовым для верификации результатов, полученных с помощью экспресс-методов, и сохраняет свою актуальность как инструмент фундаментальных исследований и обоснованного выбора материалов.

В ходе экспериментальных исследований с использованием гравиметрического подхода были оценены пять составов ингибиторов коррозии на образцах стали Ст3 в среде пластовой воды. Полученные результаты позволили классифицировать исследуемые реагенты по степени защитной эффективности:

1. Высокоэффективные ингибиторы (степень защиты > 80 %): ингибитор ПСМ (88,91 %) и 1,3,5-тиадиазинан-4-тион (87,02 %). Данные составы обеспечивают наиболее надежную защиту металла в условиях воздействия агрессивной среды и микробиологической коррозии.

2. Среднеэффективные ингибиторы (степень защиты 70–80 %): КОРБС-имидазол-ин-неонол (74,4 %).

3. Низкоэффективные и неэффективные составы: 1,3-бис(диметиламинометил)-тиомочевина (55,74 %) показала низкую защитную способность, а смесь 1,3,5-тиадиазинан-4-тиона с КОРБС-имидазол-ин-неонолом (26,5 %) и композиция N'N'-бис[(тетрагидро-4Н-1,4-оксазин-4-ил)-метил]тиомочевина (отрицательные значения) не только не замедляют, но в ряде случаев стимулируют коррозионный процесс.

Таким образом, гравиметрический метод успешно применен для дифференциации ингибиторов по эффективности. Наибольшую защитную способность в исследуемых условиях продемонстрировал ингибитор ПСМ (88,91 %), который может быть рекомендован для проведения промышленных испытаний и последующего внедрения с целью защиты внутренней поверхности резервуарного парка и другого нефтегазового оборудования. Применение таких высокоэффективных ингибиторов позволяет не только продлить межремонтный срок службы оборудования, но и существенно снизить вероятность аварийной разгерметизации, которая является одной из основных причин пожаров на объектах хранения и транспорта углеводородов. Результаты работы подчеркивают необходимость предварительного тестирования средств защиты на образцах-свидетелях гравиметрическим методом, что позволяет минимизировать риски аварийных ситуаций, включая взрывопожароопасные инциденты, продлить межремонтный срок службы оборудования и снизить экономические потери от коррозии.

Список литературы

1. Николаенко В. Г., Гончарова Е. А. Определение скорости коррозии гравиметрическим методом // Коррозия материалов и защита от коррозии. 2015. № 2. С. 21–25.

2. Андреев Н. Н., Кузнецов Ю. И. Ингибиторы коррозии металлов: учебное пособие. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2017. 220 с.

3. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии. 4-е изд. М.: Физматлит, 2010. 416 с.

4. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия: учебник. М.: Высшая школа, 1984. 519 с.

5. Кузнецов Ю. И. Прогресс в области создания ингибиторов коррозии металлов // Коррозия: материалы, защита. 2018. № 1. С. 1–11.

6. Абдуллин И. Г., Цыганкова Л. Е. Биокоррозия нефтепромыслового оборудования и методы защиты // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 20. С. 267–271.
7. Баранов Д. А., Шарифуллин И. С. Анализ причин аварий резервуаров от коррозии // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. № 3 (117). С. 121–129.
8. Фахретдинов И. Х., Милинич А. В. Применение ингибиторов коррозии для защиты оборудования нефтегазового комплекса // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14, № 4. С. 78–83.
9. Кац Н. Г., Парфенов К. В., Ибатуллин И. Д. Анализ продуктов коррозии протекторного сплава // Нефтяное хозяйство. 2025. № 4. С. 104–106. DOI: 10.24887/0028-2448-2025-4-104-106.
10. Тимофеева С. В., Иванов А. В. Опасности, возникающие при эксплуатации резервуаров // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12. С. 87–91.
11. Новицкий Д. В. Анализ процесса коррозионного разрушения резервуаров-отстойников подготовки высоковязкой нефти к транспорту по магистральным нефтепроводам // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2019. № 2. С. 52–58. DOI: 10.31660/0445-0108-2019-2-52-58.
12. Бледнова Ж. М., Вотинов А. В. Оценка параметров безопасности резервуаров для хранения нефтепродуктов при наличии дефектов // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2006. № 3. С. 31–38.
13. Аммосов А. П., Аммосов Г. С., Аминов Т. Ш. Коррозионная повреждаемость сварных соединений резервуаров // Сварочное производство. 2008. № 7. С. 24–28.
4. Antropov L. I. Teoreticheskaya elektrokimiya: uchebnik [Theoretical electrochemistry: a textbook]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1984, 519 p.
5. Kuznetsov Yu. I. Progress v oblasti sozdaniya ingibitorov korrozii metallov [Progress in the creation of metal corrosion inhibitors]. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2018, issue 1, pp. 1–11.
6. Abdullin I. G., Tsygankova L. E. Biokorroziya neftepromysloвого oborudovaniya i metody zashchity [Biocorrosion of oilfield equipment and protection methods]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, issue 20, pp. 267–271.
7. Baranov D. A., Sharifullin I. S. Analiz prichin avariyy rezervuarov ot korrozii [Analysis of the causes of tank accidents from corrosion]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov*, 2019, vol. 3 (117), pp. 121–129.
8. Fakhretdinov I. H., Milinich A. V. Primeneniye ingibitorov korrozii dlya zashchity oborudovaniya neftegazovogo kompleksa [Application of corrosion inhibitors to protect equipment of the oil and gas complex]. *Neftegazovoye delo*, 2016, vol. 14, issue 4, pp. 78–83.
9. Katz N. G., Parfenov K. V., Ibatullin I. D. Analiz produktov korrozii protekornogo splava [Analysis of corrosion products of a protective alloy]. *Neftyanoye khozyaystvo*, 2025, issue 4, pp. 104–106. DOI: 10.24887/0028-2448-2025-4-104-106.
10. Timofeeva S. V., Ivanov A. V. Opasnosti, vznikayushchiye pri ekspluatatsii rezervuarov [Hazards arising during tank operation]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*, 2015, issue 12, pp. 87–91.
11. Novitsky D. V. Analiz protsessa korroziionnogo razrusheniya rezervuarov-otstoynikov podgotovki vyazkoy nefiti k transportu po magistral'nym nefteprovodam [Analysis of the process of corrosion destruction of settling tanks for the preparation of high-viscosity oil for transport via main oil pipelines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*, 2019, issue 2, pp. 52–58. DOI: 10.31660/0445-0108-2019-2-52-58.
12. Blednova Zh. M., Votinov A. V. Otsenka parametrov bezopasnosti rezervuarov dlya khraneniya nefteproduktov pri nalichii defektov [Assessment of safety parameters of tanks for storing petroleum products in the presence of defects]. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva*, 2006, issue 3, pp. 31–38.
13. Ammosov A. P., Ammosov G. S., Aminov T. Sh. Korroziionnaya povrezhdayemost' svarnykh soyedineniy rezervuarov [Corrosion damage of welded joints of tanks]. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2008, issue 7, pp. 24–28.

References

Хафизов Ильдар Фанилевич

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

доктор технических наук, профессор

e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Khafizov Ildar Fanilevich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education

«Ufa State Petroleum Technical University»,

Russian Federation, Ufa

doctor of technical sciences, professor

e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Султанов Рифкат Мухатьярович

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

доктор химических наук, профессор

e-mail: sultanov55@mail.ru

Sultanov Rifkat Mukhatyarovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education

«Ufa State Petroleum Technical University»,

Russian Federation, Ufa

doctor of chemical sciences, professor

e-mail: sultanov55@mail.ru

Бикмеев Вадим Ильфирович

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

аспирант

e-mail: vadudusbikmееv@gmail.com

Bikmееv Vadim Ilfirovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education

«Ufa State Petroleum Technical University»,

Russian Federation, Ufa

postgraduate student

e-mail: vadudusbikmееv@gmail.com

Бакиров Дамир Робертович

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

аспирант

e-mail: damir.bakirov.99@mail.ru

Bakirov Damir Robertovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education

«Ufa State Petroleum Technical University»,

Russian Federation, Ufa

postgraduate student

e-mail: damir.bakirov.99@mail.ru

Озден Инна Владимировна

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

кандидат технических наук, доцент

e-mail: inessa_21bk.ru

Ozden Inna Vladimirovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education

«Ufa State Petroleum Technical University»,

Russian Federation, Ufa

candidate of technical sciences, associate professor

e-mail: inessa_21bk.ru

УДК 614.841.41

DOI 10.48612/ntp/5pzt-g54p-kdhn

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ И СМЕСОВЫХ ВОЛОКОН ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ПРИ ГОРЕНИИ

О. Г. ЦИРКИНА¹, В. Г. СПИРИДОНОВА¹, С. А. СЫРБУ¹, А. Х. САЛИХОВА¹, А. Н. КЛУШИН^{1,2}

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

² Главное управление МЧС России по Краснодарскому краю,
Российская Федерация, г. Краснодар

E-mail: ogtsirkina@mail.ru, nika.spiridonowa@yandex.ru,
syrbue@yandex.ru, salina_77@mail.ru, gpn-obninsk@mail.ru

В статье приведены результаты научного анализа отечественных и зарубежных исследований в области пожарной опасности текстильных материалов. Отмечено, что и в России, и за рубежом при изучении данного вопроса используются методы, определяющие значение кислородного индекса. В работе рассматриваются особенности состава и структуры текстильных материалов, а также факторы, которые влияют на их термическую стабильность и устойчивость к воздействию пламени. Особое внимание уделяется взаимосвязи между скоростью тепловыделения различных волокнистых материалов и их способностью к воспламенению. В статье приводятся данные, характеризующие пожароопасные свойства полиэфирных и хлопко-полиэфирных тканей, предназначенных для обивки мягкой мебели, с вложением синтетической составляющей 70 % и более.

Ключевые слова: синтетические волокна, синтетические ткани, текстильные материалы, пожарная опасность, кислородный индекс, воспламеняемость, горение, воздействие высоких температур.

BEHAVIORAL CHARACTERISTICS OF SYNTHETIC AND BLENDED FIBERS UNDER HIGH TEMPERATURES AND DURING COMBUSTION

O. G. TSIRKINA¹, V. G. SPIRIDONOVA¹, S. A. SYRBU¹, A. Kh. SALIKHOVA¹, A. N. KLUSHIN^{1,2}

¹ Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education

«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

² The Main Directorate of the Russian Ministry of Emergency Situations in the Krasnodar Territory,
Russian Federation, Krasnodar

E-mail: ogtsirkina@mail.ru, nika.spiridonowa@yandex.ru,
syrbue@yandex.ru, salina_77@mail.ru, gpn-obninsk@mail.ru

This article presents the results of a scientific analysis of domestic and international research on the fire hazard of textile materials. The paper emphasizes that scientists in Russia and abroad are using methods that determine the oxygen index to study this problem. The study examines the composition and structure of textile materials, as well as factors that influence their thermal stability and flame resistance. Particular attention is paid to the relationship between the heat release rate of various fibrous materials and their flammability. The article describes experimental data characterizing the fire hazard properties of polyester and cotton-polyester fabrics intended for upholstery, with a synthetic content of 70% or more.

Keywords: synthetic fibers, synthetic fabrics, textile materials, fire hazard, oxygen index, flammability, combustion, exposure to high temperatures.

Исследования в области пожарной опасности текстильных материалов (далее – ТМ) активно проводятся как отечественными, так и зарубежными авторами.

Работы зарубежных авторов по оценке пожароопасных свойств текстильных материалов в большей степени связаны с необходимостью выбора компонентов огнезащитных сос-

тавов для обработки тканей и волокон. Испытания ТМ без огнезащитной обработки проводятся с целью получения контрольных данных исходного образца и отслеживания динамики снижения пожарной опасности тканей с различной огнезащитой.

Ученые Фенимор и Мартин доказали существование предела по концентрации кислорода в окружающей среде, обеспечивающего устойчивое горение. Они отметили, что для горения необходима минимальная концентрация кислорода, характеризующаяся показателем «кислородный индекс» (далее – КИ). Проведенный нами анализ литературных данных показал, что значительная доля исследований, проводимых отечественными и зарубежными учеными, связана с определением КИ как одной из характеристик пожароопасных свойств материала. Ранее отмечалось, что полимеры с КИ < 27 % считаются легкогорючими. При КИ < 20 % горение протекает быстро, при КИ = 20-26 % – медленно. Полимеры с КИ > 27 % при выносе их из пламени самозатухают и считаются трудногорючими.

Отличительной особенностью большинства синтетических волокон и тканей из них является способность переходить в высокоэластическое состояние с последующим плавлением, то есть материалы обладают термопластичностью. К таким материалам относятся наиболее часто используемые в различных областях полиамиды (ПА), полиэферы (ПЭ) и полиакрилонитрилы (ПАН). Для полиамидных тканей без основы значения КИ могут достигать

24 об. %, однако этот показатель снижается примерно до 21 об. %, когда текстиль имеет подложку в виде сетки из стекловолокна, которая предотвращает стекание расплавленного материала. Этот так называемый «эффект каркаса» наблюдается также в смесовых тканях на основе полиэстера и хлопка, где полимер плавится на нетермопластичном волокне, при этом обугливаясь и воспламеняясь, что делает смесь гораздо более огнеопасной, чем составляющие волокна по отдельности. Подобные эффекты наблюдаются в композитных тканях, содержащих термопластичные и нетермопластичные компоненты [1].

Группа ученых из Малайзии (Онг И Вэнь, Мохд Захирасри Мохд Тохир, Томас Чунг Шин Йиу и др.) в обзоре огнестойких и негорючих отделок для поверхностей из полимеров и текстиля отмечают, что указанные материалы часто рассматриваются как легковоспламеняемые. Горючесть определяется на основании предельного кислородного индекса (Limiting oxygen index LOI, %) и общего тепловыделения (Total heat release TRH, МДж/м²). Для синтетических текстильных полимеров значение предельного кислородного индекса близко к 21,0 %: полиамид – 21,5 %, полиэстер – 18,5 %. При этом выделяемая энергия на квадратный метр горящего материала у полиамида составляет 94,3 МДж/м² [2].

Результаты испытаний, проведенных исследователями Kanury A. M. и Venning M. A., сведены в табл. 1 [3, 4].

Таблица 1. Значения кислородного индекса для тканых материалов

Материал	Поверхностная плотность, г/м ²	Кислородный индекс (LOI), %
Волокно на основе акрилонитрила («Акрилан»)	220	18,2
Триацетилцеллюлоза («Арнель»)	220	18,4
Ацетилцеллюлоза*	220	18,6
Полипропилен*	220	18,6
Поливинил («Винилон»)	220	19,7
Вискоза	220	19,7
Хлопок суровый	220	20,1
Хлопок подготовленный	153	18,0
Нейлон*	220	20,1
Полиэстер	220	20,6
Шерсть (подвергнутая химической чистке)	240	25,2
Акриловое волокно («Дайнел»)	220	26,7
Арамидное волокно («Номекс N-4274»)	190	28,2
Поливинилхлорид («Ровил 55»)	220	37,1

* – ткани прошиты хлопчатобумажной нитью

Воздействие тепла на ТМ приводит к возникновению сложных и часто взаимосвязанных физических и химических процессов. Для ряда текстильных волокон физико-химические процессы происходят в температурных диапазонах, которые показаны в табл. 2 [5]. Знание указанных тепловых характеристик необходимо для полной количественной оценки пожарной опасности текстильных материалов и понимания особенностей процесса горения текстиля.

Из анализа приведенных в таблице данных видно, что все волокна с величиной предельного КИ выше 21 % можно отнести к труднотлеющим (ТТ). Таким образом, метод определения КИ позволяет определить численное значение, которое описывает способность любой ткани поддерживать пламенное горение [4]. Авторами работы [6] также было показано, что с увеличением поверхностной плотности полиэфирной и нейлоновых тканей возрастает и значение КИ (табл. 3).

Таблица 2. Результаты термических исследований для тканей из термопластичных волокон

Ткань	T _g , °C (размягчение)	T _m , °C (плавление)	T _p , °C (пиролиз)	T _c , °C (горение)	LOI, %
Триацетат	172	290	305	540	18,4
Нейлон 6	50	215	431	450	20-21,5
Нейлон 6.6	50	265	403	530	20-21,5
Полиэстер	80-90	255	420-447	480	20-21
Акрил	100	> 220	290	> 250	18,2
Полипропилен	-20	165	469	550	18,6
Модакрил	< 80	> 240	273	690	29-30
ПВХ (поливинилхлорид)	< 80	> 180	> 180	450	37-39
ПВДХ (поливинилдихлорид)	-17	180-210	> 220	532	60
ПТФЭ (фторволокно)	126	≥ 327	400	560	95
Оксидированный акрил	-	-	≥ 640	-	55
Номекс	275	375	410	> 500	28,5-30
Кевлар	340	560	> 590	> 550	29
ПБИ (полибензимидазольное волокно)	> 400	-	≥ 500	> 500	40-42

Таблица 3. Влияние поверхностной плотности тканей из синтетических волокон на величину КИ

Вид ткани	Поверхностная плотность, г/м ²	КИ, %
Полиэфирная	102	18,7
	204	19,9
	305	20,9
Нейлон	220	20,1
	311	21,2
	501	23,5

В своих научных работах исследователи Jeler S., Krešević B. и Golob V. изучили значения КИ для большого числа тканей, изготовленных из акрила, полиэстера, полиамида, смеси полиэстера и хлопка (50 : 50) и смеси полиэстера и шерсти (55 : 45) различной поверхностной плотности и переплетения (полотняного и саржевого). Их результаты, представленные в табл. 4, показали, что для исследованных

тканей величина КИ возрастает с увеличением поверхностной плотности, объемной плотности и уменьшением пористости. Однако, единых тенденций для разных типов волокон и тканевых структур выявлено не было из-за большого влияния рода волокон на величину КИ. Для установления четких зависимостей требуется накопление большего количества эмпирических данных [7].

Таблица 4. Влияние физико-химических параметров текстильных материалов на величину кислородного индекса

Волокно	Переплетение	Поверхностная плотность, г/м ²	Объемная плотность, г/см ³	Пористость, %	Кислородный индекс, %	
					основа	уток
Акрил	полотняное	180	0,18	84,6	19,9	19,8
	полотняное	230	0,18	84,6	20,0	20,0
	саржевое	230	0,19	83,8	20,4	20,4
	полотняное	280	0,26	77,7	20,4	20,3
	саржевое	280	0,26	77,7	20,8	20,8
	саржевое	330	0,27	76,9	20,8	20,9
Полиэстер + хлопок	полотняное	60	0,22	84,8	16,9	16,9
	саржевое	60	0,18	87,6	17,0	17,2
	полотняное	75	0,26	82,1	17,2	17,2
	саржевое	75	0,21	85,5	17,2	17,4
	полотняное	110	0,33	77,2	17,2	17,2
	саржевое	110	0,31	78,6	17,4	17,1
	полотняное	115	0,36	75,2	19,5	19,4
	саржевое	115	0,32	77,9	19,4	19,4
Полиэстер + шерсть	полотняное	100	0,13	90,4	22,0	21,6
	полотняное	200	0,27	80,0	21,9	22,1
	полотняное	270	0,40	70,4	23,0	23,0
	саржевое	250	0,25	81,5	24,0	22,5
	саржевое	300	0,35	74,1	23,7	23,4
	саржевое	350	0,43	68,1	23,5	22,5
Полиэстер	полотняное	50	0,10	92,6	22,6	22,6
	саржевое	50	0,10	92,8	23,5	23,5
	полотняное	100	0,20	85,5	24,1	24,2
	саржевое	100	0,20	85,5	24,0	23,8
	полотняное	150	0,21	84,9	23,5	23,4
	саржевое	150	0,23	83,3	24,2	23,4
Полиамид	полотняное	22	0,22	80,7	30,9	31,0
	саржевое	22	0,20	82,5	27,0	27,0
	полотняное	60	0,60	47,4	30,0	30,2
	саржевое	60	0,46	59,6	29,1	29,1
	полотняное	80	0,67	41,2	30,3	30,5
	саржевое	80	0,53	53,5	29,1	29,1
	саржевое	110	0,42	63,2	30,0	30,0

На значение КИ оказывает влияние и температура окружающей среды. В работе [8] исследовано поведение текстильных материалов и их смесей при повышенных температурах (табл. 5). Авторы отмечают, что ткани, в которых натуральные или регенерированные

целлюлозные волокна являются основными компонентами, демонстрируют почти линейную зависимость между снижением кислородного индекса и повышением температуры. Для синтетических волокон подобной зависимости не прослеживается [9].

Таблица 5. Влияние температуры на значение кислородного индекса для натуральных, синтетических и смесовых тканей

Ткань	Состав ткани	Кислородный индекс, %			
		20 °С	100 °С	150 °С	200 °С
Вискоза	100	17,8	15,5	14,0	12,7
Триацетатцеллюлоза	100	18,6	15,0	12,8	11,0
Полиэстер / хлопок	53 : 47	15,6	14,7	13,2	12,0
Полиакриловое волокно / хлопок / полинозное волокно	51 : 25 : 24	18,7	16,3	14,5	13,1

Ткань	Состав ткани	Кислородный индекс, %			
		20 °С	100 °С	150 °С	200 °С
Вискоза / нейлон 6	60 : 40	18,0	16,7	15,0	13,5
Полиэстер / вискоза / шелк	48 : 43 : 9	17,0	15,8	14,0	11,9
Триацетатное волокно / нейлон 6	67 : 33	17,1	16,3	15,4	14,3
Полиэстеровая шерсть	55 : 45	20,1	19,8	18,1	17,6
Шерсть / нейлон 6	92 : 8	21,4	20,1	18,8	17,0
Шерсть / нейлон 6	84 : 16	22,5	20,3	18,5	17,0
Полиэстер	100	31,2	31,4	29,0	28,6
Нейлон 6	100	27,4	27,0	23,8	23,3
Нейлон 6.6 / нейлон 6	58 : 42	30,3	27,0	26,4	26,3
Полиакриловое волокно	100	17,1	16,8	14,4	13,4

Авторы работы [10] обращают внимание на то, что воспламенение в нижней части образца максимизирует конвективный предварительный нагрев несгоревшего материала, тем самым уменьшая концентрацию кислорода, необходимую для поддержания горения, и влияя на значение КИ. В работе [6] также отмечался эффект конвективного нагрева. Показано, что значения КИ, измеренные для полиэстера, смеси полиэстера с хлопком и с шерстью, полученные при горизонтальной ориентации образца, меньше тех, которые зарегистрированы при стандартном проведении испытания (табл. 6) [9].

Авторы работы [11] для ряда тканей ввели понятие «параметр затухания кислорода» (EOI). EOI определяется как доля кислорода в смеси кислород/азот, дающая нулевое время непрерывного горения образца. Способность образца к самозатуханию обозначена

параметром $[EOI]_0$, представляющим собой долю кислорода, при которой время горения образца равно нулю после воздействия на ткань источника зажигания в течение нулевого времени. В табл. 7 показаны сопоставленные значения $[EOI]_0$ в процентном выражении для огнезащищенных тканей и для тканей без обработки антипиреном с различной поверхностной плотностью, протестированных при 20 °С. Из анализа данных следует, что значения $[EOI]_0$ зависят от типа волокна и наличия огнезащитной обработки.

Скорость распространения пламени по поверхности образца текстильного материала зависит как от состава ткани и поверхностной плотности, так и от угла наклона. В табл. 8 представлены средние скорости распространения пламени для тканей под разными углами наклона [12].

Таблица 6. Влияние ориентации образца и/или точки воспламенения тканей на величину кислородного индекса для тканей из синтетических и смесовых волокон

Ткань	Ориентация образца	Условия зажигания	Кислородный индекс, %
Полиэстер	вертикальная	сверху вниз	20,0
	горизонтальная	горизонтально	18,0
Полиэстер / хлопок (50 : 50)	вертикальная	сверху вниз	17,6
	горизонтальная	горизонтально	17,2
Полиакриловое волокно	вертикальная	сверху вниз	18,2
	горизонтальная	горизонтально	18,2
Модакриловое волокно	вертикальная	сверху вниз	31,0
	вертикальная	снизу вверх	22,0–23,0

Таблица 7. Значения $[EOI]_0$ для различных тканей при температуре 20 °С

Ткань	Поверхностная плотность, г/м ²	Значения $[EOI]_0$, %				
		Количество слоев				
		1	2	3	4	5
Полиэстер	307,5	23,5	24,0	24,4	25,2	26,2
	687,5	26,6	28,4	30,2	31,8	33,0
Нейлон 6.6	172,5	22,0	23,0	23,7	24,1	24,7
	235	23,1	23,9	24,3	24,6	25,4

Примечание: нейлон 6.6 и полиэстер 307,5 г/м² – трикотажные изделия; полиэстер 687,5 г/м² имел двойное плетение.

Таблица 8. Скорость распространения пламени для тканей под разными углами наклона

Ткань	Скорость распространения пламени, мм/с					
	Угол наклона					
	90 °	60 °	45 °	30 °	15 °	0 °
Полиэстер / хлопок (55 : 45)	39	30	27	22	19	8
Полиэстер / хлопок (65 : 35)	37	27	24	21	13	9
Полиэстер*	-	-	-	-	-	-
Акриловое волокно	23	15	13	11	8	6

* Ткань не воспламенилась

Таким образом, наблюдается прямо пропорциональная зависимость скорости распространения пламени от величины угла наклона образца.

В ходе выполнения научно-исследовательских работ, посвященных исследованию пожарной опасности волокон и тканей, и проведения анализа научной литературы нами получены данные, характеризующие поведение синтетических волокон при горении (табл. 9).

Из анализа полученных данных следует, что синтетические волокна, являясь термопластичными, горят с плавлением, образуют капли расплава, которые могут являться

вторичным источником зажигания, после остывания образуют твердый спёк.

В силу специфики получения синтетических волокон путем синтеза из мономеров, выделяемых из нефти и газа, а также последующего формования (в основном из расплава волокнообразующего полимера) продавливанием через отверстия фильера, на заключительном этапе волокна подвергаются замасливаю специальным препаратами. Замасливатели представляют собой горючие жидкости, что дополнительно повышает пожарную опасность синтетических волокон и материалов из них.

Таблица 9. Поведение материалов из синтетических волокон при горении

Волокно		Поведения волокон			Запах	Остаток после горения
		Вблизи пламени	В пламени	После удаления из пламени		
Искусственные гидратцеллюлозные	Вискоза	Волокна не плавятся и не изменяют своей формы	Горят без плавления, горение интенсивное жёлтым пламенем с наличием светящейся искры	Продолжают гореть без плавления. После затухания волокна тлеют, распространяя интенсивный белый дымок	Запах жжёной бумаги	Легко рассыпающийся серый пепел
	Медно-аммиачное					
Искусственные ацетилцеллюлозные	Ацетатное	Частичное оплавление и небольшая усадка	Горят ярко жёлтым пламенем. Вне пламени гаснут.	Медленное горение с плавлением. Если пламя погасить, то волокно медленно тлеет с выделением струйки дыма	Слабый запах уксусной кислоты	Спекшийся темно бурый шарик, обладающий определенной твердостью и способный разминаться при надавливании
	Триацетатное					

Волокно		Поведения волокон			Запах	Остаток после горения
		Вблизи пламени	В пламени	После удаления из пламени		
Синтетические	Полиамидное	Происходит плавление и тепловая усадка в направлении от пламени	Загорается слабым голубовато-желтым пламенем с наличием белого дымка	Горит очень медленно и само затухает	Легкий запах сургуча	Темно-желтый твердый стеклообразный спёк
	Полиэфирное		Горит слабо желтоватым пламенем, выделяя черную копоть			
	Полиакрилонитрильное		Горят ярким желтым коптящим пламенем с вспышками	Продолжают гореть	Темный наплыв неправильной формы, раздавливаемый пальцами	

Помимо этого, необходимо отметить, что в продуктах термического разложения синтетики присутствуют канцерогенные вещества. Из литературных источников [13, 14] известно, что продуктами горения синтетических волокон, помимо кокса, оксидов углерода (в том числе угарного газа) и паров воды, являются следующие газообразные вещества:

- для полиэфира (температура воспламенения 420–450 °С) – формальдегид, бензол и другие ароматические соединения;
- для полиамида (температура воспламенения 460–500 °С) – цианистый водород, аммиак;
- для полиакрилонитрила (температура воспламенения 300–350 °С) – синильная кислота, оксиды азота;
- для поливинилхлоридных волокон (~ 500 °С) – диоксины и фураны.

Также при медленном тлении синтетических материалов, которые являются чистыми углеводородами (полиэтилен, полипропилен и полистирол), образуется плотный чёрный дым, содержащий канцерогенные полиароматические (ПАУ) и ароматические углеводороды и раздражающие вещества, например, акролеин.

Ткани из полиэфира и хлопка находят широкое применение благодаря отличной износостойкости и долговечности. Однако, из-за того, что они легко воспламеняются, могут являться источником пожара и способствовать его распространению, возникает необходимость в исследованиях в области огнезащитной отделки. К настоящему времени известно, что огнезащитная отделка смесовых материалов (например, хлопкополиэфирных тканей) нам-

ного сложнее, чем огнезащитная отделка любого из компонентов [1].

В качестве основных причин можно выделить как различия в природе самих волокон, так и разницу в поведении при горении:

1. На этапе придания ткани огнезащитных свойств необходимо учитывать различное поведение целлюлозной и синтетической составляющей в водных растворах: целлюлоза гидрофильна и хорошо впитывает раствор антипирена; полиэфир гидрофобен, не смачивается, не набухает, не поглощает растворенный антипирен.

2. При нагревании ткани из смеси полиэфира и хлопка полиэфирная составляющая при определенной температуре начинает плавиться. Расплавленный компонент покрывает поверхность целлюлозной составляющей. Кокс, образующийся при пиролизе, дает каркас, предотвращающий усадку ткани, за счет чего увеличивается площадь возможного горения. Таким образом, расплав полиэфира превращается в дополнительное «топливо» в зоне пожара.

3. В процессе горения антипирен перемещается между двумя компонентами – полиэфиром и хлопком, которые при повышенной температуре и горении ведут себя по-разному.

4. Взаимная термическая индукция полиэфирных и хлопковых полимеров или продуктов их пиролиза ускоряет образование продуктов горения. Следовательно, скорость воспламенения смесовых тканей намного выше, чем у чистых полиэфирных или целлюлозных.

5. Поскольку хлопок в процессе горения не плавится и не усаживается, при сжигании

изделий из смеси волокон хлопковое волокно карбонизируется и затрудняет образование капель расплава синтетической составляющей, что может рассматриваться как положительный эффект, предотвращающий образование вторичного источника загорания.

Наличие в помещениях горючей нагрузки из текстильных материалов, используемых для декора интерьера, способствует распространению пожара и проявлению опасных факторов пожара. Для понимания картины развития пожара в помещениях необходимо знать пожароопасные характеристики текстильных материалов, такие, как воспламеняемость, КИ, температура самовоспламенения [15, 16].

Вывод

Аналитический обзор научных публикаций отечественных и зарубежных авторов показал, что исследованиям процессов горения

синтетических материалов уделяется значительное внимание. Выявленные закономерности позволяют спрогнозировать поведение текстильных материалов при огневом воздействии, а также разработать методы снижения их пожарной опасности. С научной точки зрения важно отметить, что между основными параметрами, характеризующими пожарную опасность текстильных материалов, такими как значения кислородного индекса, результаты испытаний на воспламеняемость и числовые данные термического анализа, существует высокая степень корреляции в пределах групп тканей с одинаковой природой и химическим составом. Результаты проведенных экспериментов по определению показателей пожарной опасности синтетических волокон и тканей, изучения закономерностей поведения при воздействии пламени обобщены и систематизированы в формате электронной базы данных [17].

Список литературы

1. Mei Wang Chemical [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.mflam.com/info/what-is-polyester-cotton-flame-retardant-fabric-61751594.html> (дата обращения 24.04.2026).
2. Price D., Horrocks A. R. Combustion processes of textile fibres. Editor(s): F. Selcen Kilinc. Woodhead Publishing Series in Textiles, Handbook of Fire Resistant Textiles. Woodhead Publishing, 2013, pp. 3–25.
3. Kanury A. M. Fire Safety of Combustible Materials. Proceedings of the International Symposium. Edinburgh: University of Edinburgh, 1975. p. 187.
4. Benning M. A. Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygenenriched Atmospheres. ASTM publication STP 812 / edited by B. L. Werley. American Society for Testing and Materials, 1983. p. 68.
5. Arcand C. G., Vullo W. J. The bottom ignition oxygen index test. Text Res J., 1972, vol. 42, pp. 328–330.
6. Miller B, Meiser CH. Steady state burning of textiles in flowing O₂N₂ mixtures. Text Chem Color, 1970, vol. 2, pp. 35–38.
7. Jeler S., Kresevic B., Golob V. Effect of apparent fabric density and pore volume on LOI (limiting oxygen index). Textilveredlung, 1985, 20, pp. 158–160.
8. Jeler S., Ceric B. Influence of Temperature of Analysis on LOI Values (Limiting Oxygen Index). Textilveredlung, 1980, vol. 15 (7), pp. 251–253.
9. Horrocks A. R., Tune M., Cegiela L. The Burning Behavior of Textiles and its Assessment by Oxygen-index Methods. Textile Progress,

2009, vol. 18, issue 1-3, pp. 1–186.

10. Fenimore C. P., Martin F. J. Proceedings of the Fourth Materials Research Symposium. MBS Special Publication No. 357. USA: National Bureau of Standards, 1970.

11. Horrocks A. R., Ugras M. The persistence of burning of textiles in different oxygen environments and the determination of the extinction oxygen index. Fire Mater, 1983, vol. 7, issue 3, pp. 111–118.

12. Nazaré S., Horrocks A. R. Flammability testing of fabrics / Editor(s): Jinlian Hu. Woodhead Publishing Series in Textiles, Fabric Testing. Woodhead Publishing, 2008. Pp. 339–388.

13. Зубкова Н. С., Антонов Ю. С. Снижение горючести текстильных материалов – решение экологических и социально-экономических проблем // Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2002. Том XLVI. № 1. С. 96–102.

14. Carroll W.F. Is PVC in house fires the great unknown source of dioxin? Fire and Mater, 1996, vol. 20, issue 4, pp. 161–166.

15. Сторонкина О. Е., Мочалова Т. А. Оценка воспламеняемости современных текстильных материалов декоративного назначения // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 3 (44). С. 67–71.

16. Термическая стабильность и огнестойкость волокнистых материалов: научный анализ отечественного и зарубежного опыта исследований / А. Н. Клушин, О. Г. Циркина, В. Г. Спиридонова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты 2025. № 2 (55). С. 48–57.

17. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025624963 РФ.

База данных по пожарной опасности текстильных материалов в целях судебной пожарно-технической экспертизы / О. Г. Циркина, С. А. Сырбу, В. Г. Спиридонова [и др.]. № 2025624754; заявл. 30.10.2025; опубл. 07.11.2025, Бюл. № 11. 1 с.

References

1. Mei Wang Chemical [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.mflam.com/info/what-is-polyester-cotton-flame-retardant-fabric-61751594.html> (дата обращения 24.04.2026)

2. Price D., Horrocks A. R. Combustion processes of textile fibres. Editor(s): F. Selcen Kilinc. Woodhead Publishing Series in Textiles, Handbook of Fire Resistant Textiles. Woodhead Publishing, 2013, pp. 3–25.

3. Kanury A. M. Fire Safety of Combustible Materials. Proceedings of the International Symposium. Edinburgh: University of Edinburgh, 1975. p. 187

4. Benning M. A. Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygenenriched Atmospheres. ASTM publication STP 812 / edited by B. L. Werley. American Society for Testing and Materials, 1983. p. 68.

5. Arcand C. G., Vullo W. J. The bottom ignition oxygen index test. Text Res J., 1972, vol. 42, pp. 328-330.

6. Miller B, Meiser CH. Steady state burning of textiles in flowing O₂N₂ mixtures. Text Chem Color, 1970, vol. 2, pp. 35–38.

7. Jeler S., Kresevic B., Golob V. Effect of apparent fabric density and pore volume on LOI (limiting oxygen index). Textilveredlung, 1985, 20, pp. 158–160.

8. Jeler S., Ceric B. Influence of Temperature of Analysis on LOI Values (Limiting Oxygen Index). Textilveredlung, 1980, vol. 15 (7), pp. 251–253.

9. Horrocks A. R., Tune M., Cegiela L. The Burning Behavior of Textiles and its Assessment by Oxygen-index Methods. Textile Progress, 2009, vol. 18, issue 1-3, pp. 1–186.

10. Fenimore C. P., Martin F. J. Proceedings of the Fourth Materials Research Symposium.

MBS Special Publication No. 357. USA: National Bureau of Standards, 1970.

11. Horrocks A. R., Ugras M. The persistence of burning of textiles in different oxygen environments and the determination of the extinction oxygen index. Fire Mater, 1983, vol. 7, issue 3, pp. 111–118.

12. Nazaré S., Horrocks A. R. Flammability testing of fabrics / Editor(s): Jinlian Hu. Woodhead Publishing Series in Textiles, Fabric Testing. Woodhead Publishing, 2008. Pp. 339–388.

13. Zubkova N. S., Antonov Yu. S. Snizhenie goryu-chesti tekstil'nyh materialov – reshenie eko-logicheskikh i social'no-ekonomicheskikh problem [Reducing the flammability of textile materials – a solution to environmental and socioeconomic problems]. *Rossijskij himicheskiy zhurnal (Zh. Ros. him. ob-va im. D. I. Mendeleeva)*, 2002, vol. XLVI, issue 1, pp. 96–102.

14. Carroll W.F. Is PVC in house fires the great unknown source of dioxin? Fire and Mater, 1996, vol. 20, issue 4, pp. 161–166.

15. Storonkina O. E., Mochalova T. A. Ocenka vosplamyaemosti sovremennyh tekstil'nyh materialov dekorativnogo naznacheniya [Assessment of the flammability of modern decorative textile materials]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2022, vol. 3 (44), pp. 67-71.

16. Termicheskaya stabil'nost' i ognestojkost' voloknistyh materialov: nauchnyj analiz otechestvennogo i zarubezhnogo opyta issledovanij [Thermal stability and fire resistance of fibrous materials: scientific analysis of domestic and foreign research experience] / A. N. Klushin, O. G. Tsirkina, V. G. Spiridonova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2025, vol. 2 (55), pp. 48-57.

17. O. G. Tsirkina, S. A. Syrбу, V. G. Spiridonova [et al.]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh 2025624963 Rossiyskaya Federatsiya. Baza dannyh po pozharnej opasnosti tekstil'nyh materialov v celyah sudebnoj pozharo-tekhnicheskoy ekspertizy [Database on the fire hazard of textile materials for the purposes of forensic fire-technical examination], № 2025624754, byulleten № 11, 1 p.

Циркина Ольга Германовна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
доктор технических наук, профессор, доцент
E-mail: ogtsirkina@mail.ru

Tsirkina Ol'ga Germanovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
doctor of technical sciences, professor, associate professor
E-mail: ogtsirkina@mail.ru

Спиридонова Вероника Гербертовна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
кандидат технических наук, старший преподаватель
E-mail: nika.spiridonowa@yandex.ru

Spiridonova Veronika Gerbertovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
candidate of technical sciences, senior lecturer
E-mail: nika.spiridonowa@yandex.ru

Сырбу Светлана Александровна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
доктор химических наук, профессор
E-mail: syrbue@yandex.ru

Syrbu Svetlana Alexandrovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
doctor of chemistry sciences, professor
E-mail: syrbue@yandex.ru

Салихова Аниса Хамидовна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
кандидат технических наук, доцент
E-mail: salina_77@mail.ru

Salikhova Anisa Khamidovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
candidate of technical sciences, associate professor
E-mail: salina_77@mail.ru

Клушин Алексей Николаевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
соискатель ученой степени
Главное управление МЧС России по Краснодарскому краю,
Российская Федерация, г. Краснодар
начальник
E-mail: gpn-obninsk@mail.ru

Klushin Alexey Nikolaevich

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

Russian Federation, Ivanovo

applicant for an academic degree

The Main Directorate of the Russian Ministry of Emergency Situations in the Krasnodar Territory,

Russian Federation, Krasnodar

head of the Main Directorate

E-mail: gpn-obninsk@mail.ru

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS (TECHNICAL)**

УДК 691.16

DOI 10.48612/ntp/pk3u-8xxz-ntft

**ВЛИЯНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ ДОБАВОК НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
БИТУМНЫХ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

М. В. АКУЛОВА^{1,2}, А. А. САФОНОВ²

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

² ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: m_akulova@mail.ru a.safonov95@mail.ru

Цель исследования – оценка влияния волокнистых добавок (стеклофибры и базальтофибры) на реологические свойства битума марки БН-90/10. Актуальность работы обусловлена тем, что использование некачественной битумной гидроизоляции вследствие высокой горючести битума повышает пожарные риски при эксплуатации строительных конструкций. Экспериментальные исследования выполнены с применением стандартизованных методик, включающих определение температуры размягчения методом «кольцо и шар» и оценку растяжимости (дуктильности) на дуктилометре. Проведено армирование битума стекло- и базальтовой фиброй, проанализировано их влияние на реологические характеристики гидроизоляционного материала. Установлено, что модификация битума волокнистыми наполнителями способствует формированию более термоустойчивой и деформативно-прочной структуры. Выявлено, что характер улучшения свойств зависит от типа и концентрации армирующего компонента: базальтовая фибра в большей степени повышает теплостойкость, тогда как стеклофибра при оптимальном содержании обеспечивает наибольший прирост эластичности. Полученные результаты подтверждают перспективность применения волокнистых добавок для создания долговечных, термостойких и герметичных гидроизоляционных покрытий. Использование таких материалов снижает риск ухудшения пожарной обстановки при возгорании, что способствует повышению общего уровня пожарной безопасности объектов гражданской защиты.

Ключевые слова: пожарная опасность, волокнистые добавки, битум, гидроизоляция, реологические свойства.

**INFLUENCE OF FIBER ADDITIVES ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES
OF BITUMEN WATERPROOFING MATERIALS**

M. V. AKULOVA^{1,2} A. A. SAFONOV²

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

² Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo State Polytechnic University»,
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: m_akulova@mail.ru a.safonov95@mail.ru

The aim of the study is to assess the influence of fiber additives (glass fiber and basalt fiber) on the rheological properties of BN-90/10 grade bitumen. The relevance of the work is due to the fact that the use of low-quality bitumen waterproofing, owing to the high combustibility of bitumen, increases fire risks during the operation of building structures. Experimental studies were carried out using standardized methods, including determination of the softening point by the ring-and-ball method and evaluation of ductility using a ductilometer.

Bitumen was reinforced with glass and basalt fibers, and their effect on the rheological characteristics of the waterproofing material was analyzed. It was found that modification of bitumen with fibrous fillers contributes to the formation of a more thermally stable and deformation-resistant structure. The nature of property improvement depends on the type and concentration of the reinforcing component: basalt fiber increases heat resistance to a greater extent, while glass fiber at optimal content provides the greatest increase in elasticity. The obtained results confirm the potential of using fiber additives to create durable, heat-resistant, and hermetic waterproofing coatings. The use of such materials reduces the risk of deterioration of the fire situation in case of ignition, which contributes to improving the overall level of fire safety of civil protection facilities.

Keywords: fire hazard, fibrous additives, bitumen, waterproofing, rheological properties.

Введение

Битум остаётся одним из наиболее востребованных материалов для гидроизоляции благодаря своим уникальным свойствам. Он широко применяется в строительстве при устройстве гидроизоляционных покрытий, прокладке дорог, а также в нефтегазовом секторе. Однако битум обладает рядом недостатков: он подвержен растрескиванию, разрушению под действием ультрафиолетового излучения, имеет недостаточную эластичность и, что особенно важно с точки зрения гражданской защиты, относится к горючим материалам. Низкое качество битумной гидроизоляции вследствие горючести битума повышает пожарные риски при эксплуатации строительных конструкций.

Перспективным направлением снижения этих рисков является модификация битума негорючими волокнистыми добавками, которые армируют его структуру и улучшают физико-механические и реологические характеристики [1–5].

В связи с этим целью исследования стала оценка влияния волокнистых добавок (стеклофибры и базальтофибры) на реологические свойства битума марки БН-90/10. Для достижения цели определяли температуру размягчения методом «кольцо и шар» и растяжимость (дуктильность) на дуктилометре для чистого и армированного битума.

Материалы и методы исследования

В работе исследовали битум марки БН 90/10, а также образцы битума, модифицированные стеклянной («Темиора») и базальтовой («Полипласт») фиброй. Волокна вводили в битум, предварительно переведенный в жидкую фазу. Физико-механические испытания проводили в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, распространяющихся на нефтяные строительные битумы.

Определение температуры размягчения. Температуру размягчения битума определяли методом «кольцо и шар» по ГОСТ 11506-73¹. Суть метода заключается в фиксации температуры, при которой битум, помещенный в латунное кольцо заданных размеров, в процессе нагрева размягчается настолько, что под весом стального шарика (диаметром 9,525 мм и массой 3,50 г) выдавливается из кольца и касается контрольной пластины.

Подготовка к испытанию включала следующие этапы. Пробу битума при наличии влаги обезвоживали путем осторожного нагрева до температуры на 80–100 °С выше ожидаемой точки размягчения (но не ниже 120 °С и не выше 180 °С), после чего фильтровали и тщательно перемешивали. Подготовленный битум заливали с небольшим избытком в два чистых кольца, установленных на пластину, покрытую смесью талька с глицерином для предотвращения прилипания. После охлаждения (режим зависит от типа битума) излишки материала срезали нагретым ножом вровень с краями колец.

Собранный штатив с кольцами помещали в стеклянный сосуд (баню), заполненный жидкостью. Выбор жидкости зависел от ожидаемой температуры размягчения: при значениях ниже 80 °С использовали воду с начальной температурой 5 °С; в диапазоне 80–110 °С – смесь воды с глицерином (1:2) с начальной температурой 34 °С; выше 110 °С – чистый глицерин, нагретый до 34 °С. После 15-минутной выдержки на каждый образец помещали шарик и начинали нагрев бани со скоростью 5 °С в минуту при постоянном перемешивании жидкости. За результат испытания принимали среднее арифметическое значение температур, при которых шарик продавил битум в каждом из двух колец.

Определение растяжимости (дуктильности). Растяжимость (дуктильность) битума определяли по ГОСТ 11505-75². Показатель характеризует максимальную длину (в см), на

¹ ГОСТ 11506-73. Битумы нефтяные. Метод определения температуры размягчения по кольцу и шару. М.: Стандартинформ, 2008.

² ГОСТ 11505-75. Битумы нефтяные. Метод определения растяжимости. М.: Стандартинформ, 2008.

которую может растянуться без разрыва стандартный образец битума в форме «восьмерки» при заданной температуре и скорости раздвижения формы.

Предварительно обезвоженный и процеженный битум заливали тонкой струей в три латунные формы, установленные на полированную пластину, обработанную глицерин-тальковой смесью. Заливку вели с небольшим избытком. Формы выдерживали на воздухе при комнатной температуре в течение 30–40 минут, после чего излишки застывшего битума среза-ли нагретым острым ножом вровень с краями.

Далее формы с битумом помещали в водяную баню с температурой испытания (25 °С или 0 °С) на 1 час. По истечении этого времени формы закрепляли в дуктилометре. Ванну прибора заполняли водой с требуемой температурой и включали механизм раздвижения салазок со скоростью 5 см/мин. В момент разрыва

битумной нити фиксировали ее длину по шкале прибора.

Для каждого состава проводили три параллельных определения. За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение. Результат округляли до 0,1 см, если растяжимость составляла менее 10 см, и до целого числа, если она равнялась 10 см или превышала это значение.

Результаты исследования

На первом этапе работы были проведены контрольные испытания чистого битума марки БН 90/10 (без добавок). Полученные результаты представлены в табл. 1.

На следующем этапе исследовали образцы битума, модифицированные стеклянной и базальтовой фиброй. Добавки вводили в количествах 5, 1 и 0,5 г на 100 г битума. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты испытания чистого битума

Количество битума, г	Добавка	Количество добавки, г	Температура размягчения по методу «Кольцо и шар», °С	Растяжимость (дуктильность), см
100	-	-	92	1,6

Таблица 2. Результаты испытаний битума, модифицированного волокнистыми добавками

Количество битума, г	Добавка	Количество добавки, г	Температура размягчения по методу «Кольцо и шар», °С	Растяжимость (дуктильность), см
100	Базальто-фибра	5,0	110	4,1
100	Стеклофибра	5,0	105	3,4
100	Базальто-фибра	1,0	107	4,2
100	Стеклофибра	1,0	108	3,5
100	Базальто-фибра	0,5	104	4,4
100	Стеклофибра	0,5	105	4,8

Анализ полученных данных показал, что введение волокнистых наполнителей приводит к улучшению реологических свойств битума. На рис. 1 представлено сравнение температуры размягчения чистого и модифицированного битума.

Установлено, что температура размягчения модифицированного битума возрастает более чем на 12 °С относительно контрольного. Наибольшее значение температуры размягчения (110 °С) зафиксировано для образца с

максимальным содержанием базальтовой фибры (5 г).

Положительная динамика также наблюдалась при оценке дуктильности (рис. 2).

Максимальное значение растяжимости (4,8 см), более чем в три раза превышающее показатель чистого битума (1,6 см), достигнуто при введении 0,5 г стеклянной фибры.

Анализ полученных данных позволяет выявить механизмы, определяющие различный характер влияния волокнистых добавок на реологические свойства битума.

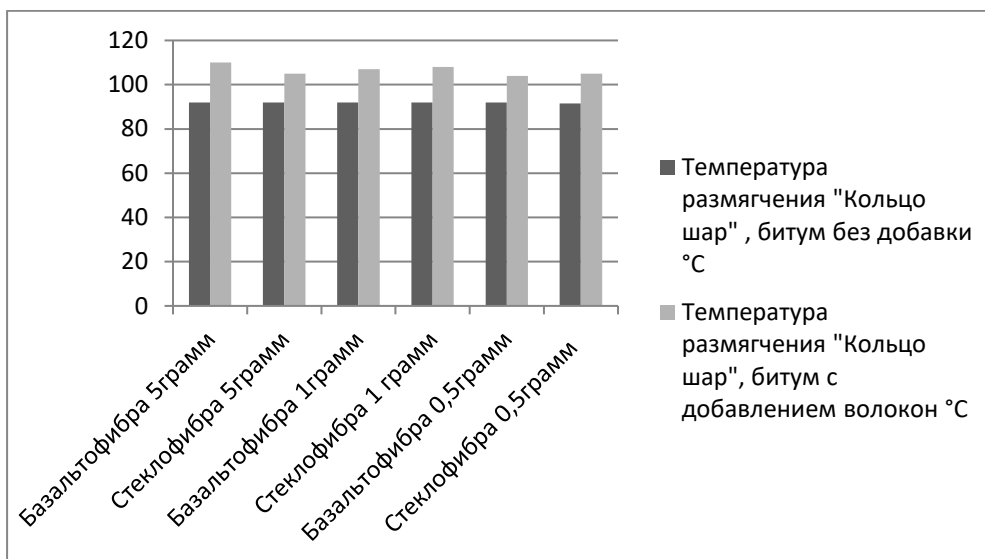


Рис. 1. Температура размягчения чистого битума и битума с добавлением волокон различного типа и концентрации

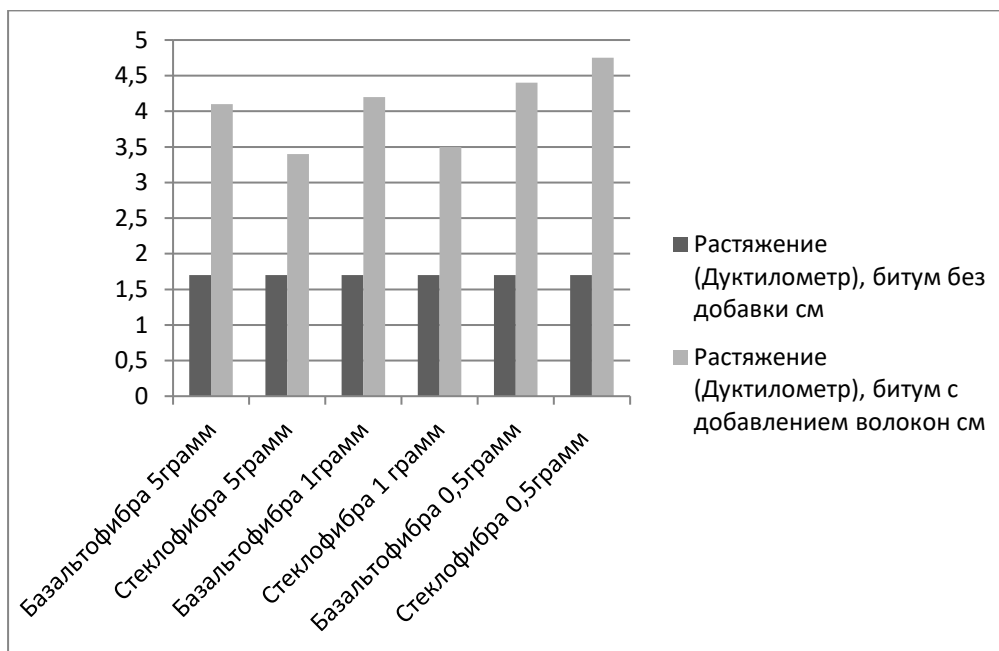


Рис. 2. Растяжимость чистого битума и битума с добавлением волокон различного типа и концентрации.

Установлено, что максимальная растяжимость достигается при минимальной концентрации стеклянной фибры (0,5 г). Это объясняется равномерным распределением волокон в битумной матрице без образования агломератов, что обеспечивает армирование на микроуровне без ограничения высокоэластической подвижности материала. Увеличение концентрации стекловолокна приводит к сближению

волокон, формированию локальных агломератов и снижению деформативности.

В отличие от стекловолокна, базальтовая фибра проявляет прямую корреляцию между концентрацией и теплостойкостью. Максимальный прирост температуры размягчения (на 18 °C) зафиксирован при максимальной дозировке (5 г). Это обусловлено высокой адгезией базальтовых волокон к битуму и формированием объемного жесткого каркаса, который

ограничивает подвижность битумной фазы, особенно при повышенных температурах.

Различия в поведении волокон связаны с их геометрическими характеристиками и адгезионными свойствами: стеклофибра при малых концентрациях обеспечивает равномерное армирование без потери эластичности, тогда как базальтовая фибра, обладая более развитой поверхностью и высокой адгезией, эффективно повышает теплостойкость при высоких дозировках.

На основании анализа экспериментальных данных (табл. 1, 2) можно сформулировать следующие основные выводы:

Повышение теплостойкости. Введение как стеклянных, так и базальтовых волокон способствует увеличению температуры размягчения битума. Наибольший абсолютный прирост (на 18 °С относительно чистого битума) зафиксирован для композиции, содержащей 5 г базальтовой фибры на 100 г битума. Это свидетельствует о формировании более жесткой и термоустойчивой структуры материала.

Улучшение деформативных характеристик. Модификация битума волокнами положительно влияет на его растяжимость. Наилучший показатель дуктильности (4,8 см) достигнут при введении минимального количества стеклянной фибры (0,5 г). Полученный результат указывает на то, что даже малое количество равномерно распределенных волокон способно армировать материал на микроуровне, повышая его устойчивость к растяжению и замедляя рост трещин.

Зависимость эффекта от типа и концентрации наполнителя. Характер улучшения свойств определяется видом волокна и его содержанием. Базальтовая фибра проявляет себя как более эффективный модификатор для повышения температуры размягчения, особенно при высоких дозировках. Стеклянная

фибра в малой концентрации (0,5 г) обеспечивает наилучший прирост эластичности. Это позволяет варьировать состав композиции в зависимости от требуемых эксплуатационных свойств: для объектов с высокими температурными нагрузками предпочтительно использование базальтовой фибры, а для конструкций, подверженных деформациям, – оптимизированных составов со стеклянной фиброй.

Заключение

Целью исследования являлась оценка влияния волокнистых добавок (стеклофибры и базальтофибры) на реологические свойства битума марки БН-90/10. Для её достижения решены следующие задачи: проведено армирование битума двумя типами волокон в различных концентрациях, определены температура размягчения (методом «кольцо и шар») и растяжимость (дуктильность) чистого и модифицированного битума, а также проанализирован характер влияния добавок в зависимости от их типа и содержания.

В результате экспериментально подтверждено, что модификация битума волокнистыми наполнителями способствует формированию более термоустойчивой и деформативно-прочной структуры. Установлено, что базальтовая фибра в максимальной дозировке (5 г на 100 г битума) обеспечивает наибольший прирост температуры размягчения (на 18 °С), а стеклянная фибра при минимальной концентрации (0,5 г на 100 г битума) даёт максимальное увеличение растяжимости (более чем в 3 раза). Выявлено, что характер улучшения свойств зависит от типа и концентрации армирующего компонента, что позволяет варьировать состав композиции под конкретные эксплуатационные условия.

Список литературы

1. Сафонов А. А., Попов А. В., Акулова М. В. Проблемы устройства гидроизоляции строительных объектов // Актуальные экологические проблемы современных городов: сборник материалов II Национальной научно-практической конференции с международным участием. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2025. С. 138–140.

2. Армирование битума базальтовым волокном / А. А. Сафонов, М. В. Акулова, А. В. Попов [и др.] // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование: сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Иваново:

Ивановский государственный политехнический университет, 2025. С. 301–304.

3. Свойства базальтового волокна и применение его в строительстве / А. А. Сафонов, М. В. Акулова, А. В. Попов [и др.] // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2025. № 1. С. 309–311.

4. Сафонов А. А., Попов А. В., Акулова М. В. Процесс модификации битума полимерными вяжущими веществами // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование: сборник материалов Международной научно-практической конференции. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2024. С. 174–175.

5. Сафонов А. А., Попов А. В., Акулова М. В. Улучшение свойств битума с помощью полимерных вяжущих веществ // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2024. № 1. С. 547–549.

References

1. Safonov A. A., Popov A. V., Akulova M. V. Problemy ustrojstva gidroizolyacii stroitel'nyh ob'ektov [Problems of waterproofing construction projects]. *Aktual'nye ekologicheskie problemy sovremennyh gorodov: sbornik materialov II Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Ivanovo: Ivanovskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet, 2025. Pp. 138–140.

2. Armirovanie bituma bazal'tovym voloknom [Reinforcement of bitumen with basalt fiber] / A. A. Safonov, M. V. Akulova, A. V. Popov [et al.]. *Kachestvo zhizni: arhitektura, stroitel'stvo, transport, obrazovanie: sbornik materialov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy*

konferencii. Ivanovo: Ivanovskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet, 2025. Pp. 301–304.

3. Svoystva bazal'tovogo volokna i primeneniye ego v stroitel'stve [Properties of basalt fiber and its application in construction] / A. A. Safonov, M. V. Akulova, A. V. Popov [et al.]. *Molodye uchenye – razvitiyu Nacional'noj tekhnologicheskoy iniciativy (POISK)*, 2025, issue 1, pp. 309–311.

4. Safonov A. A., Popov A. V., Akulova M. V. Process modifikacii bituma polimernymi vyazhushchimi veshchestvami [The process of modifying bitumen with polymer binders]. *Kachestvo zhizni: arhitektura, stroitel'stvo, transport, obrazovanie: sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Ivanovo: Ivanovskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet, 2024. Pp. 174–175.

5. Safonov A. A., Popov A. V., Akulova M. V. Uluchsheniye svoystv bituma s pomoshch'yu polimernyh vyazhushchih veshchestv [Improving the properties of bitumen using polymer binders]. *Molodye uchenye – razvitiyu Nacional'noj tekhnologicheskoy iniciativy (POISK)*, 2024, issue 1, pp. 547–549.

Акулова Марина Владимировна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново
доктор технических наук, профессор
E-mail: m_akulova@mail.ru

Akulova Marina Vladimirovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo State Polytechnic University»,
Russian Federation, Ivanovo

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

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: m_akulova@mail.ru

Сафонов Александр Андреевич

ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

Аспирант

E-mail: a.safonov95@mail.ru

Safonov Aleksandr Andreevich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo State Polytechnic University»,
Russian Federation, Ivanovo

Graduate student

E-mail: a.safonov95@mail.ru

**УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS (TECHNICAL)**

УДК 614.842, 621.398
DOI 10.48612/ntp/npda-hghf-rhmp

**РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ И ПРОГРАММЫ
ДЛЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ВИДЕОЗАПИСЕЙ ПОЖАРОВ,
ПРОИЗОШЕДШИХ НА СТОЯНКАХ АВТОМОБИЛЕЙ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ**

А. А. АПАРИН, Д. В. СМИРНОВ

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
E-mail: aparin.ivanovo-37@yandex.ru

В Российской Федерации ежегодно происходят пожары на стоянках автомобилей, расположенных в городской среде. В официальных статистических сборниках, пожары на стоянках автомобилей отдельно не рассматриваются, только в составе обобщенной группы объектов пожаров по классу функциональной пожарной опасности «Ф5.2»; согласно статистике, для этой группы за период с 2020 по 2024 гг. зафиксировано 32288 пожаров. При этом область информационной поддержки принятия решений при оперативном реагировании на пожары, произошедшие на стоянках автомобилей, расположенных в городской среде, является малоизученной. Для исследования данной области применены методы реляционного моделирования, программирования, математического моделирования и многокритериального анализа. В данной статье представлены результаты разработки информационного и программного обеспечения для системы управления оперативным реагированием на пожар в городской среде (с целью совершенствования подходов к использованию потока видеoinформации с места пожара, поступающего от систем видеомониторинга, установленных в городской среде). Предложена реляционная модель данных, а также программа для ЭВМ, реализованная в виде браузерного приложения. Полученные результаты применимы при планировании мероприятий по совершенствованию информационно-аналитического обеспечения оперативных дежурных смен, использующих в своей деятельности поток видеoinформации от камер видеонаблюдения, установленных в городской среде. Цель настоящей статьи – совершенствование инструментов информационной поддержки ЛПР для раннего выявления необходимости привлечения на место пожара дополнительных сил и средств подразделений пожарной охраны (до фактического прибытия к месту пожара первых должностных лиц). В дальнейшем, на основе результатов настоящего исследования планируется разработать алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений.

Ключевые слова: информационные технологии, пожары на автомобильных парковках, видеомониторинг, информационное и программное обеспечение, система управления оперативным реагированием на пожар в городской среде.

**DEVELOPMENT OF A DATABASE STRUCTURE AND A PROGRAM
FOR THE RETROSPECTIVE ANALYSIS OF VIDEO RECORDINGS OF FIRES
THAT OCCURRED IN PARKING LOTS IN AN URBAN ENVIRONMENT**

A. A. APARIN, D. V. SMIRNOV

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
E-mail: aparin.ivanovo-37@yandex.ru

In the Russian Federation, fires occur annually in parking lots located in an urban environment. In official statistical collections, fires in parking lots are not considered separately, only as part of a generalized group of fire objects according to the functional fire hazard class «F5.2»; according to statistics, 32288 fires were recorded for this group from 2020 to 2024. At the same time, the field of information support for decision-making in rapid response to fires that occurred in parking lots located in an urban environment is poorly understood. The methods of relational modeling, programming, mathematical modeling and multi-criteria analysis are used to study this area. This article presents the results of the development of information and software for an operational fire response management system in an urban environment (in order to improve approaches to using the video information stream from the fire site coming from video monitoring systems installed in an urban environment). A relational data model is proposed, as well as a computer program implemented as a browser application. The results obtained are applicable in planning measures to improve information and analytical support for operational shifts on duty, using in their activities a stream of video information from video surveillance cameras installed in an urban environment. The purpose of this article is to improve the tools for information support of the fire department for early detection of the need to attract additional forces and means of fire protection units to the fire site (before the actual arrival of the first officials to the fire site). It is also planned to develop an algorithm for intellectual decision support based on the results of this study.

Key words: information technology, fires in parking lots, video monitoring, information and software, management system for rapid response to a fire in an urban environment.

Введение

Авторами настоящей статьи проведено исследование официальных статистических данных¹, а также открытых источников информации по вопросу возникновения пожаров на стоянках автомобилей в городской среде. При проведении анализа официальной статистической информации было выявлено следующее.

1. «Стоянки для автомобилей без технического обслуживания и ремонта» в статистическом сборнике¹ не выделены в отдельную категорию – входят в обобщенную группу объектов пожаров по классу функциональной пожарной опасности (ФПО) «Ф5.2» (поэтому в дальнейшем будут также приведены результаты анализа других открытых источников данных). Согласно статистике, для группы

«Ф5.2» за период с 2020 по 2024 гг. зафиксировано 32288 пожаров.

2. Результат анализа распределения значений показателей обстановки с пожарами, произошедшими в 2017–2024 гг. (для группы объектов пожаров по классу ФПО Ф5.2), показал, что за рассматриваемый период количество пожаров и количество погибших людей уменьшилось. Однако в 2017–2021 гг. наблюдалось увеличение количества пожаров (рис. 1), а также в 2017–2018 и 2020 гг. зафиксировано увеличение количества погибших людей (рис. 2)¹.

Несмотря на отмечаемую динамику, приводящую к уменьшению значений показателей, рассмотренных на рис. 1–2, тема остается актуальной для исследования.

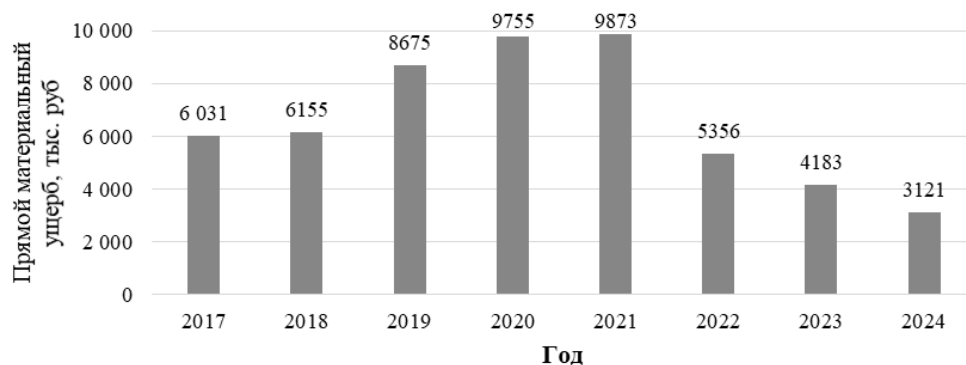


Рис. 1. Распределение значения «прямой материальный ущерб» от пожаров на объектах класса ФПО Ф5.2

¹ Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствий: информационно-аналитический сборник. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. 112 с.

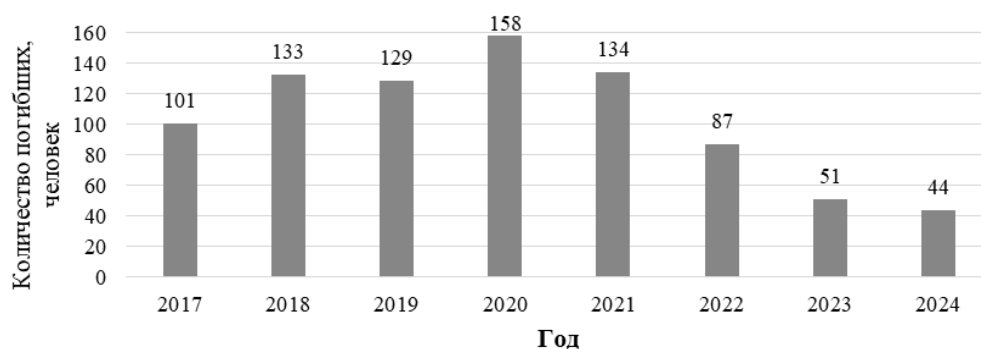


Рис. 2. Распределение значения «количество погибших» от пожаров на объектах класса ФПО Ф5.2

Актуальность рассматриваемой темы аргументирована тем, что в крупнейших городах Российской Федерации наблюдается увеличение количества частного автомобильного транспорта. Например, в Москве зафиксировано ежегодное увеличение частных автомобилей, зарегистрированных на территории данного города (рис. 3 – столбцы «слева», по данным единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС). При этом наблюдается уменьшение количества легковых автомобилей на дорогах города – соответственно, увеличение количества легковых автомобилей во дворах жилых домов и на стоянках автомобилей (рис. 3 – по данным ГКУ города Москвы – Центра организации дорожного движения Правительства Москвы (ЦОДД), столбцы «справа»).

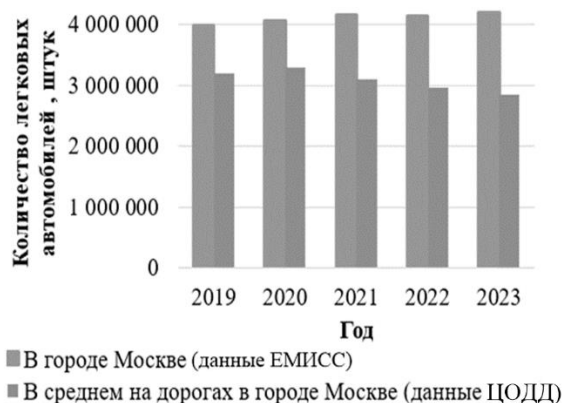


Рис. 3. Динамика изменения количества зарегистрированных автомобилей² и среднего количества автомобилей на дорогах в Москве за 2019–2023 гг.³

Рассматриваемые пожары на стоянках автомобилей в городской среде возникают по различным причинам [1–5] и могут иметь совершенно индивидуальные последствия [6–9]. В современных городах стоянки автомобилей, как объект городской среды активно развиваются – появляются различные виды архитектурного и объемно-планировочного исполнения. В соответствии с положениями свода правил СП 113.13330.2023 «Стоянки автомобилей»⁴, установлены и классифицированы типы стоянок в городской среде.

Основываясь на ряде исследований, проведенных отечественными учеными [1–15], необходимо отметить, что каждый из типов стоянок автомобилей может иметь ряд уникальных особенностей. К таким особенностям могут быть отнесены, в том числе, причины пожаров, способы их распространения и специфика организации оперативного реагирования подразделений пожарной охраны.

Стоянки автомобилей чаще всего имеют достаточно большой пространственный объем. Даже если стоянка относится к закрытому типу, то согласно мнению ряда исследователей, подобные объемно-планировочные решения могут быть в определенных случаях охарактеризованы как «условно открытые пространства». Исследования [16–17] посвящены особенностям обнаружения признаков вознившего пожара на открытых пространствах. Данные авторы делают акцент на ситуации, когда существует необходимость обнаружения пожара на ранней стадии развития в условиях открытого пространства. Ввиду того, что обнаружение развивающегося пожара а) на открытых и б) на условно открытых пространствах при помощи ряда датчиков, которые успешно

² <https://fedstat.ru/?ysclid=m1ad23ar6577411201>

³ <https://gucodd.ru>

⁴ Приказ Минстроя России от 05.10.2023 N 718/пр (ред. от 27.12.2024) «Об утверждении СП

113.13330.2023 «СП 21-02-99* Стоянки автомобилей».

применяются для закрытых помещений, будет в первом случае фактически неэффективным, а во втором – малоэффективным, поэтому для таких пространств активно развиваются способы обнаружения и контроля, основанные на технологии видеонаблюдения [18–20].

Для видеомониторинга пожаров на стоянках автомобилей могут применяться системы: а) оснащенные модулями видеоаналитики и б) без модулей видеоаналитики, данные с которых обрабатываются непосредственно оператором видеомониторинга (в контексте управления в организационных системах – лицом, принимающим решения (ЛПР)). ЛПР в данном случае – это специалист оперативной дежурной смены ЦУКС ГУ МЧС России по субъекту Российской Федерации, либо диспетчер местного пожарно-спасательного гарнизона (на уровне Центрального пункта пожарной связи местного пожарно-спасательного гарнизона).

Ввиду этого стоит отметить необходимость разработки программного и информационного обеспечения для накопления и анализа необходимых данных. По результатам проведения патентного поиска было выделено несколько уже существующих баз данных, которые близки по тематической направленности к материалу настоящей статьи [21–22]. Однако все эти решения не в полной мере соответствуют специфическим особенностям исследуемого авторами настоящей статьи направления. Одной из ключевых отличительных особенностей является возможность накопления и пост-анализа видеоинформации с места ликвидации пожара.

Проблема

Область информационной поддержки принятия решений при оперативном реагировании на пожары, произошедшие на стоянках автомобилей, расположенных в городской среде, является малоизученной. Также в рамках этой проблемы недостаточно изучена область, которая касается применения потока видеоинформации с места пожара, поступающего в режиме реального времени от систем видеомониторинга, установленных в городской среде.

Цель статьи

Совершенствование инструментов информационной поддержки ЛПР для раннего выявления необходимости привлечения на место пожара дополнительных сил и средств подразделений пожарной охраны (до фактического прибытия к месту пожара первых должностных лиц местного пожарно-спасательного гарнизона). Для достижения цели требуется предложить информационное и программное обеспечение системы управления оперативным

реагированием на пожар в городской среде, являющейся организационной (совершенствование подходов к использованию потока видеоинформации с места пожара, поступающего в режиме реального времени, от систем видеомониторинга, установленных в городской среде).

Методы исследования: реляционное моделирование, программирование, математическое моделирование и многокритериальный анализ.

Решение проблемы

Рассмотрим решение данной проблемы «от обратного»: чтобы информационно обеспечить оперативные потребности рассматриваемой организационной системы, необходимо разработать инструменты для проведения превентивной работы на этапе планирования (гипотеза, которая выдвинута в настоящей статье и будет проверена в последующих публикациях). Таким образом, чтобы более эффективно применять поток видеоинформации с места пожара, поступающий в режиме реального времени, необходимо подготовить ресурсы, которые будут позволять осуществлять информационную поддержку ЛПР при оперативном анализе. Используем подход, опирающийся на пост-анализ данных видеомониторинга (ретроспективный анализ). Вопросы обнаружения и контроля пожаров на открытых территориях подробно рассмотрены авторами [23–29], однако в меньшей мере была затронута тема пост-анализа результатов видеомониторинга. При этом, решение данной проблемы создает условия для:

- разработки предложений методического характера для специалистов оперативных дежурных смен, которые работают с источниками видеоинформации (камерами видеонаблюдения, установленными в городской среде);
- получения массива статистических данных для выявления ранее неизвестных закономерностей и трендов;
- разработки предложений по созданию аналитических инструментов (для автоматизированного и автоматического анализа потока видеоинформации);
- накопления и систематизации данных для возможности применения инструментов машинного обучения (как следствие – создание модулей видеоаналитики);
- разработки математических методов извлечения семантической информации из потока видеоинформации, поступающего с места пожара в режиме реального времени;
- разработки множества событий-индикаторов для оперативного анализа потока видеоинформации, поступающего с места пожара в режиме реального времени.

Проанализировав статистические данные, подтвердив актуальность рассматриваемого вопроса и рассмотрев возможный эффект от развития области информационного и программного обеспечения системы управления оперативным реагированием на пожар в городской среде – предложена структура базы данных и разработана программа для электронно-вычислительных машин (ЭВМ), которая позволяет анализировать информационные ресурсы такой базы данных.

Описание реляционной модели данных и функций базы данных

Функциональное назначение:

а) накопление видеозаписей пожаров, произошедших на стоянках автомобилей в городской среде (из открытых источников, без нарушения авторских прав);

б) накопление числовой и символьной (текстовой) информации, описывающей соответствующие видеозаписи;

в) ретроспективный анализ видеозаписей пожаров, произошедших на стоянках автомобилей в городской среде и анализ соответствующих им описаний;

г) анализ с использованием инструментов описательной статистики.

Область применения после заполнения данными:

а) простейшее изучение сотрудниками оперативных дежурных смен особенностей пожаров на стоянках автомобилей – анализ способствующих развитию пожара факторов, последствий пожара и параметров оперативного реагирования подразделений пожарной охраны (этап «до возникновения пожара – превентивные мероприятия и планирование»);

б) обучение моделей искусственного интеллекта для автоматизации процесса анализа потока видеoinформации, поступающего в режиме реального времени с места пожара с целью информационной поддержки принятия решений (или информирования), например, для раннего выявления необходимости привлечения на место пожара дополнительных сил и средств подразделений пожарной охраны (этап «после возникновения пожара – оперативные мероприятия»). При условии накопления большого количества данных.

Краткое описание областей применения информационного и программного обеспечения (предложенного в настоящей статье) в рамках рассматриваемой организационной системы представлено в таблице.

Таблица. Краткое описание областей применения информационного и программного обеспечения в рамках рассматриваемой организационной системы

Предполагаемая область применения информационного и программного обеспечения	Применимость информационного и программного обеспечения при реализации функции управления				ЛПР	Роль в организационной системе информационного и программного обеспечения
	Планирование	Организация	Стимулирование	Контроль		
Простейшее изучение сотрудниками оперативных дежурных смен особенностей пожаров на стоянках автомобилей	+	+	-	-	Диспетчер (Центр управления в кризисных ситуациях); диспетчерский состав центрального пункта пожарной связи местных пожарно-спасательных гарнизонов	При реализации функции управления «планирование» появляется возможность ознакомиться с особенностями уже ликвидированных пожаров (в том числе сопоставить видеоданные с текстовым анализом). Таким образом повышается готовность ЛПР к реализации функции управления «организация» (организация оперативного реагирования на пожар) на предмет извлечения большого количества семантической информации [30]. Согласно «избирательности» – свойству, определяющему качество информации, «массивы данных большого объема, нивелируются благодаря опыту, квалификации, а также другим личным

Предполагаемая область применения информационного и программного обеспечения	Применимость информационного и программного обеспечения при реализации функции управления				ЛПР	Роль в организационной системе информационного и программного обеспечения
	Планирование	Организация	Стимулирование	Контроль		
						и профессиональным качествам ЛПР» [30]. В данном случае, при изучении большого количества разнородной информации, поступающей в режиме реального времени из различных источников, в том числе от камер видеонаблюдения, в поле зрения которых попадает пожар на стоянке автомобилей – необходимо извлечь как можно больше семантической информации для снижения дефицита информации на раннем этапе организации оперативного реагирования на пожар (до прибытия первых должностных лиц к месту пожара). Стремление к извлечению в такой ситуации большого количества семантической информации обосновано тем, что на раннем этапе организации реагирования может быть принято решение о привлечении на место пожара дополнительных сил и средств подразделений пожарной охраны (до прибытия первых должностных лиц к месту пожара). При этом, согласно трудам [31–33] будет достигаться повышение ценности информации, имеющейся в системе управления.
Обучение моделей искусственного интеллекта для автоматизации процесса анализа потока видеоинформации – программная реализация модулей видеоаналитики	+	+	-	-	Диспетчер (Центр управления в кризисных ситуациях); диспетчерский состав центрального пункта пожарной связи местных пожарно-спасательных гарнизонов	При реализации функции управления «планирование» применение модулей видеоаналитики позволит проводить экспресс-анализ видеозаписей ликвидированных пожаров на предмет идентификации факторов, которые свидетельствуют об осложнении обстановки на месте пожара. Это необходимо для повышения готовности ЛПР к реализации функции управления «организация». При непосредственной организации оперативного реагирования на пожар – модули видеоаналитики будут нацелены на информирование ЛПР о том, что в видеопотоке информации обнаружены факторы, наличие которых требует рассмотрения возможности принятия решения о привлечении

Предполагаемая область применения информационного и программного обеспечения	Применимость информационного и программного обеспечения при реализации функции управления				ЛПР	Роль в организационной системе информационного и программного обеспечения
	Планирование	Организация	Стимулирование	Контроль		
						на место пожара дополнительных сил и средств подразделений пожарной охраны (на раннем этапе, до прибытия первых должностных лиц к месту пожара). Окончательное решение необходимо принимать только самому ЛПР.

Источник информации для кортежей базы данных: открытые официальные информационные ресурсы федеральных органов исполнительной власти, органов местного самоуправления, федеральных, региональных и муниципальных официальных СМИ. Обязательными условиями пригодности данных для возможности использования являются: соблюдение авторских прав правообладателей информации; верифицированный статус официального источника информации; наличие видео-, текстовой и числовой информации по конкретному случаю и т.п. Для комплексного аналитического рассмотрения объекта мониторинга – процесса возникновения, развития и прекра-

щения пожара, произошедшего на стоянке автомобилей в городской среде, использован метод многокритериального анализа. Разработана схема базы данных, кортеж данных в которой состоит из 22 атрибутов (рис. 4). Изначально заполняется таблица 1 (главная таблица, для нее все связи имеют тип «один ко многим», но не наоборот), далее – таблицы 2-5, в зависимости от количества выявленных в свободном доступе данных. Всего, атрибутам соответствуют несколько типов данных: текстовые данные (тип – строка), числовые данные (тип – целые числа); видеофайлы (вложенный объект или объект, доступный на удаленном сервере при наличии Интернет-соединения).



Рис. 4. Схема базы данных (таблицы, атрибуты данных и связи между таблицами)

Структура и функциональное назначение базы данных не предназначены для выполнения задачи по установлению корреляционных связей и определению (прогнозированию, моделированию) конкретных значений переменных внутри одного индивидуального кортежа, на основе всей накопленной информации. Также структура и функциональное назначение базы данных не имеет отношения к нормативным документам, а имеет исключительно научно-исследовательский характер, прежде всего для разработки теоретических основ для будущей практической разработки модулей видеоаналитики, с целью информационной (интеллектуальной) поддержки (или информирования) ЛПР.

Анализ данных, на текущем этапе разработки, носит простой характер – проводится по ряду отдельных атрибутов данных и основан на базовых понятиях описательной статистики.

Далее представлено описание конкретных функций базы данных при ее использовании после заполнения информационных ресурсов.

Функция 1. Предоставление информации пользователю. Пользователь, составляя запрос для поиска требуемых кортежей информационных ресурсов базы данных, может использовать один или комбинацию нескольких критериев поиска. Авторами настоящей статьи предложен набор критериев для формирования выборки информации:

- время суток (утро; день; вечер; ночь);
- город (название города или муниципального образования);
- материальный ущерб (интервальный поиск, млн рублей);
- пострадавшие (интервальный поиск, человек);
- площадь пожара (интервальный поиск, м²);
- силы МЧС России (интервальный поиск; имеется ввиду количество человек, прибывших на место ликвидации пожара);
- техника МЧС России (интервальный поиск, имеется ввиду количество единиц основной пожарной техники, прибывшей на место ликвидации пожара);
- причина пожара;
- пригодность видео пожара для анализа (да/нет/частично).

Благодаря возможности сформировать многокритериальный запрос, пользователь наиболее вероятно может получить выборку кортежей информационных ресурсов, содержащихся в базе данных, соответствующих задачам поиска.

Функция 2. Подготовка данных для работы с геоинформационными сервисами (ГИС).

Информация, содержащаяся в кортежах данных и соответствующая атрибуту «Координаты» – позволяет сформировать множество S , которое содержит координаты всех пожаров, которые включены в базу данных. После соответствующей подготовки из элементов множества может быть сформирован точечный слой по координатам для последующего отображения на электронной карте.

Функция 3. Подготовка данных для простейшего статистического анализа и графической визуализации. Содержимое информационных ресурсов, соответствующее атрибутам, выражаемым данными числового типа, является объектом простейшего статистического анализа (объекты анализа). Среди таких объектов анализа содержимое атрибутов:

- «пострадавшие» (человек). Множество данных, синтезированное из соответствующих элементов всех кортежей информационных ресурсов, для данного атрибута, назовем M_1 (далее, аналогично);
- «силы МЧС России» (человек), M_2 ;
- «техника МЧС России» (единиц), M_3 ;
- «площадь пожара» (м²), M_4 ;
- «время» (имеется ввиду значение времени суток в дискретном выражении, час), M_5 .

Перед непосредственной обработкой данных, примем, что объекты анализа представлены дискретными переменными. После этого в каждом из множеств M_1 - M_5 определяются несколько элементов по формулам (1–3):

$$m_{n_{max}} = \max\{M_n\}, \quad (1)$$

$$m_{n_{min}} = \min\{M_n\}, \quad (2)$$

$$\bar{m}_n = \frac{\sum_{i=1}^k M_{n_i}}{k}, \quad (3)$$

где, n – идентификатор конкретного множества данных M , $n \in \{1; 2; 3; 4; 5\}$;

m_n – искомый элемент в множестве M_n ;

\bar{m}_n – среднее арифметическое суммы значений элементов множества M_n ;

i – порядковый номер конкретного элемента множества M_n , $n \in [1; k]$; k – мощность множества M_n .

Такой анализ основан на базовых понятиях описательной статистики и позволяет выделить пожары (видеозаписи пожаров), для которых характерны экстремальные (максимальные и минимальные значения переменных), а также определить среднее значение по соответствующей выборке данных. После чего исследуемые данные готовы к графической визуализации, например, в виде гистограмм с выделением экстремумов и среднего значения.

Стоит отметить, что рассматриваемая реляционная модель данных может быть доработана (дополнена таблицами, их связями и атрибутами). Также, в дальнейшем могут быть предложены дополнительные функции. Для того, чтобы стало возможным использование такой модели данных необходимо выполнение двух основных условий:

- наполнение информационных ресурсов данными (реальными или тестовыми);
- реализация модели данных в системе управления базами данных (СУБД). Для выполнения данного условия можно воспользоваться одной из известных СУБД, однако выбрано решение – разработать программу для ЭВМ, которая реализует графический пользовательский интерфейс для работы с информационными ресурсами, имеет ряд простейших аналитических инструментов, а также будет способна выполнять несложное взаимодействие с пакетами офисных программ.

Описание программы для анализа видеозаписей пожаров, произошедших на стоянках автомобилей в городской среде

Для того, чтобы обеспечить возможность применения данной программы на широком спектре ЭВМ (с различными операционными системами), графический пользовательский интерфейс разработан на языке гипертекстовой разметки – HTML, с применением формального языка декорирования и описания внешнего вида документа – CSS. Такая реализация позволяет представить программу в виде браузерного приложения, которое будет поддерживаться как персональными компьютерами, так и современными смартфонами и планшетами. Для реализации функций использован язык программирования JavaScript. Далее представлены скриншоты графического пользовательского интерфейса и их описание. На рис. 5 представлен скриншот главного пользовательского окна, в которое интегрирована панель инструментов и база данных, состоящая из таблиц, включающих атрибуты и кортежи данных (информационные ресурсы).

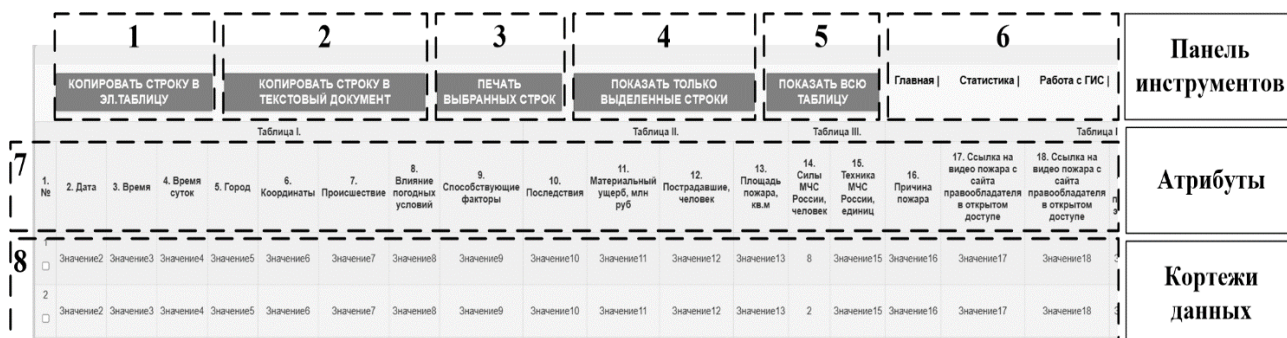


Рис. 5. Скриншот графического пользовательского интерфейса (главное окно)

Главное окно пользователя содержит восемь основных элементов:

1. Кнопка «Копировать строку в электронную таблицу» – позволяет скопировать содержимое выделенных кортежей данных для последующей вставки в табличный процессор;
2. Кнопка «Копировать строку в текстовый документ» – позволяет скопировать содержимое выделенных кортежей данных для последующей вставки в текстовый процессор. Функционирование первых двух элементов призвано помочь пользователю произвести легкий, быстрый и гибкий экспорт требуемой информации в программы из офисного пакета;
3. Кнопка «Печать выбранных строк» – позволяет вывести на печать содержимое только выделенных кортежей данных. Данная функция является весьма полезной, так как пользователь может вывести на печать не всю

базу данных, а только те кортежи, которые соответствуют конкретному запросу;

4. Кнопка «Показать только выделенные строки» – позволяет временно скрыть в главном окне кортежи данных, не интересующие пользователя в конкретной ситуации и оставить видимой только информацию, с которой осуществляется непосредственная работа;

5. Кнопка «Показать всю таблицу» – позволяет отменить операцию, осуществленную при использовании инструмента под номером 4.

6. Навигационная панель – позволяет осуществлять быстрый переход к функциональным разделам программы (к разделу «Статистика» и разделу «Работа с ГИС»);

7. Атрибуты базы данных;
8. Кортежи данных.

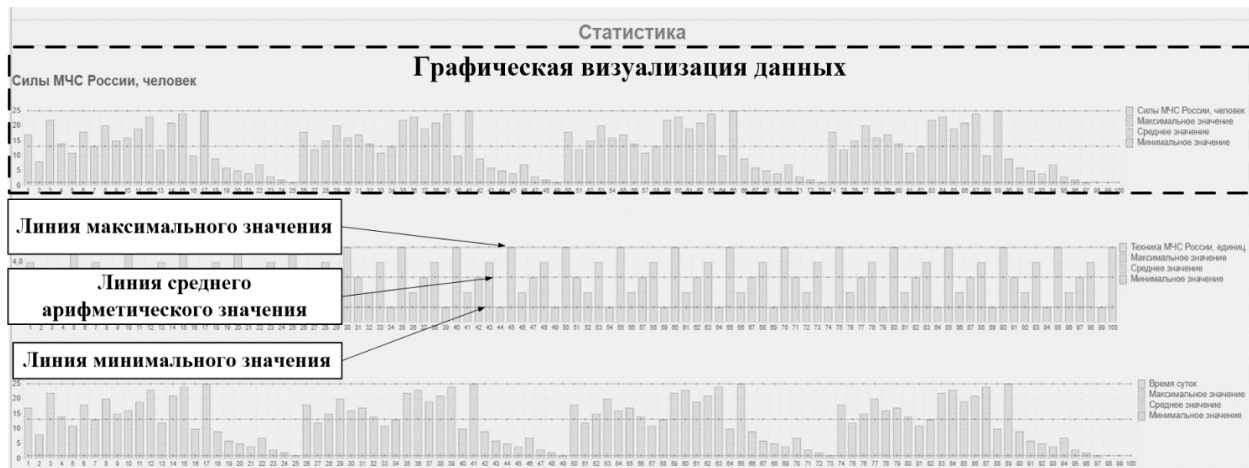


Рис. 6. Скриншот графического пользовательского интерфейса (раздел «Статистика»)

На рис. 6 представлен скриншот графического пользовательского интерфейса в разделе «Статистика».

Функционал программы для ЭВМ реализует графическую визуализацию значений дискретных переменных множеств M_n , где $n \in \{1; 2; 3; 4; 5\}$ в виде гистограмм. Также автоматически для каждого множества

производится расчет по формулам (1–3), при этом на каждой координатной плоскости в дополнение к гистограмме появляются три горизонтальные линии, значение которых по оси ординат, соответствуют полученным значениям m_{nmax} , m_{nmin} и \bar{m}_n . При необходимости пользователь может скрыть эти линии.

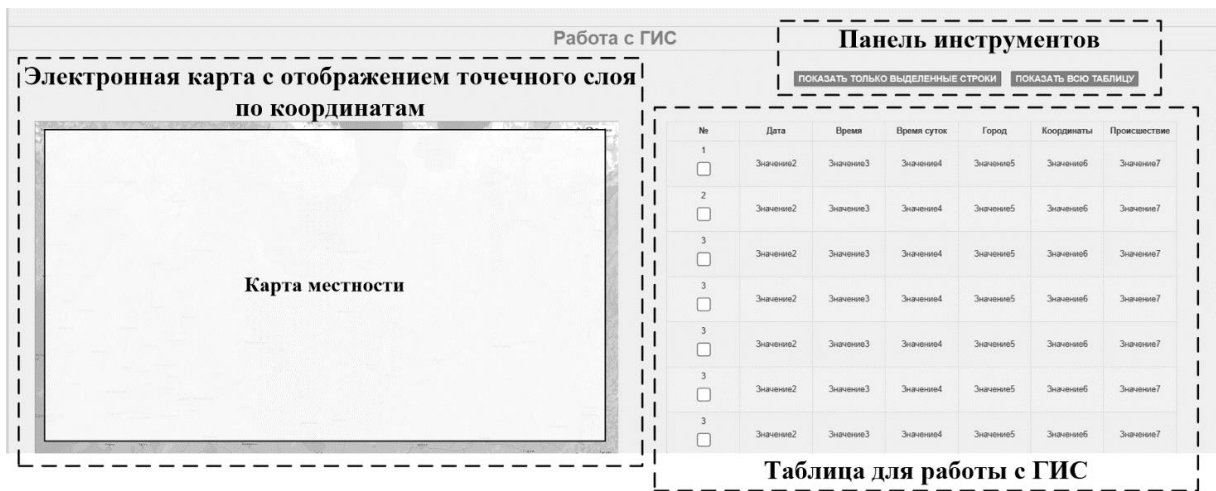


Рис. 7. Скриншот графического пользовательского интерфейса (раздел «Работа с ГИС»)

На рис. 7 приведен скриншот графического пользовательского интерфейса в разделе «Работа с ГИС». В данном случае рабочая область разделена на две части. В первой части находится электронная карта с отображением точечного слоя по координатам (использующая элементы множества C). Во второй части – фрагмент базы данных, представленной в главном окне пользователя, однако с уменьшенным количеством атрибутов.

На карте отображаются точки геолокации всех пожаров, информация о которых

представлена в базе данных. Представленные в кратком виде информационные ресурсы позволяют коротко охарактеризовать каждый из случаев с опорой на анализ картографической информации. Разделы «Статистика» и «Работа с ГИС» разработаны для визуализации данных и для многостороннего анализа каждого отдельного пожара (видеозаписи пожара).

Таким образом, пользователь имеет возможность при проведении анализа:

– изучить поток видеоинформации (основной источник информации в базе данных);

- проанализировать статистические данные;
 - проанализировать текстовое описание пожара;
 - проанализировать картографическую информацию;
 - проанализировать графическую информацию (гистограммы);
 - проанализировать в численном выражении основные виды ущерба для каждого из пожаров;
 - проанализировать в численном выражении основные параметры реагирования подразделений пожарной охраны для каждого из пожаров.
- После проведения анализа пользователь имеет возможность:
- сформировать выборку полезных кортежей данных;
 - продолжить работу с выборкой данных в текстовых и табличных процессорах;
 - вывести на печать необходимые данные.

Выводы

Авторы настоящей статьи провели анализ аспекта применения потока видеoinформации, поступающего в режиме реального времени от систем видеомониторинга, установленных в городской среде, в рамках проблемы информационной поддержки принятия решений при оперативном реагировании на пожары, произошедшие на стоянках автомобилей.

Настоящая статья посвящена совершенствованию инструментов информационной поддержки ЛПР для раннего выявления необходимости привлечения на место пожара дополнительных сил и средств подразделений пожарной охраны. Была выдвинута гипотеза: чтобы информационно обеспечить оперативные потребности рассматриваемой организационной системы, необходимо разработать инструменты для проведения превентивной работы на этапе «до возникновения пожара – превентивные мероприятия и планирование». На основе результатов проведенного анализа предложено информационное и программное обеспечение для системы управления оперативным реагированием на пожар в городской среде, а именно:

- разработана реляционная модель данных;
- реализована программа для ЭВМ, обеспечивающая кроссплатформенное функционирование базы данных.

Для обеспечения возможности использования базы данных как на персональных компьютерах, так и на смартфонах и планшетах – программа для ЭВМ разработана в виде

браузерного приложения. Применение языка программирования JavaScript позволило создать инструменты, благодаря которым пользователь базы данных может осуществлять поиск, копирование, экспорт в программы офисного пакета (табличные и текстовые процессоры) и печать тех данных, которые соответствуют задаче поиска.

Стоит отметить, что атрибуты разработанной базы данных в некоторых случаях дублируют атрибуты, которые присутствуют в Автоматизированной аналитической системе поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России (ААС КНД). Однако такое совпадение является случайным — атрибуты авторской базы данных не стоит сравнивать с атрибутами баз данных, входящих в состав ААС КНД, ввиду разного целевого назначения.

Текущая техническая реализация позволяет применять информационное и программное обеспечение только в одной из планируемых областей, описанных в настоящей статье ранее – на этапе «до возникновения пожара – превентивные мероприятия и планирование» для изучения сотрудниками оперативных дежурных смен особенностей пожаров на стоянках автомобилей.

Следующим этапом настоящего исследования станет подготовка к обучению моделей искусственного интеллекта для автоматизации процесса анализа потока видеoinформации. Для этого необходимо осуществить: сбор данных для наполнения информационных ресурсов; разработку программного обеспечения для автоматизированного анализа потока видеoinформации (с функцией информационной поддержки (или информирования) принятия решений ЛПР); разработку программного обеспечения для подготовки данных, накопленных в информационных ресурсах.

Таким образом создана теоретическая основа для дальнейшей разработки инструментов информационной поддержки принятия решений (или информирования) при оперативном реагировании на пожары, произошедшие на стоянках автомобилей, расположенных в городской среде (этап «после возникновения пожара – оперативные мероприятия»). В том числе планируется предложить алгоритм информирования ЛПР о том, что в видеопотоке информации обнаружены факторы, наличие которых требует рассмотрения возможности принятия решения о привлечении на место пожара дополнительных сил и средств подразделений пожарной охраны (на раннем этапе, до прибытия первых должностных лиц к месту пожара). Развитию данного направления будут посвящены следующие публикации по заявленной теме.

Список литературы

1. Леткина О. Г., Губайдуллина И. Н. Обеспечение пожарной безопасности на автомобильных парковках // Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности объектов различного назначения: сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 125–129. EDN: TTBCXG.
2. Поташев Д. А. Модели и методы обеспечения пожаровзрывобезопасности многоуровневых подземных автостоянок: дис. канд. техн. наук: 2.10.1. СПб., 2023. 146 с.
3. Пасовец В. Н., Ковтун В. А., Тагиев Ш. Ш. Пожары на автотранспортных средствах: причины возникновения // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, 2022, Т. 6, № 2, С. 228–238, DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-2.228.
4. Акимова А. Б., Моторыгин Ю. Д. Средства обеспечения пожарной безопасности на территории автостоянок // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. Т. 1. С. 16–18. EDN: VUNHVA.
5. Маргулан Т. А. Анализ особенностей возникновения и развития крупных пожаров на открытых автостоянках // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1-1(6). С. 134–136. EDN: VONOTJ.
6. Моторыгин Ю. Д. Моделирование пожароопасных режимов в электросети автомобилей для принятия решения при проведении пожаро-технической экспертизы // Пожаро-взрывобезопасность. 2016. Т. 25, № 9. С. 45–51. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.45-51. EDN: XACGVR.
7. Литовченко И.О. Методика обеспечения пожарной безопасности на открытых автостоянках: дис. канд. техн. наук: 05.26.03. СПб., 2018. 133 с.
8. Пожарная безопасность открытых автостоянок / В. И. Попов, А. Н. Песикин, М. В. Пуганов [и др.] // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 311–315. EDN: GANTFR.
9. Открытые автостоянки: проблемы обеспечения пожарной безопасности / В. И. Попов, А. Н. Песикин, М. В. Пуганов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 1(50). С. 92–98. EDN: SOXLIY.
10. Проблемные вопросы обеспечения безопасной эвакуации с объектов хранения автотранспорта / А. Н. Песикин, В. И. Попов, М. В. Пуганов [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXV Международной научно-практической конференции. М.: Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. С. 442–449. EDN: GIRNBN.
11. Акимова А. Б., Моторыгин Ю. Д., Ловчиков В. А. Моделирование пожара на автостоянке закрытого типа методом эмпирического подобию // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. № 1. С. 76–82. EDN: ZROWII.
12. Моторыгин Ю. Д., Акимова А. Б. Анализ мест хранения автотранспорта с учетом пожарной безопасности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 2 (50). С. 52–57. EDN: VJHQQF.
13. Литовченко И. О., Моторыгин Ю. Д. Методика снижения пожарной опасности в местах открытого хранения автотранспорта с использованием стохастических моделей // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2018. № 2. С. 29–36. EDN: YLTPUT.
14. Оценка эффективности принятия решений по повышению пожарной безопасности на открытых автостоянках / Ю. Д. Моторыгин, И. О. Литовченко, А. В. Максимов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26, № 1. С. 25–31. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.25-31. EDN: XWVMKB.
15. Моторыгин, Ю. Д., Акимова А. Б. Декомпозиция факторов, влияющих на развитие горения автотранспортных средств, в закрытых автостоянках // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2021. № 1. С. 9–16. EDN: DZOIUW.
16. Фаворская М. Н., Пятаева А. В. Детектирование дыма на открытых пространствах в сложных погодных условиях с применением пространственно-временных локальных бинарных шаблонов // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1(80). С. 16–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.16. EDN: VOMVPL.
17. Пятаева А. В., Бандеев О. Е. Обнаружение пламени и дыма по видеоданным // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12, № 5. С. 542–554. DOI: 10.17516/1999-494X-0105. EDN: WVPDMB.

18. Бандеев О. Е. Исследование методов и разработка алгоритмов обнаружения пламени на открытых пространствах по видеопоследовательностям // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IV международной научной конференции. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. С. 78–81. EDN: DENCGR.

19. Пятаева А. В. Исследование методов и разработка алгоритмов обнаружения дыма на открытых пространствах по видеопоследовательностям: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. 164 с. EDN: NFBQWR.

20. Фаворская М. Н., Пятаева А. В. Детектирование дыма на открытых пространствах в сложных погодных условиях с применением пространственно-временных локальных бинарных шаблонов // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1 (80). С. 16–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.16. EDN: VOMVPL.

21. Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2022622765 Российская Федерация. База данных по пожарам на автомобильном транспорте / А. А. Тумановский, И. Д. Чешко, Ю. Н. Елисеев [и др.], № 2022622610; заявл. 24.10.2022; опубл. 07.11.2022, Бюл. № 11, 1 с.

22. Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2018622093 Российская Федерация. База данных мобильного программно-технического комплекса обеспечения проведения аварийно-спасательных работ при ликвидации последствий дорожно-транспортных происшествий / В. П. Сломянский, И. В. Курличенко, С. В. Колеганов [и др.], № 2018620335; заявл. 20.03.2018; опубл. 19.12.2018, Бюл. № 12, 1 с.

23. Тараканов Д. В., Семенов А. О., Апарин А. А. Модели мониторинга пожаров на открытых территориях: монография. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. 103 с.

24. Семенов А. О., Апарин А. А., Калашников Д. В. Мониторинг пожаров на открытых территориях: монография. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2025. 311 с.

25. Апарин А. А. Модели и алгоритмы поддержки принятия управленческих решений при реагировании на пожар в городской среде // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 3 (52). С. 105–111. EDN: CYYSSK.

26. Разработка программы, формирующей виджет для видеостены Центра управления в кризисных ситуациях / А. А. Апарин, А. О. Семенов, Е. Ф. Разумова [и др.] //

Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 3 (56). С. 81–90. EDN: MIGJEF.

27. Апарин А. А. Применение видеомониторинга для информационной поддержки принятия управленческих решений при реагировании на техногенный пожар // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 3 (44). С. 5–11. EDN AONIIM.

28. Апарин А. А., Семенов А. О. Видеомониторинг места пожара в городской среде на раннем этапе реагирования сил и средств подразделений пожарной охраны // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2025. С. 282–284. EDN: THYQDI.

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024681047 Российская Федерация. Имитационное моделирование времени движения по внутривортовой территории первого прибывающего к месту пожара отделения на автоцистерне / А. А. Апарин, Д. В. Тараканов, А. О. Семенов. № 2024680173; заявл. 29.08.2024; опубл. 04.09.2024, Бюл. № 9, 1 с. EDN: CGEVXA.

30. Акулов О. А., Медведев Н. В. Информатика: базовый курс: учебник. М.: Омега-Л, 2008. 574 с.

31. Харкевич А. А. О ценности информации // Проблемы кибернетики. 1960. № 4. С. 53–57.

32. Корогодина В. И., Корогодина В. Л. Информация как основа жизни. Дубна: ИЦ «Феникс», 2000. 60 с.

33. Бонгард М. М. Проблемы узнавания. М.: Наука, 1967. 320 с.

References

1. Letkina O. G., Gubaidullina I. N. Obespechenie pozharnoi bezopasnosti na avtomobilnykh parkovkakh [Ensuring fire safety in car parks]. *Aktualnye voprosy obespecheniia pozharnoi bezopasnosti obiektov razlichnogo naznacheniia: sbornik statei VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Penza: Penzenskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2024. Pp. 125–129. EDN TTBCXG.

2. Potashev D. A. Modeli i metody obespecheniia pozharovzryvobezopasnosti mnogourovnevnykh podzemnykh avtostoiianok. Diss. kand. tekhn. nauk [Models and methods of ensuring fire and explosion safety of multi-level underground parking lots. Cand. tech. sci. diss.]. SPb., 2023. 146 p.

3. Pasovets V. N., Kovtun V. A., Tagiev Sh. Sh. Pozhary na avtotransportnykh

sredstvakh: prichiny vozniknoveniia [Fires on motor vehicles: causes of occurrence]. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zashchity MChS Belarusi*, 2022, vol. 6, issue 2, pp. 228–238, DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-2.228.

4. Akimova A. B., Motorygin Iu. D. Sredstva obespecheniia pozharnoi bezopasnosti na territorii avtostoianok [Fire safety equipment in parking lots]. *Problemy obespecheniia bezopasnosti pri likvidatsii posledstviia chrezvychainykh situatsii*, 2018, vol. 1, pp. 16–18. EDN: VUNHVA.

5. Margulan T. A. Analiz osobennosti vozniknoveniia i razvitiia krupnykh pozharov na otkrytykh avtostoiankakh [Analysis of the features of the occurrence and development of large fires in outdoor parking lots]. *Sovremennye tekhnologii obespecheniia grazhdanskoi oborony i likvidatsii posledstviia chrezvychainykh situatsii*, 2015, vol. 1-1(6), pp. 134–136. EDN: VOHOTJ.

6. Motorygin Iu. D. Modelirovanie pozharoopasnykh rezhimov v elektroseti avtomobilei dlia priniatiia resheniia pri provedenii pozharno-tekhnicheskoi ekspertizy [Modeling of fire-hazardous conditions in the electrical network of cars for decision-making during fire-technical expertise]. *Pozharovzryvbezopasnost*. 2016. vol. 25, issue 9, pp. 45–51. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.45-51. EDN: XACGVR.

7. Litovchenko I. O. Metodika obespecheniia pozharnoi bezopasnosti na otkrytykh avtostoiankakh. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods of ensuring fire safety in outdoor parking lots. Cand. tech. sci. diss.]. SPb., 2018. 133 p.

8. Pozharnaia bezopasnost otkrytykh avtostoianok [Fire safety of outdoor parking lots] / V. I. Popov, A. N. Pesikin, M. V. Puganov [et al.]. *Sovremennye pozharobezopasnye materialy i tekhnologii: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ivanovo: Ivanovskaia pozharno-spasatelnaia akademiia GPS MChS Rossii, 2023. Pp. 311–315. EDN: GANTFR.

9. Otkrytye avtostoianki: problemy obespecheniia pozharnoi bezopasnosti [Open parking lots: fire safety issues] / V. I. Popov, A. N. Pesikin, M. V. Puganov [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoi zashchity*, 2024, vol. 1 (50), pp. 92–98. EDN: SOXLIY.

10. Problemnye voprosy obespecheniia bezopasnoi evakuatsii s obiektov khraneniia avtotransporta [Problematic issues of ensuring safe evacuation from vehicle storage facilities] / A. N. Pesikin, V. I. Popov, M. V. Puganov [et al.]. Aktualnye problemy pozharnoi bezopasnosti: materialy XXXV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Moscow: Vserossiiskii ordena Znak Pocheta nauchno-issledovatel'skii institut protivopozharnoi oborony Ministerstva Rossiiskoi Federatsii po delam grazhdanskoi oborony,

chrezvychainym situatsiiam i likvidatsii posledstviia stikhiinykh bedstviia, 2023. Pp. 442–449. EDN: GIRNBN.

11. Akimova A. B., Motorygin Iu. D., Lovchikov V. A. Modelirovanie pozhara na avtostoianke zakrytogo tipa metodom empiricheskogo podobiiia [Simulation of a fire in a closed parking lot using the empirical similarity method]. *Nauchno-analiticheskii zhurnal Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii*, 2020, issue 1, pp. 76–82. EDN: ZROWII.

12. Motorygin Iu. D., Akimova A. B. Analiz mest khraneniia avtotransporta s uchetom pozharnoi bezopasnosti [Analysis of vehicle storage locations, taking into account fire safety]. *Problemy upravleniia riskami v tekhnosfere*, 2019, vol. 2 (50), pp. 52–57. EDN: BJHQQF.

13. Litovchenko I. O., Motorygin Iu. D. Metodika snizheniia pozharnoi opasnosti v mestakh otkrytogo khraneniia avtotransporta s ispolzovaniem stokhasticheskikh modelei [Methods for reducing fire danger in open storage areas of vehicles using stochastic models]. *Nauchno-analiticheskii zhurnal Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii*, 2018, issue 2, pp. 29–36. EDN: YLTPUT.

14. Otsenka effektivnosti priniatiia reshenii po povysheniiu pozharnoi bezopasnosti na otkrytykh avtostoiankakh [Assessment of the effectiveness of decision-making to improve fire safety in outdoor parking lots] / Iu. D. Motorygin, I. O. Litovchenko, A. V. Maksimov [et al.]. *Pozharovzryvbezopasnost*, 2017, vol. 26, issue 1, pp. 25–31. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.25-31. EDN: XWVMKB.

15. Motorygin Iu. D., Akimova A. B. Dekompozitsiia faktorov, vliiaushchikh na razvitie goreniiia avtotransportnykh sredstv, v zakrytykh avtostoiankakh [Decomposition of factors influencing the development of gorenje vehicles in closed parking lots]. *Nauchno-analiticheskii zhurnal Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii*, 2021, issue 1. pp. 9–16. EDN: DZOIUW.

16. Favorskaia M. N., Piataeva A. V. Detektirovanie dyma na otkrytykh prostranstvakh v slozhnykh pogodnykh usloviakh s primeneniem prostranstvenno-vremennykh lokalnykh binarnykh shablonov [Smoke detection in open spaces in difficult weather conditions using spatiotemporal local binary patterns]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2016, vol. 1 (80), pp. 16–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.16. EDN: VOMVPL.

17. Piataeva A. V., Bandedev O. E. Obnaruzhenie plameni i dyma po videodannym [Flame and smoke detection based on video data]. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta*.

Seriia: Tekhnika i tekhnologii, 2019, vol. 12, issue 5, pp. 542–554. DOI: 10.17516/1999-494X-0105. EDN: WVPDMB.

18. Bandeev O. E. Issledovanie metodov i razrabotka algoritmov obnaruzheniia plameni na otkrytykh prostranstvakh po videoposledovatel'nostiam [Research of methods and development of algorithms for detecting flames in open spaces by video sequences]. *Regionalnye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli: Materialy IV mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Krasnoirsk: Sibirskii federalnyi universitet, 2017. Pp. 78–81. EDN: DENC GP.

19. Piataeva A. V. Issledovanie metodov i razrabotka algoritmov obnaruzheniia dyma na otkrytykh prostranstvakh po videoposledovatel'nostiam: monografiya [Research of methods and development of algorithms for detecting smoke in open spaces by video sequences: monograph]. Krasnoirsk: Sibirskii federalnyi universitet, 2017. 164 p. EDN: NFBQWR.

20. Favorskaia M. N., Piataeva A. V. Detektirovanie dyma na otkrytykh prostranstvakh v slozhnykh pogodnykh usloviakh s primeneniem prostranstvenno-vremennykh lokalnykh binarnykh shablonov [Smoke detection in open spaces in difficult weather conditions using spatiotemporal local binary patterns]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2016, vol. 1 (80), pp. 16–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.16. EDN: VOMVPL.

21. A. A. Tumanovskii, I. D. Cheshko, Iu. N. Eliseev [et al.]. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh 2022622765 Rossiiskaia Federatsiia. Baza dannykh po pozharom na avtomobilnom transporte [Database on fires in motor transport], № 2022622610, byulleten № 11, 1 p.

22. V. P. Slomianskii, I. V. Kurlichenko, S. V. Koleganov [et al.]. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh 2018622093 Rossiiskaia Federatsiia. Baza dannykh mobilnogo programmno-tekhnicheskogo kompleksa obespecheniia provedeniia avariino-spasatelnykh rabot pri likvidatsii posledstviu dorozhno-transportnykh proisshestvii [Database of a mobile software and hardware complex for emergency rescue operations in the aftermath of road accidents], № 2018620335, byulleten № 12, 1 p.

23. Tarakanov D. V., Semenov A. O., Aparin A. A. *Modeli monitoringa pozharov na otkrytykh territoriakh: monografiia* [Models of fire monitoring in open areas: monograph]. Ivanovo: Ivanovskaia po-zharno-spasatelnaia akademiia GPS MChS Rossii, 2022. 103 p.

24. Semenov A. O., Aparin A. A., Kalashnikov D. V. Monitoring pozharov na otkrytykh territoriakh: monografiia [Fire monitoring in open areas: monograph]. Ivanovo: Ivanovskaia po-zharno-spasatelnaia akademiia GPS MChS Rossii, 2025. 311 p.

25. Aparin A. A. Modeli i algoritmy podderzhki priniatiia upravlencheskikh reshenii pri reagirovanii na pozhar v gorodskoi srede [Models and algorithms for supporting managerial decision-making in responding to a fire in an urban environment]. *Sovremennye problemy grazhdanskoi zashchity*, 2024, vol. 3 (52), pp. 105–111. EDN: CYYSSK.

26. Razrabotka programmy, formiruiushchei vidzhet dlia videosteny Tsentra upravleniia v krizisnykh situatsiiakh [Development of a program that forms a widget for the video wall of a Crisis Management Center] / A. A. Aparin, A. O. Semenov, E. F. Razumova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoi zashchity*, 2025, vol. 3 (56), pp. 81–90. EDN: MIGJEF.

27. Aparin A. A. Primenenie videomonitoringa dlia informatsionnoi podderzhki priniatiia upravlencheskikh reshenii pri reagirovanii na tekhnogennyi pozhar [The use of video monitoring for information support of managerial decision-making in response to a man-made fire]. *Sovremennye problemy grazhdanskoi zashchity*, 2022, vol. 3 (44), pp. 5–11. EDN: AONIIM.

28. Aparin A. A., Semenov A. O. Videomonitoring mesta pozhara v gorodskoi srede na rannem etape reagirovaniia sil i sredstv podrazdelenii pozharnoi okhrany [Video monitoring of a fire site in an urban environment at an early stage of the response of forces and means of fire protection units]. *Molodye uchenye v reshenii aktualnykh problem bezopasnosti: materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Zheleznogorsk: Sibirskaia pozharno-spasatelnaia akademiia GPS MChS Rossii, 2025. Pp. 282–284. EDN: THYQDI.

29. Aparin A. A., Tarakanov D. V., Semenov A. O. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM 2024681047 Rossiiskaia Federatsiia. Imitatsionnoe modelirovanie vremeni dvizheniia po vnutridvorovoi territorii pervogo pribyvaiushchego k mestu pozhara otdeleniia na avtotsisterne [Simulation of the travel time in the courtyard area of the first department arriving at the fire site on a tanker truck], № 2024680173, byulleten № 12, 1 p. EDN: CGEVXA.

30. Akulov O. A., Medvedev N. V. Informatika: bazovyi kurs: uchebnik [Computer science: basic course: textbook]. Moscow: Omega-L, 2008. 574 p.

31. Kharkevich A. A. O tsennosti informatsii [On the value of information]. *Problemy kibernetiki*, 1960, issue 4, pp. 53–57.

32. Korogodin V. I., Korogodina V. L. *Informatsiia kak osnova zhizni* [Information as the basis of life]. Dubna: ITs «Feniks», 2000. 60 p.

33. Bongard M. M. *Problemy uznvaniia* [Problems of recognition]. Moscow: Nauka, 1967. 320 p.

Апарин Александр Александрович

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

кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: aparin.ivanovo-37@yandex.ru

Aparin Alexander Alexandrovich

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

Candidate of Technical Sciences, senior lecturer

E-mail: aparin.ivanovo-37@yandex.ru

Смирнов Дмитрий Владимирович

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

курсант факультета пожарной безопасности

Smirnov Dmitry Vladimirovich

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

cadet of the Faculty of Fire Safety

УДК 355.4

DOI 10.48612/ntp/rghv-nmm2-558a

ПРИМЕНЕНИЕ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ СРЕДСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЗАДАЧ СПАСАТЕЛЬНЫМИ ВОИНСКИМИ ФОРМИРОВАНИЯМИ

А. В. БОБАРИКО, С. Н. РОЖКОВ, Р. Н. ЯШКОВ, Д. А. МОСКАЛЕВ, Н. В. БОРОДИН

ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»,

Российская Федерация, Московская область, г. Химки

E-mail: r.yashkov@agz.50.mchs.gov.ru

В статье рассматриваются вопросы управления спасательными воинскими формированиями МЧС России при ликвидации чрезвычайных ситуаций. Особое внимание уделяется роли моделирования оперативной обстановки как ключевого инструмента для принятия обоснованных решений командирами подразделений.

Выявлены актуальные системные проблемы в практике процесса управления, связанные с трудностями восприятия командирами сложного математического аппарата, недостаточной автоматизацией обработки пространственных и временных данных, а также отсутствием единой интегрированной модели обстановки, объединяющей пространственные, временные и организационные аспекты.

В качестве основного решения предлагается разработка и внедрение автоматизированных систем специального назначения, способных формировать и поддерживать в актуальном состоянии геопропространственную модель оперативной обстановки. Такая модель должна учитывать ключевые атрибуты: пространственное положение объектов, временную динамику событий и принадлежность сил и средств конкретным подразделениям и позволит автоматически агрегировать данные, визуализировать обстановку в реальном времени и проводить комплексный анализ, обеспечивая командира активной и интуитивно понятной картиной для выработки замысла.

В заключении делается вывод о том, что интеграция геопропространственного моделирования в современные системы управления является важной научно-практической задачей, решение которой позволит повысить устойчивость, оперативность и эффективность управления силами и средствами спасательных воинских формирований МЧС России в условиях ликвидации ЧС.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, замысел действий, модель оперативной обстановки, спасательные воинские формирования, управленческое решение, чрезвычайная ситуация.

USE OF MEANS OF DISPLAYING OPERATIONAL SITUATION IN AUTOMATED SYSTEMS WHEN PERFORMING TASKS BY MILITARY RESCUE UNITS

A. V. BOBARIKO, S. N. ROZHKOV, R. N. YASHKOV, D. A. MOSKALEV, N. V. BORODIN

Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia

Khimki, Moscow Region, Russian Federation

E-mail: r.yashkov@agz.50.mchs.gov.ru

The article discusses the management of rescue military units of the Russian Ministry of Emergency Situations in emergency situations. Special attention is paid to the role of modeling the operational situation as a key tool for making informed decisions by unit commanders.

The actual systemic problems in the practice of the management process are identified, related to the difficulties of commanders' perception of complex mathematical apparatus, insufficient automation of spatial and temporal data processing, as well as the lack of a single integrated model of the situation combining spatial, temporal and organizational aspects.

The main solution is the development and implementation of automated special-purpose systems capable of forming and maintaining an up-to-date geospatial model of the operational situation. Such a model should take into account key attributes: the spatial position of objects, the temporal dynamics of events and the affiliation of forces and means to specific units and will automatically aggregate data, visualize the situation

in real time and conduct a comprehensive analysis, providing the commander with an objective and intuitive picture for developing a plan.

In conclusion, it is concluded that the integration of geospatial modeling into modern management systems is an important scientific and practical task, the solution of which will increase the stability, efficiency and effectiveness of managing the forces and means of rescue military units of the Russian Ministry of Emergency Situations in emergency response conditions.

Key words: automated control system; plan of action, model of the operational situation, rescue military formations, management decision, emergency situation.

Введение

Группировка спасательных воинских формирований (далее – СВФ) МЧС России в районе ликвидации чрезвычайной ситуации (далее – ЧС) может быть представлена широким спектром различных подразделений того или иного спасательного центра (далее – СЦ) МЧС России, каждое из которых имеет специфическое предназначение (соответствующие ему вооружение и технику), возможности, степень способности и готовности к выполнению задач по предназначению.

Геофизические свойства местности в районе действий напрямую влияют на порядок и результат их решения. Определяющим фактором для достижения конечных целей действий СВФ является их всестороннее обеспечение, в том числе управления силами и средствами (техническое, информационное, программное, лингвистическое и др.).

Цель предстоящих действий может быть реализована при выполнении таких требований к управлению, как устойчивость, непрерывность, оперативность и скрытность.

Цель и методы исследования

Целью исследования является проведение анализа требований к управлению силами и средствами спасательных воинских формирований МЧС России и рассмотрение вопроса роли моделирования оперативной обстановки в автоматизированных системах управления.

В ходе исследования применялись общенаучные и специальные методы научного познания – анализ, обобщение, которые опирались на общие принципы и системный анализ.

Результаты исследования и обсуждение

Само понятие управления силами и средствами определяется, прежде всего, как целенаправленная деятельность руководителя (начальника СЦ, командира спасательного отряда (далее – СО) и др.), органов военного управления (штабов, служб и др.) по выработке управляющих воздействий (решений) по

определению способов и методов действий с учетом имеющихся сил и средств [1].

Взяв за основу данное определение, необходимо отметить, что целенаправленная деятельность предполагает наличие цели, на которую направлены деятельность, пути реализации (например, план применения, который устанавливает взаимосвязанные во времени и пространстве мероприятия, реализация которых позволит получить желаемый результат) и методический аппарат, используемый при выполнении задач по предназначению [1].

Такой род деятельности, как целенаправленность, направлен на достижение конечного результата, цели. Для реализации функций управления (планирования, организации, руководства, координации, контроля) определение цели является обязательным. Для достижения цели необходимо выполнение ряда задач и функций. Например, для выполнения задачи по ликвидации ЧС СВФ и органам управления необходимо: совершить марш в район предстоящих действий, осуществить расстановку техники, оценить обстановку, выработать замысел и решение на проведение локализации, ликвидации ЧС и спасения людей и др [2].

В процессе выполнения тех или иных задач (функций, мероприятий) в результате контроля могут быть выявлены отклонения от плана, в этом случае потребуются корректировка функций (мероприятий) для выполнения задачи (или задач) для достижения желаемого результата (цели) или же потребуются корректировка задачи (задач) в интересах цели. В этом случае можно говорить о принципе управления – принципе приоритета цели [3].

Цель, сосредоточение основных усилий, предстоящие задачи, способы их достижения формируются начальником (командиром) СВФ в виде замысла и решения в целом. Рациональность принимаемых решений напрямую зависит от степени уяснения начальником (командиром) СВФ предстоящих задач, оценки обстановки и выводов в результате этой оценки, от навыков в применении тех или иных тактических приемов в различных условиях и организаторских способностей добиться выполнения своего решения [4].

Утвержденный замысел (решение) находит свое отражение в ряде оперативных документов – в виде графических и текстовых документов, представленных на рисунке [5, 6].

По своему информационному наполнению документы обоих видов очень близки: здесь и там мы имеем описание положения и характера действий и задачи своих подраз-

делений, данные о районе предстоящих действий, порядок всестороннего обеспечения, взаимодействия и управления и ряд других положений, но формы графических и текстовых документов значительно отличаются. Наличие двух форм описания ситуации в районе ликвидации ЧС обусловлено необходимостью максимально доходчиво и однозначно отразить суть происходящего.



Представление об оперативной обстановке в сознании руководителя (начальника)



Приказ 1 спаср на проведение АСДНР
ПРИКАЗ 1 спаср № 1. КНП – 200 м сев.-вост. Вязовая. 16:50 02.08. Карта 1:25000, изд. 2023 г.

В результате жаркой и засушливой погоды в начале августа на территории Юрюзанского района Челябинской области сложилась пожароопасная..

Оперативные документы

Рисунок. Отражение замысла (решения) командира (начальника) в оперативных документах

В любом случае необходимо при прогнозировании обстановки и ее развития исходить из наихудшего варианта. Другими словами, составляются определенные модели обстановки и выбирается из них наиболее неблагоприятная.

Важность создания и поддержания в актуальном состоянии таких моделей ситуации в районе ликвидации ЧС для решения задач управления подразделениями СВФ трудно переоценить – если таких моделей нет или они не соответствуют ситуации, начальник (командир) СВФ не в состоянии выработать и принять необходимые меры для достижения поставленной цели, такое состояние называется потерей управления и приводит к срыву выполнения задачи.

Руководящие документы МЧС России подчеркивают важность непрерывного изучения ситуаций, своевременную обработку оперативных документов, уточнения их содержания.

В самом общем смысле под моделированием оперативной обстановки понимается

процесс создания и применения модели ЧС для решения задач управления СВФ. В данном случае под моделью понимается мысленно представляемая, либо материально реализованная система, которая в процессе познания заменяет собственно объект исследования (район ликвидации ЧС и его объекты) с некоторой степенью допущения, сохраняет важные для целей моделирования свойства объекта моделирования и обеспечивает получение новых знаний об объекте, в нашем случае – об обстановке в районе ликвидации ЧС. Вопрос заключается в выборе технологического подхода к созданию и применению такой модели [7].

Процесс моделирования в интересах управления подразделениями СВФ связан с применением различного математического аппарата в целях изучения хода и результатов ликвидации ЧС. Однако, непосредственно использовать математический аппарат (особенно сложный), в ходе принятия начальником (командиром) СВФ решения оказывается весьма затруднительным, поскольку выражение науч-

ных рекомендаций для него в математических терминах, таких как «математическое ожидание наступления того или иного события» и подобных не воспринимается им так, как того ожидают специалисты-математики. То есть результаты математических расчетов требуют дополнительной интерпретации и отображения в таком виде, который на уровне интуиции адекватно воспринимается начальником (командиром) СВФ за минимальное время.

Еще одна проблема заключается в необходимости приведения имеющихся данных обстановки к виду, обеспечивающему применение определенного математического аппарата. Третья проблема заключается в невозможности свести ликвидацию ЧС к одной единой математической модели. Для исследования оперативной обстановки требуется применение двух и более математических моделей, использующих различный математический аппарат, а для принятия решения начальнику (командиру) СВФ необходима их совместная непротиворечивая интерпретация.

Здесь на помощь должны прийти современные средства вычислительной техники, вмещающие в себе значительные вычислительные мощности и широкий спектр мультимедийных средств отображения данных в том или ином виде. Внедрение в практику управления подразделениями СВФ вычислительной техники является в МЧС России важным фактором решения задач проектирования, создания и внедрения автоматизированных систем специального назначения (далее – АС СН) [8, 9].

АС СН будет рассматриваться как человеко-машинная система, состоящая из комплекса средств автоматизации (далее – КСА) и «обслуживающего персонала» – личного состава органов управления, взаимодействующего с входящими в состав КСА программными и техническими средствами. То обстоятельство, что современная АС СН сочетает в себе значительную вычислительную мощность, гибкие средства графического отображения хранимой информации и телекоммуникационные средства, делает такие системы чрезвычайно перспективным средством создания и применения моделей оперативной обстановки.

Модель оперативной обстановки должна представлять собой информационную модель. Как сказано выше, такая модель сама по себе является материальной системой, а в случае реализации ее на базе АС СН необходимо говорить об информационной системе.

Поскольку модель оперативной обстановки предполагается использовать в АС СН, модель представляется целесообразным не выделять в какую-либо отдельную систему, так как это неизбежно приведет к усложнению

системы управления и повышению затрат труда оперативного состава. Наоборот, модель оперативной обстановки представляется целесообразным включить в состав АС СН, соответственно создание, актуализация и применение такой модели должно обеспечиваться средствами самой АС СН.

Собственно говоря, АС СН призвана обеспечить функционирование информационной системы, моделирующей оперативную обстановку. Все элементы АС СН целесообразно рассматривать по их роли и месту в решении задачи моделирования. Оперативную обстановку принято моделировать на топографической карте. Именно под эту концепцию разработаны современные руководящие документы по управлению подразделениями СВФ на всех уровнях. В связи с этим, технические задания на создание КСА каждой вновь создаваемой АС СН требуют обеспечить компьютерную разработку документов, выводимых на заключительном этапе разработки на печать. Алгоритм работы органов управления при этом принципиально не отличается от того, что применялся до внедрения средств автоматизации.

Такой подход не требует создания собственно компьютерной модели обстановки. Достаточно иметь редакторы: графический (например, Corel Draw, ГИС «Оператор» или «Рокада») и текстовый (например, комплекс программных средств по обеспечению повседневной деятельности должностных лиц – КП «Офис») и набор разрозненных прикладных программ, реализующих те или иные тактические расчеты и модели. Однако, такой подход предполагает ручной ввод исходных данных для выполнения расчетов, а также необходимость переноса результатов расчетов на рабочую карту вручную. В условиях недостатка времени оперативный состав вручную, в соответствии со своим субъективным представлением формирует документы, описывающие оперативную обстановку, при этом учет важных с тактической точки зрения факторов зависит исключительно от квалификации должностных лиц.

Существующие средства образно-знакового моделирования тактической обстановки, как правило, созданные на основе специализированных редакторов типа «Рокада», «Равелин», ГИС ВН «Интеграция» и «Оператор» не требуют указания времени актуальности для элементов создаваемого документа. Обычно время указывается не как атрибут, а как подпись к условному знаку, а в текстовом документе – указывается текстом. И тот и другой способ не обеспечивают автоматизацию обработки данных и ориентированы исключительно на ручную обработку. Представляется целесообразным рассматривать время как ключевой

атрибут для каждого моделируемого элемента тактической обстановки.

Аналогично можно сказать и про принадлежность того или иного элемента модели (документа) к тому или иному подразделению СВФ. Обычно это делается отдельной подписью или разделом в текстовом документе. Такой подход крайне затруднительно автоматизировать.

Целесообразно для каждого элемента данных иметь атрибут принадлежности к подразделению СВФ. Наличие иерархии подчиненности (является обязательным элементом информационного обеспечения) дает широчайшие возможности по созданию выборок данных (например, все основные или обеспечивающие, или только отдельные подразделения СЦ, такие как спасательная рота РХБЗ, инженерно-спасательная рота, пожарно-спасательная рота, спасательная группа проведения пиротехнических и взрывных работ, группа беспилотных летательных аппаратов и робототехнических средств).

Пространственный фактор в современных условиях внедрения идей сетецентрического управления подразделениями СВФ, выходит на первый план, поскольку в условиях ликвидации ЧС быстрый и точный маневр силами и средствами может обеспечить выполнение задач по предназначению в установленные сроки.

Список литературы

1. Военный энциклопедический словарь ракетных войск стратегического назначения / Под ред. И. Д. Сергеева, В. Н. Яковлева, Н. Е. Соловцова [и др.]. М.: Мин-во обороны РФ, 1999. 632 с.

2. Яшкова А. С., Волохо К. Ю., Сидорова О. О. Анализ проблемной ситуации в области подготовки специалистов в вузах МЧС России // Психолого-педагогические проблемы становления личности сотрудника МЧС России и преподавателя ОБЖ: сборник трудов XXXIV Международной научно-практической конференции. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России им. генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика, 2024. С. 114–120. EDN: NSDXKD.

3. Атаманчук Г. В. Управление – фактор развития (размышления об управленческой деятельности). [Серия: «Об управлении: избранное». В 6 кн. Кн. 4]. М.: Academia, 2018. 520 с.

4. Атаманчук Г. В. Теория государственного управления: курс лекций. [Серия: «Об

Для учета пространственного фактора в материальной системе создано научное направление геоинформатики, называемое геопро- пространственным моделированием. Соответственно, модель оперативной обстановки, структурированную на основе пространственного положения элементов тактического порядка и тактически значимых объектов предлагается называть геопропространственной моделью [10].

Выводы

Таким образом, в настоящей статье рассмотрен вопрос о роли моделирования оперативной обстановки в автоматизированных системах управления (АСУ).

1. Определено место геопропространственной модели в АСУ как одного из ключевых компонентов представления оперативной обстановки в виде, наиболее пригодном для выработки начальником (командиром) СВФ замысла и принятия решения.

2. Формирование и применение геопропространственной модели в современных и перспективных АСУ является важной и не в полной мере решенной научно-практической проблемой, несмотря на все имеющиеся достижения в области развития средств автоматизации управления, что требует дальнейшего совершенствования теории и практики создания и применения АСУ, связанных с учетом геопропространственного фактора при решении задач СВФ в условиях ликвидации ЧС.

управлении: избранное». В 6 кн. Кн. 5]. М.: Academia, 2018. 496 с.

5. Тактика действий спасательной роты при организации и проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ: учебное пособие / А. П. Лещенко, Д. И. Новоселов, А. Ю. Малеван [и др.]. Химки: АГЗ МЧС России, 2022. 145 с.

6. Тактика действий спасательного отряда при организации и проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ: учебное пособие / А. П. Лещенко, Д. И. Новоселов, Н. В. Бородин [и др.]. Химки: АГЗ МЧС России, 2022. 168 с.

7. Научно-методические перспективы образно-знакового моделирования оперативной обстановки при ликвидации чрезвычайных ситуаций спасательными воинскими формированиями МЧС России / А. В. Бобарико, А. П. Лещенко, Д. И. Новоселов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 114–119. EDN: JELJMW.

8. Лещенко А. П., Шагов Г. Г., Макаров А. И. Рекомендации по совершенствованию методики проведения занятий по

дисциплине «Топография» // Совершенствование тактики действий спасательных воинских формирований МЧС России: сборник трудов XXXIV Международной научно-практической конференции. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России им. генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика, 2024. С. 46–54. EDN: FNEFEW.

9. Лещенко А. П., Черных Ж. В., Зевахин В. Н. Обоснование необходимости совершенствования практических навыков и умений командира спасательного отряда при организации АСДНР // Совершенствование тактики действий спасательных воинских формирований МЧС России: сборник трудов XXXIII Международной научно-практической конференции. Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика, 2023. С. 28–34. EDN: WCMGJO.

10. Лещенко А. П., Малеван А. Ю., Раднер С. С. Обоснование предложений по совершенствованию подготовки личного состава аэромобильной группировки Уральского УЦ МЧС России // Совершенствование тактики действий спасательных воинских формирований МЧС России: сборник трудов XXXIII Международной научно-практической конференции. Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика, 2023. С. 35–40. EDN: VDHEFO.

References

1. *Voennyj entsiklopedicheskij slovar' raketnykh vojsk strategicheskogo naznacheniya* [Military Encyclopedic Dictionary of Strategic Missile Forces] / Pod red. I. D. Sergeeva, V. N. Yakovleva, N. E. Solovtsova [et al.]. Moscow: Min-vo oborony RF, 1999. 632 p.

2. Yashkova A. S., Volokho K. Y., Sidorova O. O. Analiz problemnoj situatsii v oblasti podgotovki spetsialistov v vuzakh MChS Rossii [Analysis of the problematic situation in the field of specialist training at universities of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. *Psikhologopedagogicheskie problemy stanovleniya lichnosti sotrudnika MChS Rossii i prepodavatelya OBZh: sbornik trudov XXIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Khimki: Akademiya grazhdanskoj zashchity MChS Rossii im. general-lejtenanta D. I. Mikhajlika, 2024. Pp. 114–120. EDN: NSDXKD.

3. Atamanchuk G. V. *Upravlenie – faktor razvitiya (razmysleniya ob upravlencheskoj*

deyatelnosti) [Management as a factor of development (reflections on managerial activity)]. Moscow: Academia, 2018. 520 p.

4. Atamanchuk G. V. *Teoriya gosudarstvennogo upravleniya: kurs lektsij* [Theory of public administration: a course of lectures]. Moscow: Academia, 2018. 496 p.

5. *Taktika dejstvij spasatel'noj rotы pri organizatsii i provedenii avarijno-spasatel'nykh i drugikh neotlozhnykh rabot: uchebnoye posobiye* [Tactics of actions of the rescue company in the organization and conduct of rescue and other urgent work: tutorial] / A. P. Leshchenko, D. I. Novoselov, A. Yu. Malevan [et al.]. Khimki: AGZ MChS Rossii, 2022. 145 p.

6. *Taktika dejstvij spasatel'nogo otryada pri organizatsii i provedenii avarijno-spasatel'nykh i drugikh neotlozhnykh rabot: uchebnoye posobiye* [Tactics of actions of the rescue squad in the organization and conduct of rescue and other urgent work: tutorial] / A. P. Leshchenko, D. I. Novoselov, N. V. Borodin [et al.]. Khimki: AGZ MChS Rossii, 2022. 168 p.

7. Nauchno-metodicheskie perspektivy obrazno-znakovogo modelirovaniya operativnoj obstanovki pri likvidatsii chrezvychajnykh situatsij spasatel'nymi voinskimi formirovaniyami MChS Rossii [Scientific and methodological perspectives of figurative and symbolic modeling of the operational situation in emergency response by rescue military units of the Ministry of Emergency Situations of Russia] / A. V. Bobariko, A. P. Leshchenko, D. I. Novoselov [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2023, vol. 4 (49), pp. 114–119. EDN: JELJMW.

8. Leshchenko A. P., Shagov G. G., Makarov A. I. Rekomendatsii po sovershenstvovaniyu metodiki provedeniya zanyatij po distsipline «Topografiya» [Recommendations for improving the methods of conducting classes in the discipline «Topography»]. *Sovershenstvovanie taktiki dejstvij spasatel'nykh voinskikh formirovanij MChS Rossii: sbornik trudov XXXIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Khimki: Akademiya grazhdanskoj zashchity MChS Rossii im. general-lejtenanta D. I. Mikhajlika, 2024. Pp. 46–54. EDN: FNEFEW.

9. Leshchenko A. P., Chernykh Zh. V., Zevakhin V. N. Obosnovanie neobkhodimosti sovershenstvovaniya prakticheskikh navykov i umenij komandira spasatel'nogo otryada pri organizatsii ASDNR [Substantiation of the need to improve the practical skills and abilities of the rescue squad commander in the organization of the ASDNR]. *Sovershenstvovanie taktiki dejstvij spasatel'nykh voinskikh formirovanij MChS Rossii: Sbornik trudov XXXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Khimki: Akademiya

grazhdanskoj zashchity MChS Rossii im. general-lejtenanta D. I. Mikhajlika, 2023. pp. 28–34. EDN: WCMGJO.

10. Leshchenko A. P., Malevan A. Y., Radner S. S. Obosnovanie predlozhenij po sovershenstvovaniyu podgotovki lichnogo sostava aeromobil'noj gruppirovki Ural'skogo USTs MChS Rossii [Substantiation of proposals for improving the training of personnel of the airmobile group of

the Ural USTS of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. *Sovershenstvovanie taktiki dejstvij spasatel'nykh vojskikh formirovanij MChS Rossii: sbornik trudov XXXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Khimki: Akademiya grazhdanskoj zashchity MChS Rossii im. general-lejtenanta D. I. Mikhajlika, 2023. Pp. 35–40. EDN: VDHEFO.

Бобарико Александр Викентьевич

ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»,
Российская Федерация, Московская область, г. Химки
кандидат военных наук, профессор
E-mail: a.bobariko@agz.50.mchs.gov.ru

Bobariko Alexander Vikentievich

Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia
Khimki, Moscow Region, Russian Federation
Candidate of Military Sciences, Professor
E-mail: a.bobariko@agz.50.mchs.gov.ru

Рожков Сергей Николаевич

ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»,
Российская Федерация, Московская область, г. Химки
кандидат экономических наук, профессор
E-mail: s.rozhkov@agz.50.mchs.gov.ru

Rozhkov Sergey Nikolaevich

Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia
Khimki, Moscow Region, Russian Federation
Candidate of Economic Sciences, Professor
E-mail: s.rozhkov@agz.50.mchs.gov.ru

Яшков Руслан Николаевич

ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»,
Российская Федерация, Московская область, г. Химки
кандидат военных наук, старший преподаватель
E-mail: r.yashkov@agz.50.mchs.gov.ru

Yashkov Ruslan Nikolaevich

Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia
Khimki, Moscow Region, Russian Federation
Candidate of Military Sciences, Senior Lecturer
E-mail: r.yashkov@agz.50.mchs.gov.ru

Москалев Дмитрий Анатольевич

ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»,
Российская Федерация, Московская область, г. Химки
старший преподаватель
E-mail: d.moskalev@agz.50.mchs.gov.ru

Moskalev Dmitry Anatolyevich

Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia
Khimki, Moscow Region, Russian Federation
Senior Lecturer
E-mail: d.moskalev@agz.50.mchs.gov.ru

Бородин Николай Валерьевич

ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»,

Российская Федерация, Московская область, г. Химки

старший преподаватель

E-mail: n.borodin@agz.50.mchs.gov.ru

Borodin Nikolay Valerievich

Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia

Khimki, Moscow Region, Russian Federation

Senior Lecturer

E-mail: n.borodin@agz.50.mchs.gov.ru

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ)
ECOLOGICAL SAFETY
(TECHNICAL AND CHEMICAL)**

УДК 628.316.13
DOI 10.48612/ntp/nth2-zuv2-emb2

**АДСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
ОТ АНИОННЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДА ЭНЕРГЕТИКИ**

Р. Я. ИСХАКОВА, А. И. САЛИМОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»,
Российская Федерация, Казань
Email: imreginaiskh@gmail.com, salimovajnur31@gmail.com

В статье рассмотрен процесс адсорбционной очистки сточных вод от анионных синтетических поверхностно-активных веществ в динамических условиях. В качестве сорбента предлагается использование материала, разработанного на основе отхода энергетики – карбонатном шламе, образующемся в процессе химической подготовки добавочной природной воды, обработанном связующим (парафином) и окатанном в гранулы. Проведены экспериментальные исследования по очистке водных сред на разработанных гранулах, определена динамическая и полная сорбционная емкость материала, по уравнению Н.А.Шилова рассчитан коэффициент защитного действия слоя, что позволяет масштабировать результаты лабораторных испытаний на промышленные адсорберы.

Особое внимание уделено оценке лимитирующей стадии процесса адсорбции. Установлено, что процесс адсорбции от анионных синтетических поверхностно-активных веществ на разработанном материале лимитируется внутренней диффузией. По результатам экспериментальных и теоретических исследований предложена технология доочистки сточных вод и аппаратурное оформление процесса адсорбции, позволяющее производить очистку сточных вод до нормативов допустимого сброса перед их спуском в водоем.

Предложенный подход, решающий двойную экологическую задачу: переработку и вторичное использование отходов, образующихся на предприятиях энергетики, и очистку сточных вод от анионных поверхностно-активных веществ, позволяет реализовать принципы ресурсосбережения, внедрить экозащитные технологии, направленные на сохранение окружающей природной среды и обеспечить экологическую безопасность населения.

Ключевые слова: отходы производства, очистка сточных вод, сорбционные материалы, поверхностно-активные вещества, лимитирующая стадия, адсорбция, экологически безопасная технология.

**ADSORPTION TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER FROM ANIONIC
SURFACTANTS UNDER DYNAMIC CONDITIONS USING ENERGY WASTE**

R. Ya. ISKHAKOVA, A. I. SALIMOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kazan State Power Engineering University»,
Russian Federation, Kazan
Email: imreginaiskh@gmail.com, salimovajnur31@gmail.com

This article considers the process of adsorption wastewater treatment from anionic synthetic surfactants under dynamic conditions. The proposed sorbent is a material developed using energy waste-carbonate sludge formed during the chemical treatment of natural water, treated with a binder (paraffin), and pelletized. Experimental studies of aqueous media purification using the developed granules were conducted, the dynamic and total sorption capacity of the material was determined, and allowing the scaling of laboratory test results to industrial adsorbers the protective action coefficient of the layer was calculated using N.A. Shilov's equation.

Particular attention is paid to assessing the rate-limiting stage of the adsorption process. It was found that the adsorption process from anionic synthetic surfactants on the developed material is limited by internal diffusion. Based on the results of experimental and theoretical studies, a wastewater post-treatment technology and adsorption process instrumentation have been proposed, enabling wastewater treatment to meet permissible discharge standards before discharge into a water body.

The proposed approach, which addresses the dual environmental challenges of recycling and reusing waste generated at energy facilities and removing anionic surfactants from wastewater, enables resource conservation principles to be implemented, eco-friendly technologies to be implemented, and environmental protection technologies to preserve the natural environment and ensure public safety.

Keywords: industrial waste, wastewater treatment, sorption materials, surfactants, rate-limiting stage, adsorption, environmentally friendly technology.

Введение

В настоящее время особую актуальность приобретают проблемы экологической безопасности и сохранения окружающей природной среды. Интенсивное развитие промышленности сопровождается большим количеством образующихся сточных вод, и, как следствие, возрастающим антропогенным воздействием на поверхностные водоемы. Негативное влияние на состояние гидросферы оказывают анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ), которые широко применяются в составе моющих средств, эмульгаторов, флотационных реагентов и смазочно-охлаждающих жидкостей и пр.

Поступая со сточными водами, АПАВ оказывают комплексное негативное воздействие: нарушают кислородный обмен, способствуют мобилизации труднорастворимых загрязнителей (нефтепродуктов, пестицидов и пр.) вследствие солюбилизирующего действия. Многие синтетические АПАВ обладают биологической резистентностью и способны накапливаться в экосистемах, проявляя токсический эффект [1].

Традиционные методы удаления АПАВ из сточных вод – коагуляция, пенная флотация и прочие не всегда обеспечивают требуемую степень очистки до нормативных значений, особенно при необходимости отведения вод в водоем, характеризуются высокими эксплуатационными затратами [2]. В связи с этим адсорбция является одним из наиболее целесообразных методов глубокой доочистки, позволяющих извлекать АПАВ.

Ключевой проблемой широкомасштабного применения адсорбционной очистки является высокая стоимость традиционных

сорбентов – активных углей, синтетических ионообменных смол и углеродных материалов, производство которых связано с высокими энергетическими и материальными затратами (термохимическая активация и пр.). По этой причине в настоящее время особый интерес вызывают сорбционные материалы, полученные на основе отходов производства и потребления.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время вопросами очистки сточных вод от АПАВ активно занимаются как отечественные, так и зарубежные научные школы. Наиболее часто для этих целей применяются различные физико-химические методы очистки. Например, в работе [3] предлагается использовать комбинированный процесс химической коагуляции-флокуляции/ультрафиолетового фотолиза для разделения и окислительного разложения линейного алкилбензолсульфоната (АПАВ) в сточных водах прачечных с целью их извлечения до нормативных значений. В качестве коагулянта-сорбента, комплексообразователя и катионного высокомолекулярного флокулянта выбраны минеральная зола, $ZnCl_2$ и Праестол-650 соответственно. Результаты показали, что максимальная эффективность удаления АПАВ составила 75 %. Для извлечения АПАВ также используется способ электрохимической очистки с предварительной обработкой промышленных сточных вод косметической промышленности флокулянтами с известью и сульфатом алюминия (квасцы) [4]. Применение флотации для очистки сточных вод от ПАВ с применением колонных флотационных аппаратов позволяет удалять загрязнения [5].

Одним из перспективных методов очистки сточных вод, используемых для удаления различных АПАВ, является адсорбция, которая обеспечивает более высокую эффективность по сравнению с другими методами [6]. Метод сорбционной очистки сточных вод от АПАВ основан на способности сорбционных материалов фиксировать загрязняющие компоненты из жидких сред [7]. Данный процесс по своей природе может относиться к физической адсорбции или хемосорбции молекул ПАВ на поверхности сорбента.

В работе [8] в качестве сорбционного материала АПАВ был использован дефекат, образующийся при производстве сахара на стадии очистки свекловичного сока. В состав дефеката входит до 75 % CaCO_3 , около 20 % органических примесей, а также инертные вещества. Установлено, что оптимальная масса добавки для извлечения АПАВ из раствора с исходной концентрацией 25 мг/дм³ составляет 4 г на 1 дм³ раствора; длительность перемешивания 15 мин при температуре 20 °С [9].

Проведено исследование [10] переработки косточек маслин и скорлупы грецких орехов в углеродные сорбенты. На основании результатов термогравиметрических исследова-

ний и элементного состава сырья выбрана оптимальная технология переработки и технологические параметры процесса карбонизации.

Таким образом, сорбционная очистка сточных вод от АПАВ на очистных сооружениях, особенно с использованием отходов производства, является перспективным решением.

Цель статьи

Разработка, научное обоснование, исследование кинетики с выявлением лимитирующей стадии адсорбционной очистки воды от АПАВ сорбционным материалом на основе шлама водоподготовительных установок тепловых электрических станций.

Материалы и методы исследования

В научном исследовании использовали методы физического моделирования. Экспериментальные исследования проводили с использованием отхода энергетики – шлама водоподготовительных установок тепловых электрических станций (ВПУ ТЭС) и связующего – парафина. Шлам ВПУ ТЭС представляет собой отход следующего химического состава (табл. 1.).

Таблица 1. Химический состав шлама ВПУ

Минеральная часть							
Катионы	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Fe^{3+}	Mn^{2+}	Zn^{2+}	Ni^{2+}	Cu^{2+}
%, масс.	66,12±0,32	17,15±0,18	0,72±0,02	0,81±0,13	0,07±0,001	0,043±0,003	0,064±0,001
Анионы	CO_3^{2-}		SiO_3^{2-}		OH^-		SO_4^{2-}
%, масс.	56,64±0,11		18,42±0,093		8,37±0,06		1,56±0,01
Органическая часть, 15 %							

Шлам ВПУ – отход энергетики V класса опасности. Гранулометрический состав представлен в основном фракцией 0,09–0,5 мм (более 61 %). Шлам ВПУ ТЭС представляет собой суспензию бурого цвета влажностью $W=60\%$.

В экспериментальных исследованиях производили предварительную осушку шлама до $W=3\%$. Далее шлам ВПУ ТЭС совместно со связующим направляли на гранулирование путем окатывания гранул диаметром 3-6 мм. Связующим компонентом выступал технический парафин в количестве 30 % масс. Для протекания адсорбции в динамических условиях гранулы заданного диаметра обеспечивают снижение перепада давления в аппарате, парафин способствует повышению гидрофобности поверхности шлама ВПУ и формированию на его поверхности мезопор.

Проведены лабораторные экспериментальные исследования в динамическом режиме в адсорбционной колонке диаметром 3 см и высотой 50 см. Колонку равномерно заполняли

сорбционным материалом на различные высоты загрузки (10; 15; 20; 25 см) до прекращения усадки. Через слой сорбционного материала непрерывно сверху вниз пропускали модельный раствор лаурил сульфата натрия (АПАВ) с концентрацией $C_0=3$ мг/дм³ со скоростью 0,16 м/мин, устанавливая перистальтическим насосом расход 110 см³/мин, до появления «проскока» в элюате и последовавшего далее выравнивания концентраций. Элюат собирали отдельными порциями, в каждой определяли содержание АПАВ экстракционно-фотометрическим методом с метиленовым синим.

Для обработки результатов измерений и вычисления погрешностей оценки измеряемой величины использован ГОСТ Р 8.736-2011.

Результаты исследования и их обсуждение

Адсорбционная очистка водных сред в динамических условиях. При адсорбционной доочистке сточных вод для сброса очищенных

вод в водоем в качестве нормативного значения использовали значение ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения – 0,1 мг/дм³. На рис. 1 представлен график зависимости изменения концентрации от объема пропущенного раствора. Динамическая сорбционная емкость

(ДСЕ) сорбционных гранул определялась по «проскоку» АПАВ на выходе раствора из колонки. Время, прошедшее с начала анализа до «проскока» поглощаемого иона, составило 21 ч 35 мин (21,6 ч).

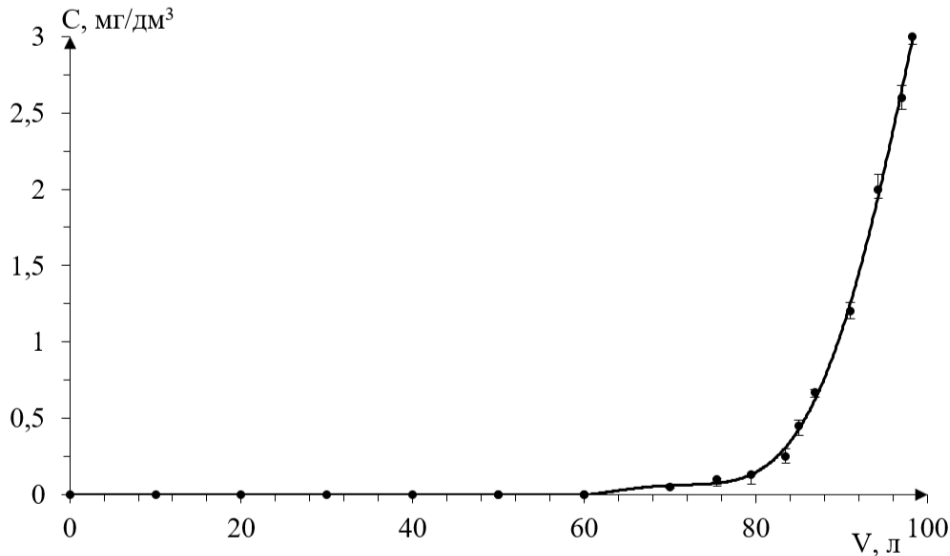


Рис. 1. График изменения концентрации АПАВ от пропущенного объема раствора

ДСЕ сорбционного материала определяется по формуле и составляет:

$$\text{ДСЕ} = \frac{C_0 \cdot V_{\text{пр}}}{m} = 5,91 \text{ мг/г} \quad (1)$$

До полного насыщения через колонку пропущено $V_{\text{полн}} = 222,3 \text{ дм}^3$. Полная динамическая сорбционная емкость (ПДСЕ) сорбционного материала определяется по формуле (2) и составляет:

$$\text{ПДСЕ} = \frac{C \cdot V_{\text{полн}}}{m} = 7,68 \text{ мг/г} \quad (2)$$

Проведен сравнительный анализ полученного значения ДСЕ со значениями ДСЕ различных отходов производства при адсорбции активированным углем в динамическом режиме (табл. 2) [11].

Полученное значение ДСЕ = 5,91 мг/г сравнимо с прочими отходами производства, которые используются в качестве сорбционных материалов.

Процесс динамической адсорбции в аппарате с неподвижным слоем характеризуется последовательным насыщением адсорбента по направлению движения жидкости. В слое формируется зона массопереноса (адсорбционный фронт), в которой наблюдается изменение концентрации адсорбируемого компонента от $C_0 = 3 \text{ мг/дм}^3$ до нулевого значения на выходе. По мере пропускания сточных вод происходит постепенное насыщение верхних слоев сорбционного материала до равновесной концентрации и смещение фронта адсорбции в последующий слой [12].

Таблица 2. Значения ДСЕ различных материалов [11]

Отход	ДСЕ, мг/г
Древесные опилки	0,79
Кокс коксохимического завода (Макеевка, ДНР)	1,49
Зольные алюмосиликатные микросферы (Старобешевская ТЭС)	3,60
Котельный шлак (Донецк)	11,33
Уголь активированный АГН	86,72

Для определения времени защитного действия слоя τ как основной расчетной характеристики адсорбента использовали уравнение Н. А. Шилова для инженерных расчетов:

$$\tau = KN - \tau_0, \quad (3)$$

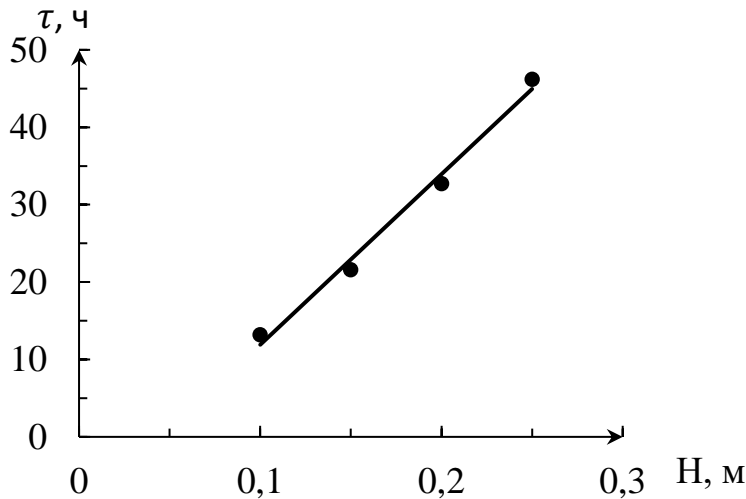


Рис. 2. Зависимость изменения защитного действия слоя адсорбента от высоты загрузки

По рис. 2 определяется коэффициент защитного действия как $K = tg\alpha$ и τ_0 . Значение коэффициента защитного действия составила 220,2 ч/м; потеря времени защитного действия – 10,11 ч.

Оценка лимитирующей стадии процесса адсорбции. Сорбционная очистка является многостадийным процессом, для оценки лимитирующей стадии процесса используются диффузионные модели, позволяющие оценить вклад внешней и внутренней диффузии.

Для оценки лимитирующей стадии использована диффузионная модель Бойда [13]. При преобладании внутридиффузионного лимитирования в соответствии с моделью для определения коэффициентов диффузии внутри зерна сорбента используется уравнение Бойда-Адамсона:

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-Dn^2\pi^2 t/r_0^2}, \quad (4)$$

где F – доля равновесной сорбции, достигнутая к моменту времени t , определяемая по формуле $F = A_t/A$, где A_t , A – сорбционная емкость в момент времени t и в состоянии равновесия, ммоль/г; n – количество извлекаемых веществ; B – кинетический коэффициент, c^{-1} , который

где K – коэффициент защитного действия; H – высота загрузки ШМП, м; τ_0 – потеря времени защитного действия, ч.

На рис.2 представлен график зависимости защитного действия слоя адсорбента τ от высоты загрузки сорбционного материала.

определяется по уравнению $B = D\pi^2/r_0^2$, где D – коэффициент внутренней диффузии, cm^2/c ; r_0^2 – радиус зерна сорбционного материала, см; Bt – безразмерный параметр, предложенный Бойдом, который представляет решение задачи диффузии в твердом теле определенной формы. После подстановки B и преобразований получена формула:

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 Bt}. \quad (5)$$

По экспериментально найденным значениям доли равновесной сорбции F определяются значения безразмерного параметра Bt . На рис. 3 представлена зависимость $Bt = f(t)$.

Линейность зависимости Bt от t (рис. 3) с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,9792$) является признаком внутридиффузионного лимитирования.

Расчет коэффициентов внутренней диффузии проводится на основе экспериментальных кинетических зависимостей по формуле:

$$D = \frac{Br_0^2}{\pi^2}. \quad (6)$$

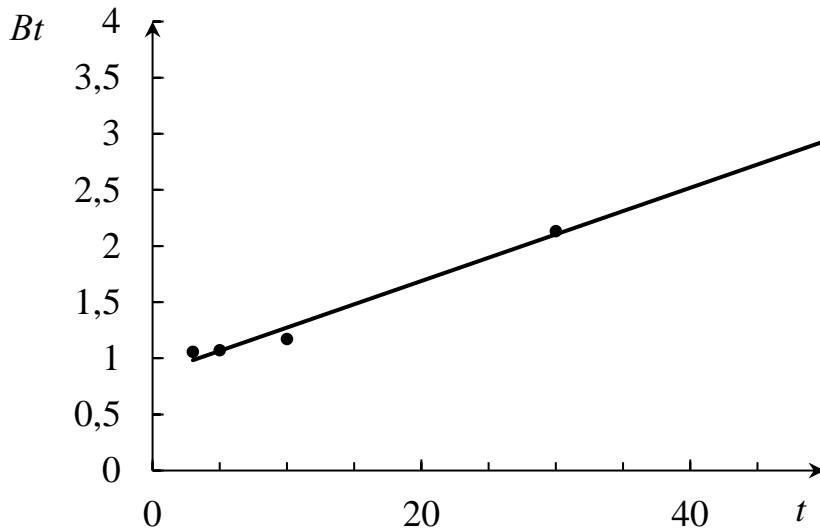


Рис. 3. Зависимость $Bt = f(t)$ при сорбции

Эффективные коэффициенты диффузии учитывают как диффузионные ограничения переноса молекул в системе сорбент-сорбат, так и влияние сопутствующих процессов (набухание сорбента и пр.) и определяются с учетом порозности. Коэффициент массопроводности находили по диффузионному критерию Фурье (безразмерное время) [14]:

$$F_0 = \frac{Kt}{r_0^2}, \quad (7)$$

с учетом формулы (8)

$$I = -K \frac{dc}{dx}; \frac{dc}{dx} = K \frac{d^2c}{dx^2}, \quad (8)$$

где I – поток диффундирующего в направлении x вещества; t – длительность контакта образца с диффундирующим веществом; C – концентрация диффундирующего вещества в единице объема или массы образца. С учетом (7) и (8) определяется коэффициент массопроводности.

Рассчитанные коэффициенты эффективной диффузии и массопроводности в разный момент времени адсорбции представлены в табл. 3.

Для уточнения механизма проведена оценка механизма диффузии по диффузионному критерию Био [14], который представляет собой отношение внутреннего сопротивления массопереносу (в структуре гранулы) к внешнему (из потока к поверхности гранулы):

$$Bi = \frac{\beta \cdot r_0^2}{K}, \quad (9)$$

где K – коэффициент массопроводности, m^2/c ; β – коэффициент массоотдачи, c^1 .

По расчетному значению диффузионного критерия Био определяется лимитирующая стадия процесса [15]. При $Bi \geq 30$ общая скорость массопередачи определяется внутренней диффузией (внутридиффузионный процесс). В случае, если $Bi \leq 0,1$ процесс является внешнедиффузионным. Расчетные значения критерия Био $Bi \geq 588$, следовательно, процесс является внутридиффузионным.

Технологическая схема адсорбционной доочистки сточных вод. Для полной доочистки сточных вод от АСПАВ разработан узел адсорбционной доочистки (рис. 4), включающий адсорбционные колонны.

Таблица 3. Значения коэффициентов эффективной диффузии и массопроводности в разный момент времени адсорбции

t, c	180	300	600	1800
$D_э, m^2/c$	$1,91 \cdot 10^{-10}$	$4,34 \cdot 10^{-11}$	$1,18 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$
$K, m^2/c$	$5,2 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$5,19 \cdot 10^{-12}$	$1,05 \cdot 10^{-12}$

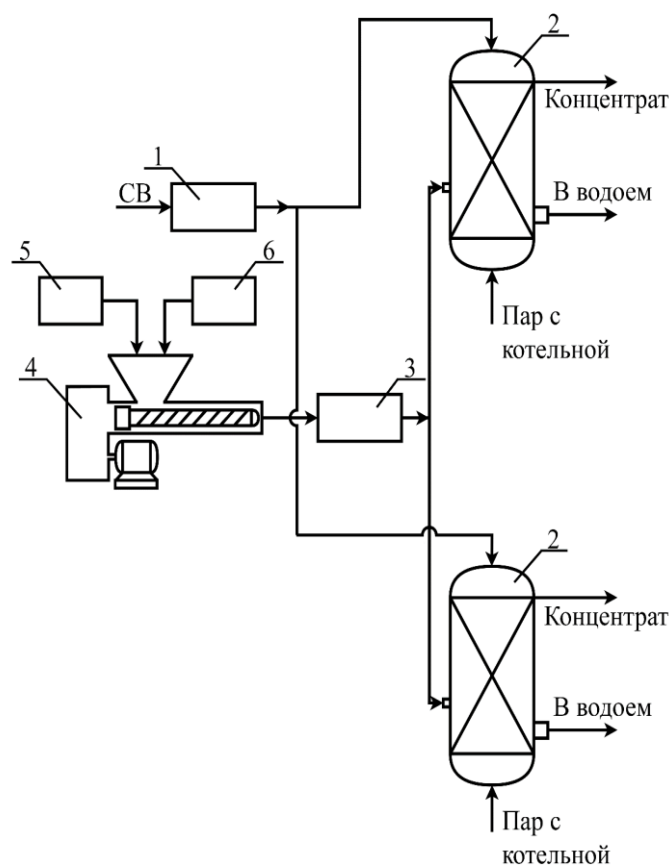


Рис. 4. Адсорбционный узел доочистки сточных вод от АПАВ

1 – приемная емкость сточных вод;
 2 – адсорбер; 3 – бункер хранения сорбционного материала; 4 – экструдер;
 5 – ленточная сушилка;
 6 – бункер подготовки связующего

Сточные воды поступают в емкость 1, из которой насосами подаются в адсорбер 2, загруженный сорбционным материалом. Для формирования гранул используется шлам ВПУ, поступающий из шламонакопителя на ленточную сушилку 5 и парафин из бункера 6, которые подаются на экструдер 4. После формирования гранулы поступают в бункер хранения 3, а затем загружаются в адсорбер 2 с неподвижной загрузкой непрерывного действия, где реализуется адсорбционная очистка сточных вод. Далее очищенные воды могут отводиться на сброс в водоем.

Для обеспечения бесперебойной работы узла адсорбционной доочистки необходимо установить 2 параллельно работающих и 1 резервный адсорбер (на время регенерации сорбционного материала в адсорберах).

При выключении адсорбера на регенерацию происходит пропаривание сорбционного материала паром, производимым котельной. Загрязненный АПАВ концентрат может быть использован на нужды предприятия или смежных отраслей промышленности.

Выводы

Для доочистки сточных вод от АПАВ при невысокой загрязненности предлагается использовать адсорбционную очистку в адсор-

бере, загруженном гранулами сорбционного материала на основе отхода энергетики. Очистка в адсорберах позволит проводить обезвреживание сточных вод от АСПАВ до нормативных значений ПДК для их дальнейшего отведения в водоем.

Исследована и экспериментально подтверждена возможность доочистки сточных вод от АПАВ (при концентрации ≤ 3 мг/дм³) при пропуске сточных вод через неподвижный слой сорбционного материала, динамическая сорбционная емкость которого составляет 5,91 мг/г; полная динамическая сорбционная емкость – 7,68 мг/г; коэффициент защитного действия – 220,2 ч/м; потеря времени защитного действия – 10,11 ч.

Проведена оценка лимитирующей стадии процесса адсорбции, которая свидетельствует о преобладании внутридиффузионного лимитирования. На основании полученных результатов разработан узел адсорбционной доочистки сточных вод, включающий адсорбционные колонны.

Разработанный научно-обоснованный подход и технологические решения адсорбционной очистки сточных вод обеспечивает повышение экологической безопасности при использовании отхода энергетики в качестве вторичного материального ресурса.

Список литературы

1. Шачнева Е. Ю. Поверхностно-активные вещества в объектах окружающей среды. М.: Lambert Academic Publishing, 2013. 64 с.
2. Palmer M., Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review. *Water Research*, 2018, vol. 147, pp. 60–72.
3. Combined chemical coagulation–flocculation/ultraviolet photolysis treatment for anionic surfactants in laundry wastewater / E. L. Terechova, G. Zhang, J. Chen [et al.]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, vol. 2, issue 4, pp. 2111–2119.
4. Aloui F., Kchaou S., Sayadi S. Physicochemical treatments of anionic surfactants wastewater: Effect on aerobic biodegradability. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 164, issue 1, pp. 353–359.
5. Очистка сточных вод предприятий пищевой промышленности от поверхностно-активных веществ и жиров флотацией / Б. С. Ксенофонтов, А. С. Козодаев, Р. А. Таранов [и др.] // *Экология и промышленность России*. 2013. № 11. С. 4–7.
6. Шумяцкий Ю. И. Адсорбционные процессы. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. 164 с.
7. Дударев В. И., Иринчинова Н. В., Филатова Е. Г. Адсорбция ионов никеля (II) из водных растворов углеродными адсорбентами // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. № 1. С. 75–81.
8. Сорбционное извлечение лаурилсульфата натрия из водных сред с помощью отхода сахарной промышленности / Ж. А. Сапронова, Р. О. Фетисов, И. Г. Шайхиев [и др.] // *Вестник Казанского государственного технологического университета*. 2014. Т. 17. № 3. С. 163–165.
9. Фетисов Р. О. Сорбционная очистка сточных вод от СПАВ отходом производства сахарной промышленности – сатурационным осадком: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.02.08. Уфа, 2015. 20 с.
10. Передерий М. А. Получение углеродных сорбентов из некоторых видов биомассы // *Химия твердого топлива*. 2008. № 4. С. 30–36.
11. Соловьева Е. А., Бабенко А. С. Очистка городских сточных вод, обработка и биологическая трансформация осадка: монография. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 140 с.
12. Короткова Т. Г., Бушумов С. А. Кинетические кривые сорбции нефтепродуктов прокаленным сорбентом из золошлаковых отходов энергетики // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023. Т. 13, № 1. С. 142–151.

13. Маслова М. В., Евстропова П. Е. Кинетика сорбции катионов кадмия и кобальта сорбентом на основе фосфата титана // *Журнал физической химии*. 2021. Т. 95, № 10. С. 1585–1590.

14. Глазков С. С. Адсорбционные процессы в условиях изотермической пропитки древесины растворами олигомеров // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2008. Т. 8, вып. 3. С. 454–464.

15. Обливин А. Н., Прокофьев Н. С., Воскресенский А. К. Процессы и аппараты производства древесных плит и пластиков. М.: Экология, 1991. 448 с.

References

1. Shachneva E. Yu. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva v ob'ektakh okruzhayushchey sredy* [Surfactants in environmental objects]. Moscow: Lambert Academic Publishing, 2013. 64 p.
2. Palmer M., Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review. *Water Research*, 2018, vol. 147, pp. 60–72.
3. Combined chemical coagulation–flocculation/ultraviolet photolysis treatment for anionic surfactants in laundry wastewater / E. L. Terechova, G. Zhang, J. Chen [et al.]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, vol. 2, issue 4, pp. 2111–2119.
4. Aloui F., Kchaou S., Sayadi S. Physicochemical treatments of anionic surfactants wastewater: Effect on aerobic biodegradability. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 164, issue 1, pp. 353–359.
5. Ochistka stochnykh vod predpriyatij pishchevoy promyshlennosti ot poverkhnostno-aktivnykh veshchestv i zhirov flotatsiyey [Wastewater treatment of food industry enterprises from surfactants and fats by flotation] / B. S. Ksenofontov, A. S. Kozodaev, R. A. Taranov [et al.]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2013, issue 11, pp. 4–7.
6. Shumyatskiy Yu. I. *Adsorbtsionnye protsessy* [Adsorption processes]. Moscow: RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2005. 164 p.
7. Dudarev V. I., Irinchinova N. V., Filatova E. G. Adsorbtsiya ionov nikelya (II) iz vodnykh rastvorov uglerodnymi adsorbentami [Adsorption of nickel (II) ions from aqueous solutions by carbon adsorbents]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2017, vol. 60, issue 1, pp. 75–81.
8. Sorbtsionnoe izvlechenie lauril sulfata natriya iz vodnykh sred s pomoshch'yu otkhoda sakharnoy promyshlennosti [Sorption extraction of sodium lauryl sulfate from aqueous media using sugar industry waste] / Zh. A. Saponova,

R. O. Fetisov, I. G. Shaykhiev [et al.]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, issue 3, pp. 163–165.

9. Fetisov R. O. Sorbtionnaya ochildka stochnykh vod ot SPAV otkhodom proizvodstva sakharnoy promyshlennosti – saturatsionnym osadkom. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Sorption wastewater treatment from surfactants by waste of sugar industry – saturator precipitate. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Ufa, 2015. 20 p.

10. Perederiy M. A. Poluchenie uglerodnykh sorbentov iz nekotorykh vidov biomassy [Obtaining carbon sorbents from some types of biomass]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2008, issue 4, pp. 30–36.

11. Solov'eva E. A., Babenko A. S. *Ochildka gorodskikh stochnykh vod, obrabotka i biologicheskaya transformatsiya osadka: monografiya* [Municipal wastewater treatment, processing and biological transformation of sludge: monograph]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2019. 140 p.

12. Korotkova T. G., Bushumov S. A. Kineticheskie krivye sorbtzii nefteproduktov

prokalennym sorbentom iz zoloshlakovykh otkhodov energetiki [Kinetic curves of oil product sorption by calcined sorbent from ash and slag waste of power engineering]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2023, vol. 13, issue 1, pp. 142–151.

13. Maslova M. V., Evstropova P. E. Kinetika sorbtzii kationov kadmiya i kobal'ta sorbentom na osnove fosfata titana [Kinetics of sorption of cadmium and cobalt cations by titanium phosphate based sorbent]. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2021, vol. 95, issue 10, pp. 1585–1590.

14. Glazkov S. S. Adsorbtsionnye protsessy v usloviyakh izotermicheskoy propitki drevesiny rastvorami oligomerov [Adsorption processes under conditions of isothermal impregnation of wood with oligomer solutions]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2008, vol. 8, issue 3, pp. 454–464.

15. Oblivin A. N., Prokof'ev N. S., Voskresenskiy A. K. *Protsessy i apparaty proizvodstva drevesnykh plit i plastikov* [Processes and equipment for the production of wood boards and plastics]. Moscow: Ekologiya, 1991. 448 p.

Исхакова Регина Яновна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,

Российская Федерация, Казань

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда»,

E-mail: imreginaiskh@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0339-9849

Iskhakova Regina Yanovna

Federal state budgetary educational institution of higher education

«Kazan state power engineering university»,

Russian Federation, Kazan.

candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department

of «Engineering ecology and labor safety»,

E-mail: imreginaiskh@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0339-9849

Салимов Айнур Ильясович

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Российская Федерация, Казань

магистрант

E-mail: salimovajnur31@gmai.com

Salimov Aynur Ilyasovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Kazan State Power Engineering University»

Russian Federation, Kazan

masters student

E-mail: salimovajnur31@gmai.com

УДК 504.054

DOI 10.48612/ntp/59mr-8zgt-e4n9

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ПРИМЕНЕНИЯ ХЛОРНЫХ РЕАГЕНТОВ В ВОДОПОДГОТОВКЕ

Д. А. КОЗЫРЬ¹, Д. А. МАКЕЕВА²

¹Севастопольский государственный университет,
Российская Федерация, г. Севастополь

²Российский государственный университет нефти и газа
(научно-исследовательский университет) имени И. М. Губкина,
Российская Федерация, г. Москва

E-mail: kozurdmitrii@mail.ru, daria.makejeva@mail.ru

В условиях потенциальных чрезвычайных ситуаций и современных требований по снижению экологических рисков для населения требуется выбор наиболее безопасного и эффективного реагента для обеззараживания воды. В статье представлены результаты оценки рисков применения двух реагентов для обеззараживания воды – гипохлорита натрия и диоксида хлора. Анализ проведён с применением реестра и матрицы рисков по таким категориям, как обращение с реагентом, влияние на здоровье персонала, опасность при чрезвычайных ситуациях и вредоносность после очистки воды.

Установлено, что доля событий с критическими последствиями и высокой/очень высокой вероятностью для гипохлорита натрия составляет 21 %, для диоксида хлора – 29 %. Гипохлорит натрия предпочтительнее с точки зрения логистики и эксплуатационной простоты (готовый реагент, не требующий синтеза на месте), однако его применение связано с риском образования канцерогенных веществ. Исследования водопроводной воды выявили повышенное содержание остаточного активного хлора, тем не менее расчётный канцерогенный и неканцерогенный риск для здоровья населения соответствуют низкому уровню.

Для снижения содержания остаточного хлора и тригалогенметанов рекомендуется применять при обеззараживании комбинацию гипохлорита натрия с ультрафиолетовым излучением. Такой подход, соответствующий наилучшим доступным технологиям, снижает расход реагента, обеспечивает пролонгированный эффект обеззараживания и уменьшает образование хлорорганических соединений.

Ключевые слова: экологический риск, обеззараживание воды, гипохлорит натрия, диоксид хлора, канцерогенный риск, остаточный активный хлор.

ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL RISK OF USING CHLORINE REAGENTS IN WATER TREATMENT

D. A. KOZYR¹, D. A. MAKEEVA²

¹ Sevastopol State University,
Russian Federation, Sevastopol

² Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Research University),
Russian Federation, Moscow

E-mail: kozurdmitrii@mail.ru, daria.makejeva@mail.ru

Potential emergencies and current requirements to reduce environmental risks to the population require the selection of the safest and most effective water disinfectant. This article presents the results of a risk assessment for the use of two water disinfectant reagents—sodium hypochlorite and chlorine dioxide. The analysis was conducted using a risk register and matrix for categories such as reagent handling, personnel health impacts, hazards in emergencies, and harmfulness after water treatment.

It was found that the proportion of events with critical consequences and high/very high probability is 21 % for sodium hypochlorite and 29 % for chlorine dioxide. Sodium hypochlorite is preferable from a logistical and operational standpoint (it is a ready-made reagent that does not require on-site synthesis); however, its use is associated with the risk of forming carcinogens. Tap water tests revealed elevated levels of residual active chlorine; however, the estimated carcinogenic and non-carcinogenic risks to public health are low.

To reduce residual chlorine and trihalomethanes, a combination of sodium hypochlorite and ultraviolet radiation is recommended for disinfection. This approach, consistent with best available technologies, reduces reagent consumption, provides a prolonged disinfection effect, and reduces the formation of organochlorine compounds.

Keywords: environmental risk, water disinfection, sodium hypochlorite, chlorine dioxide, carcinogenic risk, residual active chlorine.

Введение

Обеззараживание питьевой воды является обязательным этапом водоподготовки, направленным на предотвращение распространения инфекционных заболеваний. Хлорирование (использование газообразного хлора, хлорной извести, диоксида хлора и гипохлорита натрия), благодаря своей эффективности, пролонгированному действию и экономичности, остается наиболее распространенным методом обеззараживания воды в мире [1].

Применение хлора сопряжено с рядом рисков – это экологические риски, связанные с образованием и попаданием в окружающую среду побочных продуктов дезинфекции, а также риски техногенного характера, обусловленные хранением и транспортировкой больших объемов токсичного хлора. Хлор, взаимодействуя с природными органическими веществами, содержащимися в воде, образует галогенсодержащие соединения. Эти соединения являются ксенобиотиками, то есть чужеродными для живых организмов, и эволюционно выработанные механизмы защиты от них отсутствуют. Хлорирование с дехлорированием лишено этого недостатка, но его стоимость высока.

Оценка остаточной токсичности является критически важным параметром для определения безопасности процессов водоподготовки. Образование хлорсодержащих, бромсодержащих, йодсодержащих и азотсодержащих побочных продуктов дезинфекции, а также оксианионов хлора и других токсичных побочных продуктов существенно влияет на токсикологические показатели воды, очищенной с помощью окислителей на основе хлора. На химические и биологические свойства этих побочных продуктов влияют природа загрязняющего вещества, доза окислителя на основе хлора, химический состав сточной воды, время контакта и pH раствора [2].

Проблема усугубляется тем, что хлор в остаточных концентрациях может оказывать стимулирующее влияние на некоторые водные патогены, способствуя их персистенции в водной среде. При определенных концентрациях и времени воздействия дезинфектанты не убивают, а стимулируют бактерии [3]. Воздействие остаточного хлора приводит к необратимым

изменениям в составе генов устойчивости к антибиотикам. Хлор способствует коселекции – выживанию бактерий, которые устойчивы и к хлору, и к антибиотикам [4]. Сброс хлорированных сточных вод влияет на водные объекты – они снижают разнообразие микробных сообществ в речном перифитоне [5].

Процесс окисления диоксидом хлора приводит преимущественно к формированию нестабильных продуктов трансформации. При этом деструкция природных органических веществ под действием данного реагента сопровождается генерацией существенных объемов биоразлагаемых органических соединений, в частности альдегидов и карбоновых кислот. Наличие данных субстратов создает предпосылки для вторичного микробного роста, что представляет собой серьезный риск для сохранения качества воды на этапах ее длительного транзита по трубопроводам [6]. Использование диоксида хлора приводит к образованию нежелательных токсичных побочных продуктов, таких как хлорит (ClO_2^-) – загрязняющее вещество, которое представляет огромную опасность из-за того, что снижает количество эритроцитов в крови человека [7]. К недостаткам с использованием диоксида хлора относятся: низкая химическая стабильность ClO_2 , поскольку он разлагается на Cl_2 и O_2 под воздействием инсоляции или тепла, а также невозможность его хранения в коммерческих целях из-за высокого риска взрыва при концентрации в воздухе выше 10 % [8].

Использование физических способов очистки воды от патогенов гарантирует её вирусную и паразитарную безопасность, а также исключает образование опасных хлорорганических веществ. Тем не менее, эффективность данных методов напрямую связана со степенью прозрачности жидкости, а при малых дозах ультрафиолета возможна реактивация микроорганизмов. Если микробная обсеменённость превышает 1000 клеток, ультрафиолетовое облучение следует дополнять химическими реагентами. Кроме того, при определённой мощности УФ-излучения существует вероятность трансформации химических соединений в воде с образованием токсичных и мутагенных продуктов [9, 10].

Применение озона для предварительной обработки природных вод сопряжено с серьезными рисками. Взаимодействие озона с растворенными органическими веществами инициирует образование токсичных соединений, зачастую более опасных, чем продукты хлорирования. В дополнение к этому, недостаточная эффективность озонирования в отношении некоторых микроорганизмов не исключает развития биокоррозии и накопления в воде канцерогенных структур, производных от исходного органического субстрата [11, 12]. С точки зрения эксплуатационной безопасности, озон характеризуется более высокой токсичностью по сравнению с хлором, интенсифицирует коррозионные процессы в оборудовании и является взрывоопасным веществом. Применение данного реагента требует привлечения высококвалифицированного персонала и реализации дополнительных мер по защите обслуживающего персонала и предупреждению аварийных ситуаций [13].

В настоящее время активно исследуются технологические решения для предотвращения образования хлорорганических соединений. Одним из таких методов является совместное использование свободного хлора и ультрафиолетового излучения.

Сочетание свободного хлора и ультрафиолетового излучения приводит к образованию высокореактивных частиц, которые способны удалять из воды широкий спектр загрязняющих веществ и потенциально снижать образование диоксинов по сравнению с использованием только свободного хлора [14, 15].

Помимо химической опасности дезинфектантов, существует значительный экологический риск, связанный с использованием жидкого (газообразного) хлора как опасного химического вещества. Транспортировка многотонных запасов хлора через населенные пункты и их хранение на станциях создают угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций с выбросом токсичного газа. Для обеспечения техногенной и экологической безопасности возможна замена жидкого хлора на альтернативные обеззараживающие агенты, в частности, на гипохлорит натрия [1].

Цель исследования: оценка экологического риска применения хлорных реагентов для повышения эффективности и безопасности водоподготовки.

Материалы

и методы исследования

Объект исследования – экологические риски при хлорировании воды. Оценка экологического риска выполнялась в соответствии с ГОСТ Р 51901.22-2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения»¹, ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска»². Характеристика риска для здоровья населения выполнена в соответствии с Р 2.1.10.3968-23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания»³. Для оценки экологических рисков при обеззараживании хлором были выполнены экспериментальные исследования содержания остаточного хлора в водопроводной воде йодометрическим методом.

Результаты исследования

На основании ГОСТ Р 51901.22-2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения» проведена оценка рисков для реагентного хозяйства на основе гипохлорита натрия (ГХН) и диоксида хлора (ДХ). Исходные реагенты различаются по способу поступления: электролитический ГХН доставляется в виде готового водного раствора, а ДХ синтезируется на станции водоподготовки в реакторе при смешивании NaClO_2 и HCl . В рамках работы составлен реестр из 14 рисков, которые возможны при эксплуатации очистных сооружений. Анализ проводился по следующим категориям рисков:

1. Обращение с реагентом и применение (хранение реагента на станции водочистки, перевозка реагента до станции водочистки, добавление реактива в воду).

2. Влияние реагента на здоровье сотрудников на предприятии (попадание реагента через дыхательные пути, попадание реагента на кожу сотрудников, попадание реактива на слизистую, попадание реактива в организм при приеме пищи).

3. Опасность хранения реактива при чрезвычайной ситуации (ЧС) (в случае пожара, в случае наводнения, в случае землетрясения, в случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента).

4. Вредоносность реактива после очистки воды (в случае не контролируемой передозировки реагента, при регулярном употреблении воды очищенной реагентом,

¹ ГОСТ Р 51901.22-2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения. Введ. 2013-09-01. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

² ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. Введ. 2020-04-01. М.: Стандартинформ, 2019. 52 с.

³ Р 2.1.10.3968-23. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания: утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. М., 2023.

вероятность канцерогенного эффекта в период употребления воды с реагентом).

В работе применялась матричная оценка риска. Каждому опасному событию присваивался балл вероятности (P) – от 1 балла (низкая) до 5 баллов (очень высокая), а также балл последствий (W) – от 1 балла (несущественные последствия) до 5 баллов (критический ущерб). Итоговое значение риска (R) рассчитывалось как произведение полученных баллов [16].

Реестры рисков, с событиями, имеющими наибольший риск представлены в табл. 1, 2.

Полученные результаты оценки рисков при обеззараживании воды ГХН и ДХ представлены в виде матрицы рисков (ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска») (рис. 1, 2).

Для оценки экологических рисков при обеззараживании хлором были выполнены экспериментальные исследования содержания остаточного хлора в водопроводной воде йодометрическим методом. Метод основан на взаимодействии остаточного хлора с иодидом калия. В качестве материала для исследования использовалась вода, взятая из водопровода северной стороны г. Севастополя. Обеззараживание осуществлялось гипохлоритом натрия. В результате экспериментальных исследований установлено, что концентрация остаточного хлора в водопроводной воде составляла 2,6 мг/л и превышает ПДК. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, остаточный связанный хлор в питьевой воде должен находиться в пределах 0,8–1,2 мг/л ⁴.

Таблица 1. Реестр рисков с высокой вероятностью реализации и ущерба при применении гипохлорита натрия (ГХН)

№ риска	Группа типов риска	Наименование опасного события (риска)	Описание опасного события (риска)	P, баллы	W, баллы	R
5	Влияние на здоровье сотрудников на предприятии	Попадание реагента на кожу сотрудников	Контакт возможен при обслуживании насосов, замене уплотнений, отборе проб	3	5	15
11	Опасность хранения реактива при ЧС	В случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента	Есть вероятность разгерметизации и пролива ГХН	4	5	20
12	Вредоносность реактива после очистки воды	Вероятность канцерогенного эффекта в период употребления воды с реагентом	При обеззараживании воды хлором возможно превышение допустимых нормативов по содержанию тригалогенметанов, которые относятся к группе канцерогенных веществ.	4	5	20

Таблица 2. Реестр рисков с высокой вероятностью реализации и ущерба при применении диоксида хлора (ДХ)

№ риска	Группа типов риска	Наименование опасного события (риска)	Описание опасного события (риска)	P, баллы	W, баллы	R
4	Влияние реагента на здоровье сотрудников на предприятии	Попадание реагента через дыхательные пути	Утечка аэрозоля HCl	3	5	15
5		Попадание реагента на кожу сотрудников	Возможны проливы при подсоединении шлангов, при снятии манометров	4	5	20
8	Опасность хранения реактива при ЧС	В случае пожара	При пожаре окислитель (NaClO ₂) будет поддерживать горение, разлагаясь с выделением токсичного хлора и тепла.	3	5	15

⁴ СанПиН 1.2.3685-21: Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания:

утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2. М., 2021. 470 с.

№ риска	Группа типов риска	Наименование опасного события (риска)	Описание опасного события (риска)	P, баллы	W, баллы	R
11		В случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента	Одновременная разгерметизация всех емкостей, смешение реагентов с образованием взрывоопасного диоксида хлора прямо в воздухе	4	5	20

Вероятность	Очень высокая					
	Высокая					11, 12
	Средняя		4	2, 13	10	5
	Низкая	11	1, 6	7		
	Очень низкая	14	3	8, 9		
		несущественные	малосущественные	существенные	значительные	критические
Последствия/Ущерб						

Рис. 1. Матрица рисков при обращении с реагентом ГХН (1–14 – опасные события в соответствии с реестром риска)

Прогнозирование содержания тригалогенметанов (хлороформ, дибромхлорметан и дихлорбромметан) в водопроводной воде выполнялось с помощью регрессионных моделей. В этих моделях расчётная концентрация тригалогенметанов (Y) зависит от экспериментально определённого количества остаточного свободного хлора (X) [17]:

$$Y(\text{хлороформ}) = 0,023445 + 0,019443 \cdot \log(X),$$

$$Y(\text{дибромхлорметан}) = 0,033443 + 0,051431 \cdot \log(X),$$

$$Y(\text{дихлорбромметан}) = 0,024353 + 0,027236 \cdot \log(X).$$

В соответствии с Р 2.1.10.3968-23 «Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания», выполнен расчёт риска развития неканцерогенных и канцерогенных эффектов. Результаты расчёта риска представлены в табл. 3.

Вероятность	Очень высокая					
	Высокая					5, 11
	Средняя			6	13	4, 8
	Низкая		3	2	12	1, 10
	Очень низкая		14		7	9
		несущественные	малосущественные	существенные	значительные	критические
Последствия/Ущерб						

Рис. 2. Матрица рисков при обращении с реагентом ДХ (1 – 14 – опасные события в соответствии с реестром риска)

Таблица 3. Результаты расчета риска

Показатель	Остаточный хлор	Хлороформ (CHCl ₃)	Дибромхлорметан (CНBr ₂ Cl)	Бромдихлорметан (CНBrCl ₂)
Потенциальная доза поступления вещества, мг/кг-день	0,0712	0,00037	0,000643	0,000419
Коэффициент опасности развития неканцерогенных эффектов (HQ)	0,712	0,037	–	–
Индивидуальный пожизненный канцерогенный риск (CR)	–	0,0000023	0,000054	0,000026

Обсуждение

В ходе исследований установлено, что вероятность опасных событий при обращении с ГХН низкая, последствия существенные. ГХН хранится в специальных резервуарах, оснащенных ваннами в случае разлива, перевозится в специально оборудованной цистерне для химических реактивов и подается через насосы дозаторы в емкости с водой (опасные события 1-3). Вероятность влияния реагента на здоровье сотрудников на предприятии при обслуживании насосов, замене уплотнений, отборе проб – средняя, т.к. возможно попадание реагента на кожу сотрудников (опасное событие 5). В случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента есть высокая вероятность разгерметизации и пролива ГХН, при этом последствия будут критические (опасное событие 11). Вероятность канцерогенного эффекта в период употребления воды с реагентом высокая, последствия критические (опасное событие 12).

Опасные события со средней вероятностью и критическими последствиями возникают при обращении с реагентами ДХ, а также при ЧС (воздействие аэрозоля HCl на сотрудников при утечке (опасные события 4, 8). В случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента есть высокая вероятность разгерметизации емкостей, смешения реагентов с образованием взрывоопасного диоксида хлора прямо в воздухе, что приведёт к критическим последствиям (опасное событие 5). Высокой вероятностью и критическими последствиями также характеризуются возможные проливы реагентов при подсоединении шлангов, при снятии манометров (опасное событие 11). Низкой вероятностью и критическими последствиями характеризуется нарушение режима обработки воды с образованием побочных продуктов (хлориты, хлораты) (опасное событие 14).

События, которые приведут к критическим последствиям, а также характеризуются

высокой и очень высокой вероятностью при использовании ГХН составляют 21 % и при использовании ДХ составляют 29 % от общего числа проанализированных событий.

Гипохлорит натрия лучше, чем диоксид хлора в логистике и эксплуатационной простоте – это один готовый реагент, который не требует сложного оборудования для синтеза на месте. Однако он образует канцерогенные вещества.

В ходе исследований определено высокое содержание остаточного активного хлора в водопроводной воде при её обеззараживании ГХН на очистных сооружениях. Проанализировав полученные данные установлено, что коэффициент опасности развития неканцерогенных эффектов остаточного хлора и хлороформа соответствует низкому уровню риска. Индивидуальные пожизненные канцерогенные риски хлороформа, дибромхлорметана, бромдихлорметана также соответствуют низкому уровню риска.

Для уменьшения содержания остаточного хлора и тригалогенметанов предлагается выполнять обеззараживание очищенных вод гипохлоритом натрия совместно с УФ-облучением.

В соответствии с ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов» обеззараживание гипохлоритом натрия на малых и сверхмалых объектах соответствует наилучшим доступным технологиям.⁵

Обеззараживание очищенных вод гипохлоритом натрия совместно с УФ-облучением представляет собой эффективный метод, который сочетает преимущества обоих процессов. Использование УФ-облучения позволяет уничтожить бактерии и микроорганизмы в воде, а обработка гипохлоритом натрия может обеспечить пролонгированный эффект обеззараживания.

⁵ ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. М.: Росстандарт, 2019. 248 с. утв.

Приказом Росстандарта от 12.12.2019 № 2981. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068889>

Для уменьшения содержания остаточного хлора и тригалогенметанов предлагается выполнять обеззараживание очищенных вод гипохлоритом натрия совместно с УФ-излучением. При этом снизится расход гипохлорита натрия и соответственно снизится содержание остаточного активного хлора в водопроводной воде. Сочетание свободного хлора и ультрафиолетового излучения приводит к образованию высокореактивных частиц, которые способны удалять из воды широкий спектр загрязняющих веществ и обеспечивать снижение концентрации тригалогенметанов и других хлорорганических соединений по сравнению с использованием только свободного хлора.

Выводы

1. Проведённая оценка рисков с использованием реестра и матрицы по категориям (обращение и применение, влияние на здоровье персонала, опасность при чрезвычайных ситуациях, экотоксичность после очистки) показала, что доля событий с критическими последствиями и высокой/очень высокой вероятностью составляет 21 % для гипохлорита натрия (ГХН) против 29 % для диоксида хлора (ДХ). Несмотря на преимущества ГХН (готовый реагент, простота логистики, отсутствие сложного синтеза на месте), его применение связано с риском образования канцерогенных побочных продуктов.

Список литературы

1. Скрыбин А. Ю. Ротация жидкого хлора на гипохлорит как решение проблемы техногенной и экологической безопасности при обеззараживании воды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 3 (41). С. 78–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rotatsiya-zhidkogo-hlora-na-gipohlorit-kak-reshenie-problemy-tehnogennoy-i-ekologicheskoy-bezopasnosti-pri-obezzarazhivanii-vody> (дата обращения: 15.04.2026).

2. Toxicological aspect of water treated by chlorine-based advanced oxidation processes: A review / I. Sánchez-Montes, G. O. S. Santos, A. J. dos Santos [et al.]. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 878, P. 163047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163047>.

3. Beneficial or harmful: Time-dependent hormesis induced by typical disinfectants and their mixtures with toxicological interaction / M. T. Tao, S. S. Liu, Z. W. Gu [et al.]. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 904, pp. 167204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167204>.

4. Residual chlorine persistently changes antibiotic resistance gene composition and increases the risk of antibiotic resistance in sewer

2. Экспериментальными исследованиями водопроводной воды северной стороны г. Севастополя установлено превышение санитарных нормативов по содержанию остаточного хлора, а также низкий уровень экологического риска остаточного хлора и тригалогенометанов. Коэффициенты опасности развития не канцерогенных эффектов остаточного хлора (0,712) и хлороформа (0,037) соответствуют низкому уровню риска. Индивидуальные пожизненные канцерогенные риски хлороформа ($2,3 \cdot 10^{-6}$), дибромхлорметана ($5,4 \cdot 10^{-5}$), бромдихлорметана ($2,6 \cdot 10^{-5}$) также соответствуют низкому уровню риска.

3. Для уменьшения содержания остаточного хлора и тригалогенметанов предлагается выполнять обеззараживание очищенных вод гипохлоритом натрия совместно с УФ-облучением. При этом снизится расход гипохлорита натрия и соответственно снизится содержание остаточного активного хлора в водопроводной воде. УФ-излучение эффективно уничтожает микроорганизмы за счёт повреждения их ДНК и РНК, а хлор обеспечивает пролонгированный дезинфицирующий эффект. Их сочетание позволяет достичь более высокой общей эффективности обеззараживания по сравнению с использованием каждого метода в отдельности.

systems / J. Zhang, Z. Xu, W. Chu [et al.]. *Water Research*, 2023, vol. 245, pp. 120635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120635>.

5. Impacts of chlorine disinfection of municipal sewage effluent on receiving rivers: Changes in organic matter and microbial communities / D. Su, W. Ben, B. W. Strobel [et al.]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, vol. 492, pp. 138232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138232>.

6. Reactivity of natural organic matter fractions with chlorine dioxide and ozone / J. Swietlik, A. Dabrowska, U. Raczky-Stanislawiak [et al.]. *Water Research*, 2004, vol. 38, issue 3, pp. 547–558.

7. Influence of drinking water treatments on chlorine dioxide consumption and chlorite/chlorate formation / S. Sorlini, F. Gialdini, M. Biasibetti [et al.]. *Water Research*, 2014, vol. 54, pp. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.038>.

8. Concentration-dependence of the explosion characteristics of chlorine dioxide gas / R. Jin, S. Hu, Y. Zhang [et al.]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 166, pp. 842–847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.124>.

9. Гигиеническая эффективность ультрафиолетового обеззараживания воды в

централизованных системах питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения (систематический обзор) / Е. В. Кирпиченкова, И. З. Джикья, Д. В. Колодина [и др.] // Гигиена и санитария. 2024. Т. 103, № 2. С. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-104-112>.

10. Попова Т. Ю., Головин В. Л., Волкова В. Н. Экологизация обработки природных вод, содержащих растворенные органические вещества // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32, № 4. С. 400–408. DOI: [10.22363/2313-2310-2024-32-4-400-408](https://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-400-408).

11. Treatment Features of High-Color Natural Waters / V. L. Golovin, T. Y. Popova, P. V. Medved [et al.]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, vol. 666, P. 042039. DOI: [10.1088/1755-1315/666/4/042039](https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042039).

12. Optimizing ozone treatment for pathogen removal and disinfection by-product control for potable reuse at pilot-scale / Leticia Reggiane de Carvalho Costa, Lin Li, Laura Haak [et al.]. Chemosphere, 2024, vol. 364, p. 143128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143128>.

13. Per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of The United States / S. Boone, C. Vigo, T. J. Boone [et al.]. Science of the Total Environment, 2019, vol. 653, pp. 359–369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.245>.

14. Feng Y., Smith D. W., Bolton J. R. Photolysis of aqueous free chlorine species (HOCl and OCl⁻) with 254 nm ultraviolet light. Journal of Environmental Engineering and Science, 2007, vol. 6, issue 3, pp. 277–284. DOI: <https://doi.org/10.1139/s06-052>.

15. Khajouei G., Finklea H. O., Lin L.-Sh. UV/chlorine advanced oxidation processes for degradation of contaminants in water and wastewater: A comprehensive review. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, vol. 10, issue 3. P. 107508. DOI: [10.1016/j.jece.2022.107508](https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107508).

16. Козырь Д. А. Оценка экологического риска при обращении с отходами недропользования // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2024. Т. 13, № 4 (68). С. 244–251.

17. Assessing efficiency of pre-ammonization aimed at reducing carcinogenic risks caused by trihalomethanes in drinking water / L. A. Deryabkina, B. I. Marchenko, N. K. Plugotarenko [et al.]. Health Risk Analysis, 2020, issue 3, pp. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.08.eng>.

References

1. Scriabin A. Y. Rotatsiya zhidkogo khloro na gipokhlorit kak reshenie problemy tekhnogennoy i ekologicheskoy bezopasnosti pri obezzarazhivanii vody [Rotation of liquid chlorine to hypochlorite as a solution to the problem of technogenic and environmental safety in water disinfection]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya*, 2022, vol 3 (41), pp. 78–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rotatsiya-zhidkogo-hloro-na-gipokhlorit-kak-reshenie-problemy-tehnogennoy-i-ekologicheskoy-bezopasnosti-pri-obezzarazhivanii-vody> (in Russ.)

2. Toxicological aspect of water treated by chlorine-based advanced oxidation processes: A review / I. Sánchez-Montes, G. O. S. Santos, A. J. dos Santos [et al.]. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 878, P. 163047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163047>.

3. Beneficial or harmful: Time-dependent hormesis induced by typical disinfectants and their mixtures with toxicological interaction / M. T. Tao, S. S. Liu, Z. W. Gu [et al.]. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 904, pp. 167204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167204>.

4. Residual chlorine persistently changes antibiotic resistance gene composition and increases the risk of antibiotic resistance in sewer systems / J. Zhang, Z. Xu, W. Chu [et al.]. *Water Research*, 2023, vol. 245, pp. 120635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120635>.

5. Impacts of chlorine disinfection of municipal sewage effluent on receiving rivers: Changes in organic matter and microbial communities / D. Su, W. Ben, B. W. Strobel [et al.]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, vol. 492, pp. 138232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138232>.

6. Reactivity of natural organic matter fractions with chlorine dioxide and ozone / J. Swietlik, A. Dabrowska, U. Raczky-Stanislawiak [et al.]. *Water Research*, 2004, vol. 38, issue 3, pp. 547–558.

7. Influence of drinking water treatments on chlorine dioxide consumption and chlorite/chlorate formation / S. Sorlini, F. Gialdini, M. Biasibetti [et al.]. *Water Research*, 2014, vol. 54, pp. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.038>.

8. Concentration-dependence of the explosion characteristics of chlorine dioxide gas / R. Jin, S. Hu, Y. Zhang [et al.]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 166, pp. 842–847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.124>.

9. Gigenicheskaya effektivnost ultravioletovogo obezzarazhivaniya vody v tsentralizovannykh sistemakh pitevogo i khozyaystvenno-bytovogo vodosnabzheniya [Hygienic efficiency of ultraviolet disinfection of water in centralized

drinking and household water supply systems (a systematic review) / Ye. V. Kirpichenkova, I. Z. Dzhikiya, D. V. Kolodina [et al.]. *Gigiyena i sanitariya*, 2024, vol. 103, issue 2, pp. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-104-112>. (in Russ.)

10. Popova T. Yu., Golovin V. L., Volkova V. N. *Ekologizatsiya obrabotki prirodnikh vod, sodержashchikh rastvorenyye organicheskie veshchestva* [Ecologization of natural water treatment containing dissolved organic substances]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2024, vol. 32, issue 4, pp. 400–408. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-400-408. (in Russ.)

11. 11. Treatment Features of High-Color Natural Waters / V. L. Golovin, T. Y. Popova, P. V. Medved [et al.]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 666, P. 042039. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042039.

12. Optimizing ozone treatment for pathogen removal and disinfection by-product control for potable reuse at pilot-scale / Leticia Reggiane de Carvalho Costa, Lin Li, Laura Haak [et al.]. *Chemosphere*, 2024, vol. 364, p. 143128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143128>.

13. Per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of The United

States / S. Boone, C. Vigo, T. J. Boone [et al.]. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 653, pp. 359–369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.245>.

14. Feng Y., Smith D. W., Bolton J. R. Photolysis of aqueous free chlorine species (HOCl and OCl⁻) with 254 nm ultraviolet light. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2007, vol. 6, issue 3, pp. 277–284. DOI: <https://doi.org/10.1139/s06-052>.

15. Khajouei G., Finklea H. O., Lin L.-Sh. UV/chlorine advanced oxidation processes for degradation of contaminants in water and wastewater: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, issue 3. P. 107508. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107508.

16. Kozyr D. A. Otsenka ekologicheskogo riska pri obrashchenii s otkhodami nedropolzovaniya [Assessment of environmental risk in the management of subsurface use waste]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 2024, issue 13, vol. 4 (68), pp. 244–251. (in Russ.)

17. Assessing efficiency of pre-ammonization aimed at reducing carcinogenic risks caused by trihalomethanes in drinking water / L. A. Deryabkina, B. I. Marchenko, N. K. Plugo-tarenko [et al.]. *Health Risk Analysis*, 2020, issue 3, pp. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.08.eng>.

Козырь Дмитрий Александрович,
Севастопольский государственный университет,
Российская Федерация, г. Севастополь
кандидат технических наук, доцент
e-mail: kozurdmitrii@mail.ru

Kozyr Dmitry Alexandrovich
Sevastopol State University,
Russian Federation, Sevastopol
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: kozurdmitrii@mail.ru

Макеева Дарья Александровна,
Российский государственный университет нефти и газа (научно-исследовательский университет)
имени И. М. Губкина,

Российская Федерация, г. Москва
кандидат технических наук, доцент
e-mail: daria.makejeva@mail.ru

Makeeva Darya Alexandrovna
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Scientific Research University),
Russian Federation, Moscow
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: daria.makejeva@mail.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

К рассмотрению принимаются рукописи в электронном формате документа Microsoft Word (*.doc, *.docx). Файлы высылаются по адресу: journal@edufire37.ru

Статьи должны полностью соответствовать специализациям журнала.

Обязательно указание места работы всех авторов, их должностей и контактной информации.

В статье указывается шифр основной специальности, по которой выполнена работа.

При направлении материалов в редакцию по электронной почте в одном письме направляются:

- файл статьи в формате MS Word;
- внешняя рецензия, заверенная в установленном в организации порядке (рецензенты и авторы статей не должны находиться в должностных отношениях);
- сканированная копия сопроводительного письма.
- экспертное заключение о возможности открытой публикации материалов в журнале;

ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ

Обязательные элементы рукописи:

УДК, аннотация, ключевые слова, текст статьи.

Аннотация должна иметь объем 150–200 слов, а её содержание – отражать структуру статьи.

Минимальный объем ключевых слов – 5. Ключевые слова отделяются друг от друга точкой с запятой.

В структуру статьи должны входить: введение (краткое), цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, список литературы.

Структура размещения статьи в журнале:

- Блок 1 – на русском языке: УДК; название статьи; автор(ы); адресные данные авторов (полное юридическое название организации, адрес организации, адрес электронной почты всех или одного автора); аннотация; ключевые слова;
- Блок 2 – транслитерация и перевод на английский язык соответствующих данных Блока 1 в той же последовательности: название статьи – на английском языке; авторы – на латинице (транслитерация); название организации, адрес организации, аннотация, ключевые слова – на английском языке;
- Блок 3 – полный текст статьи на языке оригинала (русском), оформленный в соответствии с действующими требованиями Журнала;
- Блок 4 – список литературы на русском языке (название «Список литературы»);
- Блок 5 – список литературы в романском алфавите (название References). Если список литературы состоит только из англоязычных источников, то Блок 5 может отсутствовать.
- Блок 6 – сведения об авторах на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению

Рукописи представляются в формате А4. Объем представляемых рукописей (с учетом пробелов):

- статьи – до 20 тысяч знаков;
- обзора – до 60 тысяч знаков;
- краткого сообщения – до 10 тысяч знаков.

Оформление текста статьи:

- для набора используется шрифт Arial, размер шрифта – 10;
- отступ первой строки абзаца 1,25 см;
- все поля 2 см;
- все аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом использовании;
- недопустимо использование расставленных вручную переносов.

Оформление формул, рисунков и таблиц:

• формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation 3.0 или Math Type 5.0-6.0 Equation (шрифт Arial), размер шрифта – 10. Пояснения к формулам (экспликации) должны быть набраны в подбор (без использования красной строки). Формулы нумеруют в круглых скобках по правому краю страницы;

- в тексте статьи обязательно должны содержаться ссылки на таблицы, рисунки, графики;
- графики, рисунки и фотографии монтируются в тексте после первого упоминания о них. Количество графического материала должно быть минимальным (не более 5 рисунков). Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы, оси на графиках подписаны. Рисунки и фотографии следует

представлять в черно-белом варианте; они должны иметь хороший контраст и разрешение. Рисунки в виде ксерокопий из книг и журналов, а также плохо отсканированные не принимаются. Рисунки обязательно должны быть сгруппированы (т.е. не должны «разваливаться» при перемещении и форматировании);

- подрисовочные подписи размещаются по центру;
- названия рисунков даются под ними после слова «Рис.» с порядковым номером. Слово «Рис.» с порядковым номером пишется полужирно, название рисунка – с прописной буквы, обычным шрифтом: **Рис. 1.** Отдельные элементы дымопроницаемой мембраны в сложенном состоянии;

- если рисунок в тексте один, номер не ставится: **Рисунок.** Статистика пожаров, произошедших на различных объектах;

- подрисовочные подписи не входят в состав рисунка, а располагаются отдельным текстом под иллюстрацией. Если на рисунке вводятся новые (ранее не встречавшиеся в тексте) обозначения, они должны быть расшифрованы в подрисовочной подписи; также здесь поясняются элементы, обозначенные на рисунке цифрами. Рекомендуемая ширина рисунков не более 7,5 см;

- ссылки в тексте на таблицы пишутся: «табл.», «табл. 1»;

- слово «Таблица» с порядковым номером и названием размещается по центру. Слово «Таблица» набирается курсивом, название таблицы выделяется полужирно: **Таблица 1. Экспериментальные данные по допустимым срокам непрерывной продолжительности работы в изолирующих термоагрессивостойких костюмах для пожарных;**

- единственная в статье таблица не нумеруется: **Таблица. Анализ оборудования для задачи воздушно-механической пены;**

- по возможности следует избегать использования рисунков и таблиц, размер которых требует альбомной ориентации страницы;

- поворот рисунков и таблиц в вертикальную ориентацию недопустим;

- текст статьи не должен заканчиваться таблицей, рисунком или формулой.

Правила оформления списка литературы

После текста статьи приводится список литературы, оформленный в строгом соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

Источники указываются в порядке цитирования в тексте. На все источники из списка литературы должны быть ссылки в тексте.

В список литературы включаются только научные и приравненные к ним публикации (статьи, монографии, учебные издания, патенты на изобретения, авторские свидетельства). Ссылки на нормативные документы (законы, постановления, стандарты) должны оформляться как подстрочные сноски.

В статье должны быть представлены два варианта списка использованной литературы:

- список на русском языке. Для изданий на русском языке обязательна транслитерация оригинального названия и перевод названия на английский язык (в квадратных скобках); тире, а также символ // в описании на английском языке не используются;

- список в романском алфавите (References). В References при переводе статьи на английский названия изданий и журналов не переводятся, используется транслитерация.

Для изданий на английском языке транслитерация не производится.

Если есть, обязательно указывается DOI.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ
№ 2 (59), 2026

16+

Дата выхода в свет 26.06.2026 г. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Формат 60 × 90 1/8. Усл. печ. л. 22,5. Тираж 100 экз.
Заказ № . Цена свободная

Оригинал-макет подготовлен
Ивановской пожарно-спасательной академией ГПС МЧС России
АДРЕС РЕДАКЦИИ (ИЗДАТЕЛЯ): 153040, г. Иваново, проспект Строителей, д. 33;
тел.: (4932) 93-08-00, доб. 1560; e-mail: journal@edufire37.ru

Отпечатано в АО «Информатика»
153032, г. Иваново, ул. Ташкентская, 90