



ГОД ЕДИНСТВА
НАРОДОВ РОССИИ

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

№.2 (51)
/2026

НАУЧНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

<https://vigps.ru/nauka/tekhnosfernaya-bezopasnost-nauchnyy-elektronnyy-zh/>

ISSN 2311-3286

ВКЛЮЧЕН в перечень ВАК, РИНЦ

Свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ №. ФС 77-89441

ВЫПУСКАЕТСЯ **4** РАЗА В ГОД

tekhnosfernayabesopasnost@mail.ru

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: Елфимова М.В., кандидат тех. наук, доцент, член-корреспондент НАН ПБ, Уральский институт ГПС МЧС России, заместитель начальника института по научной работе

Заместитель главного редактора: Хабибулина Н.В., кандидат с.-х. наук, Уральский институт ГПС МЧС России, начальник научно-исследовательского отдела

Члены редакционной коллегии:

Акулов А.Ю., кандидат техн. наук, доцент, действительный член ВАН КБ, член-корреспондент НАН ПБ, Уральский институт ГПС МЧС России, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской группы комплекса платных услуг

Баженов Е.Е., доктор техн. наук, профессор, Уральский институт ГПС МЧС России, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств

Барбин Н.М., доктор техн. наук, Почетный работник науки и техники Российской Федерации, член-корреспондент НАН ПБ, Уральский институт ГПС МЧС России, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ

Батуро А.Н., кандидат техн. наук, доцент, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, заместитель начальника Академии по научной работе – начальник научно-технического центра

Безапонная О.В., кандидат техн. наук, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз

Гравит М.В., доктор техн. наук, доцент, Академик НАН ПБ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ведущий научный сотрудник научно-технологического комплекса «Цифровой инжиниринг в гражданском строительстве»

Зыбина О.А., доктор техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, заведующий кафедрой - Базовая кафедра «Пожарная безопасность» при ООО «Гёфест»

Кайбичев И.А., доктор ф.-м. наук, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, профессор кафедры математики и информатики

Калач А.В., доктор техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, профессор кафедры техносферной и пожарной безопасности

Камлюк А.Н., кандидат ф.-м. наук, доцент, Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, ученый секретарь

Качанов С.А., доктор техн. наук, профессор, заместитель директора Российско-Сербского гуманитарного центра, Заслуженный деятель науки РФ

Казымов К.Т., кандидат техн. наук, Академия МЧС Азербайджанской Республики, заместитель начальника академии

Крудышев В.В., кандидат с.-х. наук, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств

Маскаева Л.Н., доктор хим. наук, профессор, член-корреспондент НАН ПБ, Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности

Мельник А.А., кандидат техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, заместитель начальника университета (по научной работе)

Мокроусова О.А., доктор пед. наук, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, заведующая кафедрой пожарной безопасности в строительстве

Прус Ю.В., доктор ф.-м. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М.Губкина, профессор кафедры математических методов обеспечения безопасности систем

Рожков А.В., кандидат техн. наук, доцент, Академия ГПС МЧС России, руководитель органа по сертификации

Сивенков А.Б., доктор техн. наук, профессор, Академия ГПС МЧС России, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве

Талалаева Г.В., доктор мед. наук, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, профессор кафедры сервиса безопасности

Терехин С.Н., доктор тех. наук, доцент, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, начальник кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения

Тростянский С.Н., доктор техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, профессор кафедры техносферной и пожарной безопасности

Храмцов С.П., кандидат техн. наук, Академия ГПС МЧС России, начальник центра организации научных исследований и научной информации

Хафизов И.Ф., доктор техн. наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности

Чистяков Т.И., кандидат техн. наук, Академия ГПС МЧС России, старший преподаватель кафедры инженерной теплофизики и гидравлики

Шархун С.В., кандидат техн. наук, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, заместитель начальника кафедры пожарной безопасности в строительстве

Шкуро А.Е., доктор техн. наук, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, профессор кафедры химии и процессов горения

Ширинкин П.В., кандидат техн. наук, доцент, Академия ГПС МЧС России, заместитель начальника учебно-научного комплекса – начальник кафедры пожарной тактики и службы

Юркин Г.Ю., кандидат ф.-м. наук, Сибирская пожарно-спасательная академия МЧС России, доцент кафедры контрольно-надзорной деятельности

Редакционная команда научного периодического издания «Техносферная безопасность»

Главный редактор: Елфимова М.В., кандидат тех. наук, доцент, член-корреспондент НАН ПБ, Уральский институт ГПС МЧС России, заместитель начальника института по научной работе

Заместитель главного редактора: Хабибулина Н.В., кандидат с.-х. наук, Уральский институт ГПС МЧС России, начальник научно-исследовательского отдела

Выпускающий редактор: Харченко М.В., Уральский институт ГПС МЧС России, научный сотрудник

Требования к предоставляемым для публикации материалам

Оформление рукописей

Объем рукописи не должен превышать 20 страниц для обзорных теоретических и дискуссионных статей и 15 страниц для прочих материалов, включая таблицы, иллюстрации, список литературы.

Язык публикаций русский или английский. Редакция не осуществляет перевод русскоязычных статей, авторы производят перевод самостоятельно.

Внутритекстовые ссылки на включенные в список литературы работы приводятся в квадратных скобках с указанием номера источника в списке. Дефис должен отличаться от тире. Тире и кавычки должны быть одинакового начертания по всему тексту. Не допускаются стили, не задаются колонки. Не допускаются разрывы между абзацами.

Графические объекты (фотографии, иллюстрации, графики), включенные в текст статьи, должны дублироваться в формате jpg. Расширение – не менее 300 dpi. Цветовая гамма графических объектов должна быть в градации серого либо в нейтральных тонах, использование ярких цветов запрещено. Максимальное количество графических объектов 7, в исключительных случаях – по согласованию с Редакцией.

Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения.

Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сносок и примечаний;

для рисунка: подрисунковой подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;

для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

Рецензирование. Все предоставляемые материалы проходят проверку через систему автоматической проверки текстов на наличие заимствований «Антиплагиат». Уникальность текста должна составлять не менее 80 %.

Все предоставляемые материалы проходят рецензирование специалистов из числа членов редакционной коллегии и публикуются только после получения положительного отзыва рецензентов. Представляемые в Редакцию рукописи не могут быть опубликованы ранее в других изданиях (издательствах) или одновременно направлены в другие издания (издательства) для опубликования. Материалы от аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук принимаются к рассмотрению при наличии подписанной рецензии, рекомендующей опубликование материала, либо в соавторстве с научным руководителем работы или в соавторстве с кандидатом (доктором) наук.

Редакция оставляет за собой право на сокращение объема материала и его литературную правку, а также на отказ в публикации, если статья не соответствует профилю журнала или имеет низкое качество изложения материала.

Список источников оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5 – 2008 в виде общего списка в порядке упоминания в статье. Для научной статьи список литературы составляет 5–15 источников, для обзорной статьи – до 20. Список источников должен состоять не менее, чем на 50 % из современных (не старше 10 лет) научных публикаций. В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи. Не допускаются в списке литературы использовать учебные пособия, учебники, практикумы, сайты компаний и т.п. Оптимальный уровень цитирования и самоцитирования автора – не выше 20% от списка использованных источников.

Не менее половины источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае наличия цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных. Если статья зарегистрирована в РИНЦ, то должен быть указан код EDN

Авторы представляют:

Текст статьи.

Рецензия (для авторов, не имеющих ученой степени).

Письменное обращение в редакцию организации, которую представляет автор, направляющую материалы для публикации, разрешение на открытую печать.

Лицензионный договор о предоставлении на безвозмездной основе права на использование произведения и метаданных.

Сведения об авторе, ученая степень, должность, электронный адрес, контактная информация.

Графические объекты (если есть).

Структура текста:

УДК

название статьи на русском и английском языках

фамилия, инициалы автора(ов) на русском и английском языках

организация, город на русском и английском языках, электронный адрес,

аннотация, ключевые слова на русском и английском языках,

текст статьи,

литература на русском и английском языке.

Связь с редакцией

Дополнительную информацию можно получить по телефону (343) 360-80-64, e-mail: tehnosfernayabesopasnost@mail.ru (для материалов). Обращаем внимание авторов, что переписка по указанной электронной почте является официальной. В течение 5 дней со дня поступления рукописи редакция подтверждает ее получение. В случае если ответа не получено, рекомендуется продублировать письмо или связаться с редакцией по телефону.

Публикация статей

Публикация статей осуществляется в порядке очередности поступления в редакцию. Если по заключению рецензента статья возвращается автору на доработку, датой поступления считается день получения редакцией ее окончательного варианта.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ: научный электронный журнал. – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2026. № 2 (51). – 194 с.

Подписано в печать 30.06.2026.

Электронная версия:

<https://uigps.ru/nauka/tehnosfernaya-bezopasnost-nauchnyy-elektromyy-zh/>

Отпечатано в редакционно-издательском отделе
Уральского института ГПС МЧС России

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Киселева В. С., Иванов А. В.

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОСТОЙКИХ ОГНЕТУШАЩИХ И ЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ ПРИ ТУШЕНИИ КАСКАДНЫХ ПОЖАРОВ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ УСТАНОВКАМИ ПОЖАРОТУШЕНИЯ4

Арканов П. В., Дьяков М. В., Беренгардт М. А., Горенков П. А.

К ВОПРОСУ ОРГАНИЗАЦИИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ В ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЯХ И ЗДАНИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ13

Пичуева Е. Д., Худякова С. А., Шевелева В. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИГОДНОСТИ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЯМОГО МАТЕРИАЛЬНОГО УЩЕРБА ОТ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ЗА ПЕРИОД 2017–2024 ГГ.24

Головина Е. В.

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ОГНЕЗАЩИТНЫЕ ФУНКЦИИ ИНТУМЕСЦЕНТНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ СТАРЕНИИ37

Якубова Т. В., Шкуро А. Е.

ПОЛИМЕРЫ С ПРИВИТЫМИ АНТИПИРЕНАМИ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ46

Монахов А. А., Мельников Н. О., Акинин Н. И., Максименко С. А.

ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И СВЯЗИ ПРИ НИЗОВЫХ ПОЖАРАХ62

Мельников Н. О., Шугаева А. Р., Монахов А. А., Черепанов Е. А.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СМЕСЯХ АНТИПИРЕНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДРЕВЕСИНЫ77

Хафизов И. Ф., Озден И. В., Кандалов А. С., Шевченко Д. И., Мелюсева И. А.

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ ПО ПОЖАРНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА88

Леменков М. Д., Шархун С. В., Штерензон В. А., Черепанов Е. А.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ97

Степанов О. И., Стахеев М. В.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЙ ПОЖАРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПО ЗАЩИТЕ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ОТ ПОЖАРОВ НИЗКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В РОССИИ И В СТРАНАХ БАЛКАНСКОГО РЕГИОНА111

Григорьев А. Н., Денисов А. Н., Захаревский В. Б., Новиков А. М.

ОЦЕНКА ТАКТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЖАРНЫХ ОТДЕЛЕНИЙ ПРИ КРУПНЫХ ПОЖАРАХ130

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Гарелина С. А., Скрынников А. Ю.

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННАЯ КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ138

Горлов В. В., Меньших В. В., Никитенко В. А.

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОРЯДКА ЭВАКУАЦИИ ИЗ ЗОНЫ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ149

Хлопцев А. В., Шубкин Р. Г., Батуро А. Н., Уколов А. В.

ИЗМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА НАД КАМЧАТСКИМ РЕГИОНОМ В 2016–2025 ГГ. И ПРОИСХОДИВШИЕ ЗДЕСЬ В 2016–2025 ГГ. ОПАСНЫЕ ЭНДОГЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ160

Волкова Н. А., Шарков Г. А.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА Р. ОРЕДЕЖ В РАЙОНЕ Д. ЧИКИНО ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПО ВОДНОТРАНСПОРТНЫМ СИСТЕМАМ МЕСТНОГО ЗНАЧЕНИЯ180

CONTENTS

FIRE SAFETY

Victoria S. Kiseleva, Alexey V. Ivanov

METHODS OF USING HEAT-RESISTANT FIRE EXTINGUISHING AND PROTECTIVE COMPOUNDS WHEN EXTINGUISHING CASCADE FIRES WITH ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS4

Petr V. Arkanov, Maksim V. Dyakov, Mikhail A. Berengardt, Pavel A. Gorenkov

ON THE ISSUE OF ORGANIZING FIRE EXTINGUISHING IN HIGH-RISE BUILDINGS AND MULTI-STORY BUILDINGS13

Elizaveta D. Pichueva, Svetlana A. Khudyakova, Victoria V. Sheveleva

RESEARCH ON THE SUITABILITY OF AN ADAPTIVE MODEL FOR PREDICTING DIRECT MATERIAL DAMAGE FROM FIRES IN THE RUSSIAN FEDERATION FOR THE PERIOD 2017–202424

Ekaterina V. Golovina

THE EFFECT OF MODIFYING FILLERS ON THE FLAME-RETARDANT FUNCTIONS OF AN INTUMESCENT COATING DURING ARTIFICIAL AGING37

Tatiana V. Yakubova, Alexey E. Shkuro

POLYMER-GRAFTED FLAME RETARDANTS: SYNTHESIS, PROPERTIES, AND APPLICATION PROSPECTS46

Anton A. Monakhov, Nikita O. Melnikov, Nikolai I. Akinin, Sergey A. Maksimenko INCREASING THE FIRE RESISTANCE OF WOODEN POLES OF POWER AND COMMUNICATION LINES DURING SURFACE FIRES	62
Nikita O. Melnikov, Arina R. Shugaeva, Anton A. Monakhov, Evgeny A. Cherepanov SYNERGISTIC EFFECTS IN FLAME RETARDANT MIXTURES FOR WOOD PROTECTION	77
Ildar F. Khafizov, Inna V. Ozden, Aleksei S. Kandalov, Dmitrii I. Shevchenko, Irina. A. Melyuseva METHODOLOGY FOR INCREASING THE EFFECTIVENESS OF FIRE AND INDUSTRIAL SAFETY TRAINING FOR PIPELINE TRANSPORT SPECIALISTS	88
Mikhail D. Lemenkov, Sergey V. Sharkhun, Vera A. Shterenzon, Evgeny A. Cherepanov ANALYTICAL REVIEW OF DOMESTIC AND FOREIGN TOOLS FOR MONITORING THERMAL INSULATION MATERIALS IN FACADE SYSTEMS	97
Oleg I. Stepanov, Maxim V. Stakheev ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF FIRE DEPARTMENTS IN PROTECTING SETTLEMENTS FROM LOW VEGETATION FIRES IN RUSSIA AND THE COUNTRIES OF THE BALKAN REGION	111
Alexey N. Grigoriev, Alexey N. Denisov, Viktor B. Zakharevsky, Alexander M. Novicov ASSESSMENT OF THE TACTICAL POTENTIAL OF FIRE DEPARTMENTS IN CASE OF MAJOR FIRES ...	130

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Svetlana A. Garelina, Alexey Yu. Skrynnikov RISK-ORIENTED CONCEPT OF THE SYSTEM FOR PREVENTING MAN-MADE EMERGENCIES AT INDUSTRIAL FACILITIES	138
Vitaly V. Gorlov, Valery V. Menshikh, Vitaly A. Nikitenko MODEL AND ALGORITHM FOR DECISION-MAKING IN DETERMINING THE EVACUATION ORDER FROM AN EMERGENCY ZONE	149
Alexander V. Khloptsev, Roman G. Shubkin, Alexey N. Baturo, Alexey V. Ukolov CHANGES IN THE DISTRIBUTION OF TOTAL OZONE CONTENT OVER THE KAMCHATKA REGION IN 2016–2025 AND DANGEROUS ENDOGENOUS GEOLOGICAL PHENOMENA THAT OCCURRED HERE IN 2016–2025	160
Nadezhda A. Volkova, Grigory A. Sharkov ANALYSIS OF RUNOFF VARIABILITY OREDEZH NEAR THE VILLAGE OF CHIKINO TO ENSURE TRAFFIC SAFETY ON LOCAL WATER TRANSPORT SYSTEMS	180

УДК 614.841.4

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОСТОЙКИХ ОГNETУШАЩИХ И ЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ ПРИ ТУШЕНИИ КАСКАДНЫХ ПОЖАРОВ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ УСТАНОВКАМИ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Киселева Виктория Сергеевна, Иванов Алексей Владимирович

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

Аннотация. В статье рассматривается проблема повышения эффективности тушения каскадных пожаров на объектах нефтегазового комплекса с использованием роботизированных установок пожаротушения. Предлагается комбинированный подход, основанный на применении наномодифицированных термостойких огнетушащих и защитных составов. В ходе исследования экспериментально и с помощью компьютерного моделирования подтверждено, что применение наномодифицированных составов с экспериментально установленными улучшенными теплофизическими характеристиками приводит к значительному повышению эффективности тушения и теплозащиты. Оптимальное введение углеродных наноструктур в огнетушащий и защитный составы обеспечивает существенное снижение максимальной температуры в зоне горения, кратное сокращение времени ликвидации пожара и значительное повышение стойкости защитных покрытий к экстремальному тепловому потоку. Показано, что совместное использование разработанных составов обеспечивает взаимоусиливающее действие, выражающееся в ускоренной локализации очага горения и повышении стойкости защитных покрытий к экстремальным тепловым нагрузкам. Научная и практическая новизна работы заключается в разработке комплексной методики применения новых составов, регламентирующей их приготовление, дозирование и эксплуатацию в роботизированных установках пожаротушения, что позволяет минимизировать нахождение человека в опасной зоне, сократить время тушения пожара и повысить общую эффективность противопожарной защиты критически важных объектов.

Ключевые слова: модификация, барьерный эффект, огнетушащие и защитные составы, опасные факторы пожара, углеродные наноструктуры, термостойкость

Для цитирования: Киселева В. С., Иванов А. В. Методика применения термостойких огнетушащих и защитных составов при тушении каскадных пожаров роботизированными установками пожаротушения // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 4–12.

METHODS OF USING HEAT-RESISTANT FIRE EXTINGUISHING AND PROTECTIVE COMPOUNDS WHEN EXTINGUISHING CASCADE FIRES WITH ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS

Victoria S. Kiseleva, Alexey V. Ivanov

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article examines the problem of increasing the efficiency of extinguishing cascade fires at oil and gas facilities using robotic fire extinguishing systems. A combined approach based on the use of nanomodified heat-resistant fire extinguishing and protective compositions is proposed. The study, conducted experimentally and using computer modeling, confirmed that the use of nanomodified compositions with experimentally established improved thermophysical properties leads to a significant increase in extinguishing efficiency and thermal protection. Optimal introduction of carbon nanostructures into fire extinguishing and protective compositions ensures a significant reduction in the maximum temperature in the combustion zone, a multiple reduction in fire suppression time, and a significant increase in the resistance of protective coatings to extreme heat flux. It is shown that the combined use of the developed compositions provides a mutually reinforcing effect, resulting in accelerated localization of the fire source and increased resistance of protective coatings to extreme thermal loads. The scientific and practical novelty of this work lies in the development of a comprehensive methodology for the use of new compounds, regulating their preparation, dosing, and operation in robotic fire extinguishing systems. This minimizes human involvement in the danger zone, reduces fire extinguishing time, and improves the overall effectiveness of fire protection at critical facilities.

Keywords: modification, barrier effect, fire extinguishing and protective compounds, fire hazards, carbon nanostructures, heat resistance

For citation: Kiseleva V. S., Ivanov A. V. Methods of using heat-resistant fire extinguishing and protective compounds when extinguishing cascade fires with robotic fire extinguishing systems // *Technosphere safety*. 2026. No. 2 (51). P. 4–12.

Введение

Ключевым вызовом при обеспечении пожарной безопасности критически важных объектов нефтегазового комплекса, таких как сливо-наливные эстакады и резервуарные парки, является высокая вероятность возникновения каскадных пожаров, сопровождающихся экстремальным тепловым воздействием [1]. Существующие роботизированные установки пожаротушения (далее — РУП), использующие традиционные огнетушащие (далее — ОТВ) и защитные составы (далее — ЗС), демонстрируют недостаточную эффективность в данных условиях, что подтверждается

экспериментальными исследованиями [2]. Их основные ограничения связаны с низкой термостабильностью и замедленной кинетикой подавления пламени, требующей значительного времени для локализации пожара. Существующие методики применения РУП, основанные на использовании таких составов, не учитывают специфику экстремальных тепловых потоков и не обеспечивают требуемой скорости тушения, что обуславливает необходимость разработки принципиально нового подхода. Перспективным направлением является наномодификация традиционных ОТВ и ЗС путем диспергирования углеродных наноструктур (далее — УНС), в частности

астраленов (далее — Astr), что приводит к формированию пространственной сетки, повышающей термостабильность и механическую целостность покрытий за счет барьерного эффекта [3]. Внедрение таких материалов требует разработки соответствующей методики их применения в РУП, адаптированной к изменившимся реологическим, эксплуатационным характеристикам.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка научно обоснованной методики применения термостойких наномодифицированных ОТВ и ЗС в РУП для эффективного подавления каскадных пожаров на объектах нефтегазового комплекса.

Материалы и методы

В качестве материалов исследования использовались ОТВ на основе водных растворов синтетического пенообразователя типа «S» с концентрацией 2 и 6 масс. % [4] и ЗС на основе композитов неорганического вяжущего [5], модифицированные Astr [6]. Для ОТВ варьировалась концентрация модификатора в диапазоне 0,01–0,1 масс. %, для ЗС — 0,1 и 0,15 масс. %.

Оценка термостойкости материалов и моделирование их работы в условиях пожара проводились с применением комплекса вычислительных и аналитических методов. Для моделирования распространения опасных факторов пожара использовался верифицированный программный комплекс Fire Dynamic Simulator, интегрированный в графический интерфейс PyroSim [7]. Методология исследования основана на численном решении уравнений Навье — Стокса [8] для низкоскоростных турбулентных течений, описывающих процессы тепломассопереноса в условиях горения.

В рамках исследования был разработан комплекс из трех расчетных моделей. Первая модель — виртуальный аналог лабораторной установки для тушения модельного очага пожара класса «В» в емкости кубической формы с размерами 0,5 × 0,5 × 0,5 м (рис. 1а). Регистрация температурных полей в процессе тушения осуществлялась с помощью виртуальных термопар, расположенных на двух уровнях на высотах 0,25 м и 0,45 м от дна емкости, что обеспечивало контроль динамики изменения температурного режима над поверхностью горячей жидкости.

Вторая модель представляла собой виртуальный аналог огневой печи с системой термопар, установленных перед образцом, на поверхности и за защитной пластиной, для анализа термостойкости покрытий (рис. 1б).

Третья модель — крупномасштабная модель типовой сливо-наливной эстакады с геометрическими размерами 45 × 19,5 × 20 м, предназначенной для обслуживания четырех железнодорожных цистерн с нефтепродуктами (рис. 2).

В модель была включена система орошения на базе РУП производительностью 20–40 л/с и теплозащитный экран для анализа их эффективности. Исходные данные для моделирования включали теплофизические свойства модифицированных ОТВ и ЗС, полученные в ходе экспериментальных исследований [9, 10].

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования тушения пожара ОТВ (рис. 3) показали, что применение модифицированного состава с добавкой 0,02 масс. % УНС при тушении модельного

очага пожара класса В обеспечивает снижение максимальной температуры в зоне

горения на 18–22 % по сравнению с базовым составом.

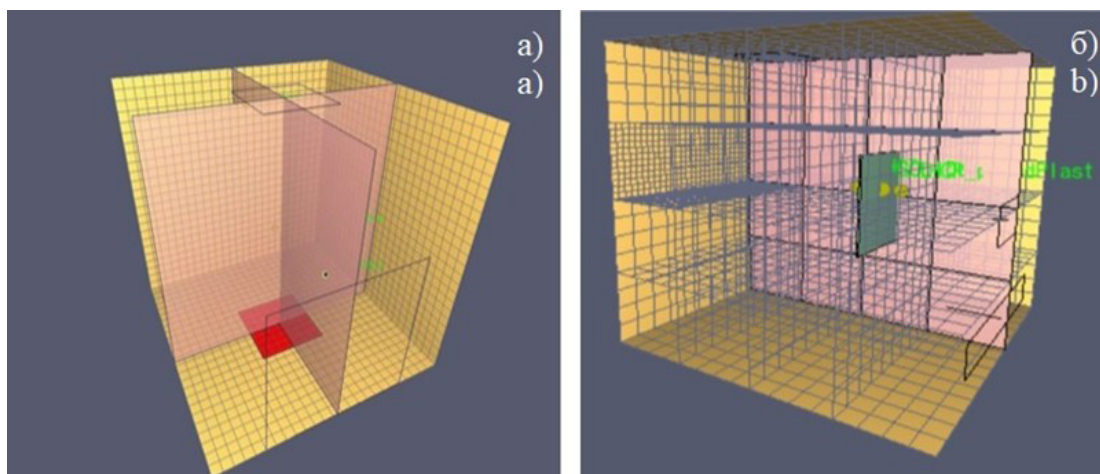


Рис. 1. Имитационные модели в программной среде PyroSim:

a — тушения пожара ОТВ; *б* — огневого воздействия на ЗС

Fig. 1. Simulation models in the PyroSim software environment:

a — fire extinguishing with fire extinguishing agents; *b* — fire impact on the fire protection system

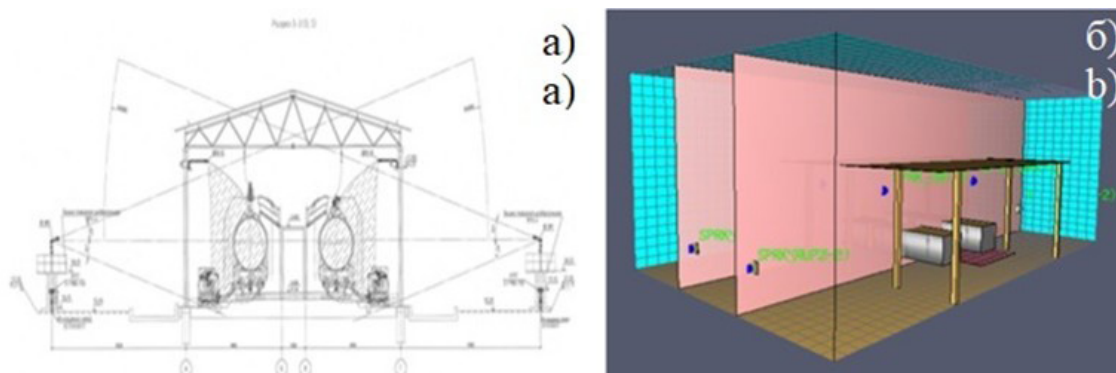


Рис. 2. Компьютерная модель сливо-наливной эстакады:

a — принципиальная схема; *б* — имитационная модель в программной среде PyroSim

Fig. 2. Computer model of a loading and unloading rack:

a — schematic diagram; *b* — simulation model in the PyroSim software environment

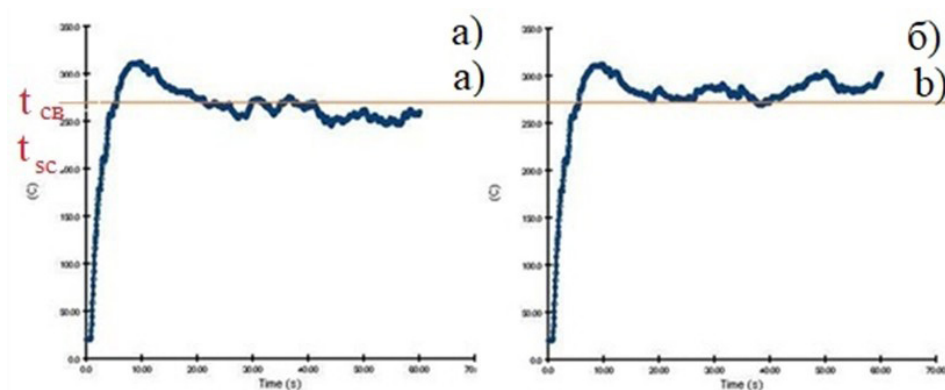


Рис. 3. Результаты моделирования в программной среде PyroSim:

a — модифицированный ОТВ; *б* — немодифицированный ОТВ

Fig. 3. Results of modeling in the PyroSim software environment:

a — modified fire extinguishing agent; *b* — unmodified fire extinguishing agent

Данные, полученные в ходе моделирования, подтвердили эффективное охлаждение зоны горения до температур ниже точки самовоспламенения легковоспламеняющейся жидкости (рис. 3). Временной анализ развития опасных факторов пожара выявил сокращение длительности ликвидации пожара на 86 % при сохранении расхода ОТВ. Полученные результаты прошли верификацию натурными испытаниями, что подтверждает адекватность разработанной модели и эффективность предложенного состава для тушения пожаров класса В [9].

Моделирование с помощью имитационной модели огневого воздействия на ЗС (рис. 4, табл.) показало выраженную зависимость теплофизических свойств композитных материалов на основе неорганического вяжущего от концентрации Astr. Наибольшую устойчивость показал образец с концентрацией УНС 0,15 масс. %, обеспечивающий тепловую защиту оборудования при температуре 1 100 °С в течение 2 043 с, в то время как немодифицированный состав выдержал воздействие 180 с [10].

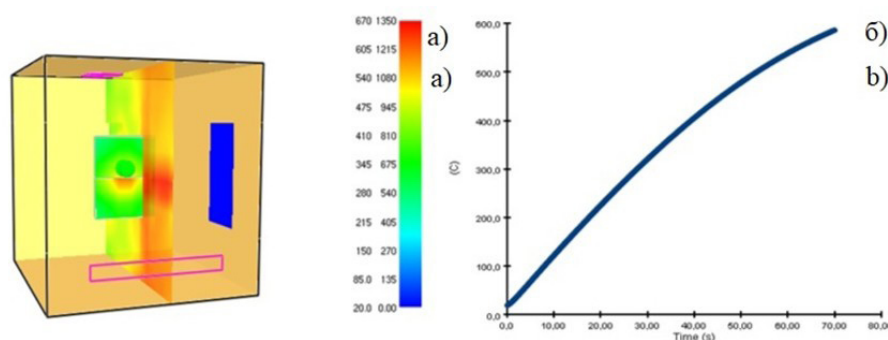


Рис. 4. Имитационная модель оценки термостойкости ЗС в программной среде PyroSim:

a — модель температурного поля на пластине; *б* — изменение температуры на обратной стороне поверхности пластины из стали в условиях факельного горения углеводородов

Fig. 4. Simulation model for assessing the thermal stability of a protective composition in the PyroSim software environment: *a* — model of the temperature field on a plate; *b* — temperature change on the reverse side of the steel plate surface under conditions of torch combustion of hydrocarbons

Таблица
Данные величин коэффициента теплопроводности для всех образцов

Table
Thermal conductivity coefficient values for all samples

№ образца № sample	Время предельного состояния, с Limit state time, s	Теплопроводность, Вт/(м·°С) Thermal conductivity, W/m·°C
1	180	0,35
2	900	0,30
3	2 043	0,27
4	240	0,33
5	1 500	0,28
6	1 100	0,29

Моделирование процессов пожаротушения на сливо-наливной эстакаде, оснащенной РУП и теплозащитным экраном,

продемонстрировало комплексную эффективность от совместного применения модифицированных составов. Комбинированное

использование ОТВ с 0,02 масс. % УНС и ЗС с 0,15 масс. % УНС обеспечило снижение скорости теплопереноса через защитный кожух на 25–30 % по сравнению с традиционными материалами. Данный результат обусловлен оптимизацией микроструктуры композита и повышением его барьерных свойств [11]. Полученные данные согласуются с результатами экспериментальных исследований, подтверждая адекватность

использованной математической модели и корректность методики расчета.

Разработанная методика представляет собой комплекс взаимосвязанных процедур, основанных на трех фундаментальных компонентах: нормировании критических параметров составов, регламентации технологического цикла и их приготовления и установлении правил практической эксплуатации в РУП (рис. 5) [12].

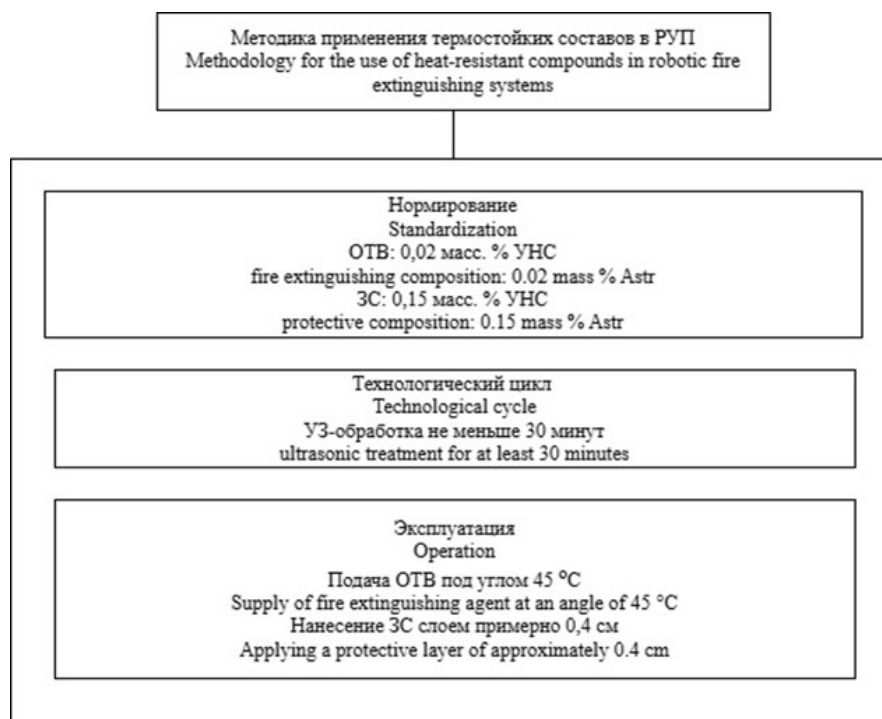


Рис. 5. Методика применения термостойких ОТВ и ЗС

Fig. 5. Methods of using heat-resistant fire extinguishing and protective compounds

Внедрение методики на критически важных объектах нефтегазового комплекса позволяет существенно повысить эффективность противодействия каскадных пожаров при использовании модифицированных составов в РУП. Применение данных материалов позволяет не только повысить эффективность тушения, но и обеспечить длительную защиту критически важных элементов инфраструктуры от термомеханического разрушения в условиях экстремальных тепловых нагрузок.

Выводы

На основании проведенных комплексных экспериментальных и численных исследований разработана научно обоснованная методика применения термостойких наномодифицированных ОТВ и ЗС в РУП для ликвидации каскадных пожаров на объектах нефтегазового комплекса. Установлено, что введение УНС в состав ОТВ в концентрации 0,02 масс. % и в ЗС в концентрации 0,15 масс. % приводит к существенному

улучшению их теплофизических и эксплуатационных характеристик. Численное моделирование в программном комплексе PyroSim обосновано натурными испытаниями и подтвердило, что комбинированное использование модифицированных составов существенно повышает эффективность теплозащиты, снижая скорость теплопереноса через защитные элементы на 25–30 %.

Разработанная методика, включающая нормирование критических параметров составов, регламентацию технологического цикла их приготовления и правила эксплуатации в РУП, позволяет существенно повысить эффективность противодействия каскадных пожаров и обеспечить длительную защиту критически важной инфраструктуры от термомеханического разрушения в условиях экстремальных тепловых нагрузок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Landucci G., Bonvicini S., Cozzani V. A methodology for the analysis of domino and cascading events in Oil & Gas facilities operating in harsh environments // *Safety science*. 2017. Vol. 95. P. 182–197.
2. Wang M., Chen X., Huang X. Robotic firefighting: a review and future perspective // *Intelligent building fire safety and smart firefighting*. 2024. P. 475–499.
3. Дмитриев А. С. Тепловые процессы в наноструктурах : монография. М., 2012. 303 с.
4. Пустовалов И. А., Иванов А. В. Методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2021. Т. 10, № 4. С. 187–192.
5. Khalil A., Sohn S., Celik K. Thermal properties and stability of reactive magnesia cement // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 308. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125102
6. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles / A. I. Shames et al. // *Diamond and Related Materials*. 2009. Vol. 8. No. 2–3. P. 505–510.
7. Valasek L. The use of PyroSim for creation of the input FDS geometry for cinema fire simulation // *Recent Advances in Systems Science and Mathematical Modelling : Proc. of the European Conf. of Systems*. Paris, 2012. P. 304–309.
8. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / K. McGrattan et al. // NIST special publication. URL: <https://clck.su/bLZrP> (дата обращения: 02.04.2026).
9. Киселева В. С. Разработка наномодифицированного огнетушащего состава для роботизированных установок пожаротушения на объектах транспортировки нефтепродуктов // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2023. № 3 (67). С. 196–203. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-196-203
10. Киселева В. С. Термическая стабильность и эксплуатационные характеристики конструктивных композитных материалов тепловой защиты роботизированных установок пожаротушения // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2024. Т. 13, № 4 (68). С. 238–243.

11. Разработка эффективных путей управления структурой и свойствами твердосплавных композитов, модифицированных наночастицами / Ю. И. Гордеев [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2014. Т. 7, № 3. С. 270–289.
12. Алексеева М. Б., Балан С. Н. Основы теории систем и системного анализа. СПб., 2002. 87 с.

REFERENCES

1. Landucci G., Bonvicini S., Cozzani V. A methodology for the analysis of domino and cascading events in Oil & Gas facilities operating in harsh environments // Safety science. 2017. Vol. 95. P. 182–197.
2. Wang M., Chen X., Huang X. Robotic firefighting: a review and future perspective // Intelligent building fire safety and smart firefighting. 2024. P. 475–499.
3. Dmitriev A. S. Thermal processes in nanostructures : monograph. Moscow, 2012. 303 p.
4. Pustovalov I. A., Ivanov A. V. Methodology for increasing the fire extinguishing capacity of modular fire extinguishing systems with finely misted water at oil and gas facilities // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2021. Vol. 10. No. 4. P. 187–192.
5. Khalil A., Sohn S., Celik K. Thermal properties and stability of reactive magnesia cement // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 308. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125102
6. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles / A. I. Shames et al. // Diamond and Related Materials. 2009. Vol. 8. No. 2–3. P. 505–510.
7. Valasek L. The use of PyroSim for creation of the input FDS geometry for cinema fire simulation // Recent Advances in Systems Science and Mathematical Modelling : Proc. of the European Conf. of Systems. Paris, 2012. P. 304–309.
8. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / K. McGrattan et al. // NIST special publication. URL: <https://clck.su/bLZrP> (accessed 02.04.2026).
9. Kiseleva V. S. Development of a nanomodified fire extinguishing composition for robotic fire extinguishing systems at oil product transportation facilities // Problems of risk management in the technosphere. 2023. No. 3 (67). P. 196–203. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-196-203
10. Kiseleva V. S. Thermal stability and performance characteristics of structural composite materials for thermal protection of robotic fire extinguishing systems // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2024. Vol. 13. No. 4 (68). P. 238–243.
11. Development of effective ways to control the structure and properties of hard-alloy composites modified with nanoparticles / Yu. I. Gordeev et al. // Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technology. 2014. Vol. 7. No. 3. P. 270–289.
12. Alekseeva M. B., Balan S. N. Fundamentals of systems theory and system analysis. Saint Petersburg, 2002. 87 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Киселева Виктория Сергеевна, научный сотрудник центра организации научно-исследовательской и редакционной деятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России

(196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., д. 149); РИНЦ ID: 1214692; ResearcherID: IZQ-0884-2023; ORCID: 0000-0003-0257-262X; e-mail: s-kiseleva1@mail.ru

Иванов Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., д. 149); РИНЦ ID: 792929; ResearcherID: A-3805-2015; ORCID: 0000-0002-4854-9321; e-mail: ivanov.av.igps@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victoria S. Kiseleva, Research Officer center for the organization of scientific research and editorial activities, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); ID RSCI: 1214692; ResearcherID: IZQ-0884-2023; ORCID: 0000-0003-0257-262X; e-mail: s-kiseleva1@mail.ru

Alexey V. Ivanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); ID RSCI: 792929; ResearcherID: A-3805-2015; ORCID: 0000-0002-4854-9321; e-mail: ivanov.av.igps@mail.ru

УДК 614.842.664

К ВОПРОСУ ОРГАНИЗАЦИИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ В ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЯХ И ЗДАНИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ

Арканов Петр Викторович, Дьяков Максим Викторович, Беренгардт Михаил Александрович,
Горенков Павел Александрович

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

Аннотация. В последние десятилетия в городах России и мира наблюдается устойчивая тенденция к строительству высотных зданий и зданий повышенной этажности, что обусловлено как урбанизационными процессами, так и необходимостью эффективного использования ограниченных городских территорий. Одновременно с этим появляются новые вызовы и риски, связанные с обеспечением пожарной безопасности, а также с организацией эффективного тушения пожаров на подобных объектах. В статье рассматриваются актуальные проблемы и особенности организации мероприятий по ликвидации пожаров на данных объектах. Особое внимание уделяется нормативно-правовому регулированию и требованиям к обеспечению пожарной безопасности высотных зданий на всех этапах — от проектирования до эксплуатации. Авторы делают акцент на том, что традиционные способы и методы борьбы с огнем зачастую оказываются недостаточно эффективными ввиду специфических архитектурных и конструктивных особенностей высотных построек, сложности эвакуации людей и затрудненного доступа пожарных подразделений к очагу возгорания. В связи с этим в статье поднимается вопрос о необходимости комплексного подхода к организации противопожарного режима, включающего совместную работу проектировщиков, эксплуатационных служб и подразделений Государственной противопожарной службы. Рассматриваются современные технические средства и системы обеспечения безопасности (такие как автоматические установки пожаротушения, системы дымоудаления, средства коммуникации и оповещения), приводятся примеры эффективного использования инновационных технологий при ликвидации пожаров. Подчеркивается важность регулярного обучения и тренировок персонала, а также взаимодействия между службами в чрезвычайных ситуациях. В заключение делается вывод о необходимости дальнейшего совершенствования нормативной базы, внедрения новых технологий и повышения профессионального уровня всех участников противопожарной защиты высотных зданий, что в совокупности позволит значительно снизить риски чрезвычайных ситуаций и повысить безопасность проживания в современных городах.

Ключевые слова: пожары, высотные здания, здания повышенной этажности, организация тушения, пожарная безопасность, спасательные работы

Для цитирования: К вопросу организации тушения пожаров в высотных зданиях и зданиях повышенной этажности / П. В. Арканов [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 13–23.

ON THE ISSUE OF ORGANIZING FIRE EXTINGUISHING IN HIGH-RISE BUILDINGS AND MULTI-STORY BUILDINGS

Petr V. Arkanov, Maksim V. Dyakov, Mikhail A. Berengardt, Pavel A. Gorenkov
UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. In recent decades, cities in Russia and around the world have seen a steady trend toward the construction of high-rise and multi-story buildings, driven by both urbanization and the need to efficiently utilize limited urban space. At the same time, new challenges and risks are emerging related to fire safety, as well as the organization of effective fire extinguishing in such facilities. The article discusses the current issues and features of organizing fire extinguishing measures at these facilities. Special attention is paid to the legal regulation and requirements for ensuring fire safety of high-rise buildings at all stages — from design to operation. The authors emphasize that traditional firefighting methods and techniques are often ineffective due to the specific architectural and structural features of high-rise buildings, the difficulty of evacuating people, and the limited access of firefighting crews to the source of the fire. In this regard, the article raises the need for an integrated approach to fire safety management, including the joint work of designers, operating personnel, and units of the State Fire Service. Modern technical means and safety systems (such as automatic fire extinguishing systems, smoke extraction systems, communication and notification systems) are considered, and examples of the effective use of innovative technologies in firefighting are given. The importance of regular personnel training and practicing, as well as interaction between services in emergency situations, is emphasized. The report concludes by emphasizing the need for further improvements to the regulatory framework, the implementation of new technologies, and the professional development of all those involved in high-rise fire protection. This, taken together, will significantly reduce the risk of emergencies and improve residential safety in modern cities.

Keywords: fires, high-rise buildings, multi-story buildings, extinguishing organization, fire safety, rescue operations

For citation: On the issue of organizing fire extinguishing in high-rise buildings and multi-story buildings / P. V. Arkanov et al. // *Technosphere safety*. 2026. No. 2 (51). P. 13–23.

Введение

Высотное строительство в современных мегаполисах становится архитектурной доминантой и необходимостью, обусловленной решением социальных, экономических и градостроительных задач. Использование новых строительных и планировочных решений позволяет создавать уникальные multifunctional комплексы, вклю-

чающие жилые, офисные и общественные пространства. Вместе с тем стремительное увеличение числа высотных зданий предъявляет повышенные требования к обеспечению их пожарной безопасности.

Екатеринбург, один из крупных мегаполисов России, на протяжении последних десятилетий демонстрирует высокие темпы строительства высотных и сверхвысотных зданий. Крупные проекты, такие как бизнес-центр

«Высоцкий» высотой выше 180 метров, «Башня Исеть» высотой 212 метров, входящая в проект «Екатеринбург-Сити», предусматривают организацию деловых встреч, различных уровней конференций, размещение офисов, способных вместить тысячи жителей и гостей Урала. Эти здания включают в себя гостиничные и офисные помещения, а также объекты общественного назначения: торговые центры, спортивные и развлекательные комплексы.

Несмотря на развитие нормативной базы и совершенствование систем противопожарной защиты, проблема обеспечения эффективной организации и тактики тушения пожаров в высотных зданиях остается одной из наиболее острых. По данным Главного управления МЧС России по Свердловской области, ежегодно в Свердловской области происходит до 8 тыс. пожаров, значительная часть которых сопряжена с риском для жизни людей и масштабным материальным ущербом. Реальная готовность пожарных подразделений к борьбе с огнем на больших высотах и способность оперативных подразделений адекватно реагировать на угрозы в сложных условиях мегаполиса — вопросы, которые требуют системного научного анализа и поиска оптимальных решений.

Цель данной статьи — рассмотреть основные проблемы, возникающие при тушении пожаров в высотных зданиях, проанализировать современные подходы и выработать рекомендации по дальнейшему повышению эффективности действий пожарных подразделений в условиях плотной многоэтажной застройки.

Материалы и методы исследования

Анализ проблематики организации тушения пожаров в высотных зданиях

опирался на комплексный междисциплинарный подход, включающий тщательное изучение нормативно-правовой базы Российской Федерации, всесторонний анализ действующих отраслевых стандартов и рекомендаций, а также глубокое рассмотрение практического опыта работы пожарно-спасательных подразделений пожарной охраны Екатеринбурга. В процессе исследования были задействованы официальные статистические и аналитические данные МЧС России, собранные за последние годы, по динамике и обстоятельствам возникновения пожаров на территории Свердловской области [1, 2]. Дополнительно использовались материалы научно-исследовательских работ ведущих российских и зарубежных специалистов, занимающихся вопросами пожарной безопасности, функционирования систем противопожарной защиты и управления гражданской обороной.

Методологическая база исследования включала подробный анализ и систематизацию сведений о реальных случаях возникновения и ликвидации пожаров в высотных зданиях различного назначения и этажности. Особое внимание уделялось рассмотрению проектных и конструктивных особенностей современных высотных зданий, формированию и анализу схем эвакуации людей, выявлению наличия и состояния противопожарных систем различного типа (системы автоматического пожаротушения, системы дымоудаления, системы внутреннего противопожарного водоснабжения и аварийного оповещения). Важную роль играли экспертные интервью с сотрудниками профильных подразделений пожарной охраны, имеющими опыт непосредственного участия в тушении пожаров на объектах повышенной этажности, что позволило выявить ряд

организационных и технических факторов, влияющих на успешность действий.

В исследовании также были систематизированы данные по уровню материально-технического оснащения пожарных частей Екатеринбурга, подробно проанализирована их готовность к проведению аварийно-спасательных работ в сложных городских условиях, обусловленных высотностью и плотной застройкой. Для уточнения аспектов тактического планирования применялись расчетные методики определения требуемых расходов огнетушащих веществ и параметров подачи воды на значительные высоты с учетом напорных потерь и особенностей используемого оборудования.

Обоснования и выводы, представленные в данной статье, базируются на сопоставлении существующих нормативных требований, сложившейся практики и анализа конкретных происшествий. Особое внимание уделено типовым техническим трудностям, связанным с особенностями городской застройки, внутридомовыми коммуникациями, факторами массовой эвакуации и взаимодействия различных экстренных служб. Такой подход позволяет заключить, что эффективная организация тушения пожаров в высотных зданиях требует постоянного совершенствования нормативов, технических средств и повышения уровня профессиональной подготовки сотрудников пожарно-спасательных подразделений.

Результаты исследования и обсуждение

Среди всех пожаров, происходящих в Екатеринбурге, события, развивающиеся в зданиях повышенной этажности, особенно выделяются своей сложностью, масштабностью и потенциальной опасностью

для людей и городской инфраструктуры. Высотные здания при возникновении пожара становятся крайне сложными объектами для проведения аварийно-спасательных работ, а также требуют нестандартных подходов к организации тушения огня и спасения людей. По имеющейся статистике, примерно 80–90 % всех жертв, погибших при пожарах, приходится именно на случаи возгорания в многоэтажных жилых и общественных зданиях [3]. Кроме того, при подобных происшествиях нередко отмечаются крайне серьезные материальные потери, а организация эффективных спасательных и эвакуационных мероприятий существенно осложняется специфическими особенностями планировочных и инженерных решений высотной городской застройки.

Основными проблемами, с которыми сталкиваются пожарно-спасательные подразделения при ликвидации возгораний в высотных и многоэтажных зданиях, являются:

- задержка времени обнаружения и своевременного сообщения о возгорании в силу большого числа помещений, длинных коридоров и ограниченного визуального контроля, что приводит к позднему реагированию пожарных расчетов и росту степени развития пожара;
- быстрое и опасное распространение дыма и токсичных продуктов горения по вертикальным шахтам, лестничным клеткам и вентиляционным коммуникациям, значительно затрудняющее эвакуацию людей и создающее угрозу здоровью, а порой и жизни находящихся внутри здания;
- ограниченные технические возможности подачи огнетушащих веществ, в первую очередь воды, на большую высоту, что требует применения

специализированного оборудования и повышает требования к надежности внутренних противопожарных водопроводов и насосных устройств;

- длительное и трудоемкое боевое развертывание пожарных подразделений, которое связано с особенностями плотной застройки, ограниченной доступностью проездов для специальной техники, а также необходимостью транспортировки оборудования вручную на значительные высоты;
- недостаточная эффективность работы автоматических противопожарных систем (системы дымоудаления, сигнализации и внутреннего водопровода) из-за технических неисправностей или неправильной эксплуатации;
- трудности при проведении массовой эвакуации и спасательных работ на верхних этажах, обусловленные тем, что эвакуировать большое количество людей из высотных зданий возможно только при скоординированных совместных действиях экстренных служб, достаточном количестве путей эвакуации и четких инструкциях для жильцов, а в случае нарушения одного из этих условий возникает реальный риск увеличения числа пострадавших.

Следует отметить, что даже максимально надежная и современная противопожарная система здания не может полностью исключить риски для жителей и персонала — в условиях реального пожара всегда существует человеческий фактор, ошибки эксплуатации или обслуживания, а также накопившееся оборудование, которое может выйти из строя [4].

Одной из ключевых особенностей высотных зданий считается их разнообразная

планировка жилых, общественных и административных пространств. Существуют три основных типа планировок этажей: коридорная, секционная и офисная (открытая).

Коридорная планировка особенно опасна с точки зрения распространения огня: при отсутствии своевременной локализации пожар может охватить весь коридор за считанные минуты. При этом все помещения, двери которых выходят в коридор, оказываются отрезанными, и проведение спасательных работ возможно только при условии использования специальных средств (например, автолестниц или спасательных рукавов через окна).

Секционная планировка предоставляет более локализованную зону возгорания, однако в случае, когда общие холлы служат центром развития пожара, площадь задымления и горения также быстро увеличивается.

Офисные пространства, характеризующиеся единым объемом (Open Space), обладают максимальной потенциальной зоной для распространения пламени и дыма, что требует особенно оперативной реакции и грамотного распределения сил и средств.

Время от возникновения пожара до прибытия первых подразделений и начала боевого развертывания оказывает решающее влияние на масштаб происшествия. Здесь критически важны скорость обнаружения пожара, эффективность автоматических систем сигнализации и четкость действий дежурного персонала.

Согласно анализу пожаров в Екатеринбурге, основной проблемой становится запоздалое сообщение о возгорании: если в первые 5–7 минут пожар удастся локализовать первичными средствами пожаротушения (внутренние пожарные краны,

огнетушители), площадь поражения минимальна. Однако в реальности этот временной интервал часто растягивается до 15–20 минут, особенно в ночные и выходные часы либо при отсутствии обслуживающего персонала [5].

Прокладка рукавных линий на этажи, расположенные выше 10–15-го, требует значительных временных затрат. При отсутствии работающих внутренних систем водоснабжения пожарные вынуждены использовать внешние средства (автолестницы, насосы), что затруднено особенностями стилобатной части здания и плотной городской застройкой.

Одним из основных технических вызовов является подача воды на высотные отметки. Использование стандартной пожарной техники в теории позволяет подавать воду только до 90 м при идеальных условиях. Пожарные автомобили с насосами высокого давления способны увеличивать этот показатель, однако снижается максимальный расход воды, а требования к состоянию оборудования, подготовке личного состава и оперативности возрастают.

Внутренний противопожарный водопровод зачастую рассчитан на подачу воды лишь в режиме локализации небольших очагов возгорания. Для крупных пожаров расход воды может превышать 30–50 литров в секунду, при этом большинство систем внутреннего водоснабжения обеспечивают лишь 8–10 литров в секунду. Усиление давления и организация подпитки через «сухотрубы» требует наличия специализированных насосов, которые на данный момент не в полной мере представлены в боевом расчете городских гарнизонов.

Для повышения эффективности подачи воды возможно применение спаренных

насосов, промежуточных емкостей, а также организация подачи через несколько контуров. Однако эти меры увеличивают время разворачивания, требуют от пожарных высокого уровня подготовки и отработки взаимодействия на пожарно-тактических учениях [6].

Спасение жителей и персонала при пожаре в высотных зданиях — оперативно-тактическая задача первой категории. При масштабных задымлениях самостоятельная эвакуация зачастую невозможна, особенно для жителей верхних этажей, людей с ограниченными возможностями и детей.

Пути спасения:

- использование незадымляемых лестничных клеток (с принудительной вентиляцией);
- эвакуация по специальным аварийным рукавам и трапам;
- проведение спасательных работ с использованием автолестниц и подъемников (ограничено высотой);
- эвакуация через крышу с применением вертолетов (крайне тяжелое и опасное мероприятие).

В ряде случаев спасательные работы проводятся параллельно с тушением пожара, но, если ресурсов не хватает, приоритет отдается спасению людей. Проведение массовой эвакуации осложняется тем, что большинство современных высотных зданий имеют сложную внутреннюю планировку и большое количество вертикальных коммуникаций (лифтовые шахты, технические этажи, балконы).

Осложняющим фактором становится инертность реагирования обслуживающего персонала. По стандартам, дежурный (или охрана) обязан немедленно включать системы дымоудаления, заранее сообщать

по номерам «01» или «112» организовать открытие дверей, обеспечить встречу пожарных подразделений. Нередко этот порядок нарушается или исполняется не полностью [7].

Техническая готовность гарнизона к тушению пожаров в высотных зданиях в настоящий момент остается недостаточной. Существующая пожарная техника ограничена грузоподъемностью и рабочими высотами. Только небольшая часть автолестниц и подъемников способна работать на высотах, превышающих 50–60 метров. Также существует необходимость в грамотной подготовке операторов управления пожарными автолестницами и пожарными коленчатыми подъемниками, дающей не только базовые знания об устройстве и основах управления, но и достаточные навыки эксплуатации высотной техники в условиях существующих реалий [8]. Применение вертолетов и иных средств ограничено погодными условиями, плотной городской застройкой, отсутствием специальных площадок.

Серьезное значение имеет уровень подготовки личного состава. Высотные здания зачастую требуют уникальных тактических решений, мгновенной ориентации в сложной ситуации, грамотного взаимодействия с персоналом объекта и соседними службами. Проведение учений, разработка подробных планов эвакуации для каждого конкретного комплекса — не роскошь, а необходимость.

Практически на каждом пожаре требуются дополнительные силы для разведки систем жизнеобеспечения и эвакуации, а главное — координация действий сразу нескольких подразделений и служб города. Ошибки руководителя тушения пожара на первых этапах критичны и могут привести к невосполнимым потерям [9].

Анализ показывает: ни отдельные технические или организационные меры, ни самая совершенная пожарная техника не в силах гарантировать исключение критических инцидентов при пожарах в высотных зданиях. Только комплексный подход — сочетание жесткого соблюдения нормативных требований на этапе проектирования и строительства, внимательной эксплуатации и регулярной подготовки персонала и пожарных подразделений — способен снизить риски до приемлемого уровня.

Это подтверждают и зарубежные примеры (США, Япония, ОАЭ, Китай): в крупнейших мегаполисах подготовка к ликвидации пожара в высотном здании строится на межведомственном взаимодействии, внедрении сверхмощных насосных агрегатов, организации вертолетных площадок, использовании роботов-разведчиков, обязательных планах эвакуации, регулярных массовых учениях [10].

В США опыт борьбы с пожарами в небоскребах стал предметом пристального внимания как специалистов, так и городской администрации. В крупнейших мегаполисах, таких как Нью-Йорк и Чикаго, проводятся регулярные пожарные учения непосредственно в высотных зданиях. Главный акцент делается на отработке слаженной и быстрой эвакуации жильцов и офисных работников, а также на координации действий между пожарными, полицией и медицинскими службами. Для создания максимально реалистичных условий широко применяются симуляции задымления, работа автоматических систем оповещения и дымоудаления. Современные небоскребы в США оснащаются так называемыми «эвакуационными лифтами», специально предназначенными

для использования в случае пожара, что значительно ускоряет вывод людей с верхних этажей. Особое внимание уделяется отработке действий при нестандартных ситуациях: в крупных городах регулярно устраивают масштабные тренировки с имитацией не только пожаров, но и терактов, при которых участвуют специализированные спасательные машины, вертолеты и даже дроны для аэроразведки. Такой комплексный подход позволяет минимизировать возможные потери и быстро реагировать на угрозу.

В Японии пожарная безопасность высотных зданий тесно переплетена с задачей защиты от землетрясений. История страны показывает, что нередко именно после подземных толчков возникают масштабные пожары из-за повреждения коммуникаций. Поэтому во время учений пожарной эвакуации обычно отрабатываются действия с учетом возможного обрушения конструкций и образования препятствий на пути людей. Японские инженеры внедряют в высотные здания сейсмоустойчивые конструкции, что снижает риск разрушений и возникновения очагов возгорания. Кроме того, в зданиях устанавливаются автоматические системы обнаружения и локализации пожара, а также специальные эвакуационные спуски — наружные горки или закрытые скаты, позволяющие быстро покинуть высотку в экстренной ситуации. Регулярные тренировки получают широкую поддержку и на государственном уровне: проводятся дни пожарной безопасности, в которых принимают участие жители, школьники и сотрудники офисов.

В ОАЭ безопасность небоскребов стоит особенно остро из-за большого количества высотных зданий из стекла и алюминия, а также высоких температур воздуха в течение всего года. Смертельно опасным при

пожаре становится не только открытое пламя, но и стремительное распространение дыма вверх по шахтам лифтов и вентканалам. Одной из самых известных разработок последних лет стало использование модернизированных вертолетов Black Hawk с выдвижными водяными пушками длиной 20 и более метров. Такие воздушные пожарные платформы могут достигать самых верхних этажей даже самых высоких башен в Дубае и Абу-Даби, обеспечивая доставку воды или пены на очаг возгорания, недоступный для стандартных автолестниц.

Китай также выделяется современным подходом к решению проблемы. В условиях стремительного строительства жилых, коммерческих и офисных высоток власти сделали упор на строгий контроль за противопожарными мероприятиями. Во всех зданиях регулярные массовые эвакуационные тренировки стали обязательными для владельцев и арендаторов помещений, причем отдельно проводится проверка работы лифтов — в современных домах используются модели, обладающие функциями блокировки и безопасной доставки людей даже при ЧП. Системы дымоудаления испытывают не только на работоспособность датчиков, но и на скорость фильтрации воздуха и возможность поддерживать коридоры и лестничные клетки чистыми от дыма на протяжении всего времени эвакуации. Инженерный прорыв последних лет — внедрение интеллектуальных систем предотвращения пожаров. Например, система SureFire сочетает «умные» датчики и камеры видеоаналитики, подключенные к искусственному интеллекту. В режиме реального времени она анализирует не только физические параметры среды (температуру, задымленность, движение людей), но и оценивает вероятность возникновения

ЧП, может выдавать автоматические сигналы тревоги и помогать службам спасения планировать наиболее эффективные маршруты эвакуации.

Заключение

Развитие высотного строительства в Екатеринбурге и других мегаполисах России — процесс необратимый, направленный на решение сложных социально-экономических задач. Вместе с тем этот прогресс неминуемо приводит к появлению новых, ранее не характерных для отечественной практики угроз: быстрое развитие пожаров на верхних этажах, трудности при проведении спасательных работ, ограниченность пожарной техники и сложность взаимодействия между службами.

Ключевые выводы, которые можно сформулировать по итогам проведенного исследования:

1. Проблемы тушения пожаров в высотных зданиях касаются как технического уровня оснащения, так и организационно-управленческих решений на этапе проектирования, строительства и эксплуатации.
2. Решающее значение имеют время обнаружения и сообщение о пожаре,

состояние и работоспособность автоматических противопожарных систем, четкая подготовка обслуживающего персонала объектов.

3. Крайне важна регулярная организация совместных учений и плановых проверок пожарных расчетов, персонала комплексов и смежных служб.

4. Необходимость модернизации парка пожарной техники, внедрение насосов высокого давления и средств для транспортировки воды и огнетушащих веществ на большие высоты есть стратегическая задача для городских гарнизонов.

5. Требуется последовательное внедрение систем внутреннего противопожарного водоснабжения, расчет которых соответствует действительным, а не номинальным параметрам теоретического пожара.

6. Создание собственных команд противопожарной защиты на объектах, оснащенных средствами спасения и базовыми навыками эвакуации, — дополнительная гарантия устойчивости систем.

Только совокупность этих мер позволит постепенно обеспечить надлежащую защиту жизни и имущества граждан, а также минимизировать потери от пожаров в условиях современного высотного строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ обстановки с пожарами и их последствиями на территории Свердловской области за 12 месяцев 2024 года / Главное управление МЧС России по Свердловской области. URL: <https://clck.ru/VtLqs> (дата обращения: 02.03.2026).
2. Анализ обстановки с пожарами и их последствиями на территории Свердловской области за 12 месяцев 2023 года / Главное управление МЧС России по Свердловской области. URL: <https://clck.ru/VyWUT> (дата обращения: 02.03.2026).

3. Пожары и пожарная безопасность в 2023 г. Статистика пожаров и их последствий : инф.-аналит. сборник / В. С. Гончаренко [и др.]. Балашиха, 2024. 110 с.
4. Теребнев В. В., Артемьев Н. С., Подгрушный А. В. Пожаротушение в жилых и общественных зданиях. Екатеринбург, 2011. 208 с.
5. Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. М., 1987. 288 с.
6. О пожарной безопасности : Федер. закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ : принят Государственной Думой 18.11.1994 // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. URL: <https://clck.su/qtCoV> (дата обращения: 02.04.2025).
7. Подгрушный А. В., Денисов А. Н., Хонг Ч. Д. Современные проблемы тушения пожаров в зданиях повышенной этажности и высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. 2007. Т. 16, № 6. С. 53–57. URL: <https://clck.su/cTVAh> (дата обращения: 25.09.2025).
8. Рассохин М. А., Юркин А. В., Перевалов А. С. Особенности обеспечения промышленной безопасности высотной аварийно-спасательной техники, оборудованной современными системами безопасности, управления и контроля // Техносферная безопасность. 2021. № 1 (30). С. 79–84. URL: <https://clck.su/dPgVg> (дата обращения: 06.11.2025).
9. Белорожев О. Н., Абрамов А. В. Особенности организации действий по тушению пожаров в зданиях повышенной этажности // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2016. Т. 1, № 1 (7). С. 302–304. URL: <https://clck.su/GGzId> (дата обращения: 07.11.2025).
10. Стелов А. В. Моделирование процессов тушения пожаров в зданиях повышенной этажности и эвакуации // Перспективы науки. 2018. № 7 (106). С. 67–72. URL: <https://clck.su/ZlYcz> (дата обращения: 06.11.2025).

REFERENCES

1. Analysis of the situation with fires and their consequences in the Sverdlovsk region for 12 months of 2024. URL: <https://clck.su/VtLqs> (accessed 02.03.2026).
2. Analysis of the situation with fires and their consequences in the Sverdlovsk region for 12 months of 2023. URL: <https://clck.su/VyWUT> (accessed 02.03.2026).
3. Fires and fire safety in 2023. Statistics on fires and their consequences : information and analytical collection / V. S. Goncharenko et al. Balashikha, 2024. 110 p.
4. Terebnev V. V., Artemyev N. S., Podgrushny A. V. Firefighting in residential and public buildings. Yekaterinburg, 2011. 208 p.
5. Ivannikov V. P., Klyus P. P. Handbook of the fire extinguishing supervisor. Moscow, 1987. 288 p.
6. On Fire Safety : Federal Law No. 69-FZ : adopted by the State Duma on 18.11.1994 // ConsultantPlus. URL: <https://clck.su/qtCoV> (accessed 02.04.2025).
7. Podgrushny A. V., Denisov A. N., Hong C. D. Modern problems of fire extinguishing in high-rise buildings and high-rise buildings // Fire and explosion safety. 2007. Vol. 16. No. 6. P. 53–57. URL: <https://clck.su/cTVAh> (accessed 25.09.2025).
8. Rassokhin M. A., Yurkin A. V., Perevalov A. S. Features of ensuring industrial safety of high-altitude rescue equipment equipped with modern safety, management and control systems. // Technosphere safety. 2021. No. 1 (30). P. 79–84. URL: <https://clck.su/dPgVg> (accessed 06.11.2025).

9. Belorozhev O. N., Abramov A. V. Peculiarities of organizing firefighting actions in high-rise buildings // Fire Safety: Problems and Perspectives. 2016. Vol. 1. No. 1 (7). P. 302–304. URL: <https://clck.su/GGzId> (accessed 07.11.2025).

10. Strelov A. V. Modeling of firefighting and evacuation processes in high-rise buildings // Perspectives of Science. 2018. No. 7 (106). P. 67–72. URL: <https://clck.su/ZlYcz> (accessed 06.11.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Арканов Петр Викторович, канд. с.-х. наук, заместитель начальника кафедры специальной подготовки Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); AuthorID: 840313; SPIN-код: 9741-8727; e-mail: uri.ppv@yandex.ru

Дьяков Максим Викторович, канд. с.-х. наук, доцент, начальник кафедры пожаротушения и аварийно-спасательных работ Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); AuthorID: 846760, SPIN-код: 8544-6324; e-mail: kapral96-86@mail.ru

Беренгардт Михаил Александрович, преподаватель кафедры специальной подготовки Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); AuthorID: 1063265; SPIN-код: 7601-8799; e-mail: Berengardt2009@rambler.ru

Горенков Павел Александрович, преподаватель кафедры специальной подготовки Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); AuthorID: 1153118; SPIN-код: 3807-0408; e-mail: zero517@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petr V. Arkanov, Cand. Sci. (Agricul.), Deputy Head of the Department of Special Training, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); AuthorID: 84031; SPIN-code: 9741-8727; e-mail: uri.ppv@yandex.ru

Maxim V. Dyakov, Cand. Sci. (Agricul.), Associate Professor, Acting Head of the Department of Firefighting and Emergency Rescue Operations, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); AuthorID: 846760; SPIN-code: 8544-6324; e-mail: kapral96-86@mail.ru

Mikhail A. Berengardt, Teacher of the Department of Special Training, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); AuthorID: 1063265; SPIN-code: 7601-8799; e-mail: Berengardt2009@rambler.ru

Pavel A. Gorenkov, Teacher of the Department of Special Training, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); AuthorID: 1153118; SPIN-code: 3807-0408; e-mail: zero517@mail.ru

УДК 614.849

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИГОДНОСТИ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЯМОГО МАТЕРИАЛЬНОГО УЩЕРБА ОТ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ЗА ПЕРИОД 2017–2024 ГГ.

Пичуева Елизавета Дмитриевна, Худякова Светлана Александровна, Шевелева Виктория Владимировна

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

Аннотация. В статье рассматривается вопрос минимизации экономических потерь и повышения уровня безопасности за счет прогнозирования прямого материального ущерба от пожаров на территории Российской Федерации. В качестве исходного материала использованы официальные статистические данные ФГБУ ВНИИПО МЧС России за период 2017–2024 гг. Для наиболее стабильного анализа данные разделены по кварталам. Для анализа и прогнозирования показателей применены адаптивные методы обработки временных рядов, включая взвешенную скользящую среднюю и метод экспоненциального сглаживания Брауна. В ходе исследования выполнено предварительное сглаживание временного ряда с различным числом членов, по результатам которого в качестве оптимального выбран трехчленный вариант, а также экспоненциальное сглаживание с различными значениями коэффициента сглаживания. Проведено сравнение моделей по критерию среднеквадратичной ошибки. Полученные результаты подтверждают адекватность, устойчивость и целесообразность использования метода Брауна для краткосрочного прогнозирования экономических последствий пожаров. Модель может быть использована в практике анализа планирования бюджетных расходов и принятия управленческих решений в сфере обеспечения пожарной безопасности.

Ключевые слова: пожары, прогнозирование, прямой материальный ущерб, временные ряды, адаптивный метод анализа, выбор параметров модели, экспоненциальное сглаживание, взвешенная скользящая средняя, пожарная безопасность

Для цитирования: Пичуева Е. Д., Худякова С. А., Шевелева В. В. Исследование пригодности адаптивной модели для прогнозирования прямого материального ущерба от пожаров на территории Российской Федерации за период 2017–2024 гг. // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 24–36.

RESEARCH ON THE SUITABILITY OF AN ADAPTIVE MODEL FOR PREDICTING DIRECT MATERIAL DAMAGE FROM FIRES IN THE RUSSIAN FEDERATION FOR THE PERIOD 2017–2024

Elizaveta D. Pichueva, Svetlana A. Khudyakova, Victoria V. Sheveleva
UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This article examines the problem of improving forecasting of direct material damage from fires in the Russian Federation. Official statistical data from the All-Russian Research Institute of Fire Defense of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies, and Elimination of Consequences of Natural Disasters for the period 2017–2024 were used as source material. To ensure a more stable analysis, the data were divided by quarter. Adaptive time series processing methods, including a weighted moving average and Brown's exponential smoothing method, were used to analyze and forecast the indicators. The study included preliminary smoothing of the time series with varying numbers of terms, which resulted in the selection of a three-term variant as the optimal one. Exponential smoothing was then performed with various values of the smoothing coefficient, and the models were compared using the root-mean-square error criterion. The obtained results confirm the adequacy, stability, and feasibility of using Brown's method for short-term forecasting of the economic impact of fires. The model can be used in the practice of analyzing budget expenditure planning and making management decisions in the field of fire safety.

Keywords: forecasting, direct material damage from fires, adaptive method of time series analysis, selection of model parameter, exponential smoothing, weighted moving average, fire safety

For citation: Pichueva E. D., Khudyakova S. A., Sheveleva V. V. Research on the suitability of an adaptive model for predicting direct material damage from fires in the Russian Federation for the period 2017–2024 // Technospheric safety. 2026. No. 2 (51). P. 24–36.

Введение

Последствия пожаров носят комплексный характер и проявляются в экологической, социальной и экономической сферах. В рамках данной работы основное внимание уделяется экономической составляющей, а именно прямому материальному ущербу. Пожары оказывают общее существенное влияние на экономику страны, приводя к уничтожению и повреждению жилых, промышленных и коммерческих зданий и сооружений, утрате личного имущества граждан, а также собственности предприятий и государства. Дополнительную финансовую нагрузку формируют затраты на ликвидацию последствий пожаров и восстановление пострадавших территорий.

С 2019 г. суммарный прямой материальный ущерб от пожаров в регионах Российской Федерации ежегодно превышает 16 млн руб. (рис. 1), что подчеркивает необходимость разработки эффективных инструментов прогнозирования [1–3]. Между числом пожаров и материальным ущербом выявлена средняя положительная корреляционная связь [4].

Достоверный прогноз ущерба помогает перейти от реактивных мер к проактивному управлению рисками, научно обосновывать бюджетные распределения, оптимизировать размещение сил и средств пожарной охраны, а также разрабатывать и корректировать профилактические мероприятия. Таким образом, модели прогнозирования прямого материального ущерба являются важным инструментом минимизации экономических потерь и повышения уровня безопасности.



Рис. 1. Прямой материальный ущерб от пожаров за 2019–2024 гг., млн руб. в год

Fig. 1. Direct material damage per year for 2019–2024, million rubles

Основная часть

В качестве исходной информации использованы статистические данные ФГБУ ВНИИПО МЧС России о прямом материальном ущербе от пожаров на территории Российской Федерации за период 2017–2024 гг. [1–3]. Для повышения устойчивости анализа и выявления сезонных колебаний данные были разделены по кварталам, в результате чего сформирован временной ряд, содержащий 32 наблюдения (табл. 1).

Цель исследования — проба и анализ метода краткосрочного прогнозирования прямого материального ущерба от пожаров на основе адаптивных методов анализа временных рядов и выбор оптимальных параметров модели по критерию точности прогноза [5, 6].

Для прогнозирования показателей, характеризующихся динамичностью и возможными резкими колебаниями, целесообразно применять адаптивные статистические методы. Их основное преимущество заключается в отсутствии необходимости использования дополнительной информации, а также способности учитывать неоднородность и нестабильность исходных данных.

Процесс прогнозирования включает в себя два основных этапа: первичное выравнивание временного ряда с целью сглажи-

вания случайных колебаний и последующую корректировку значений для получения прогноза. В рамках исследования были проделаны следующие шаги:

- 1) сглаживание временного ряда методом взвешенной скользящей средней с различными периодами сглаживания;
- 2) выполнение экспоненциального сглаживания с различными значениями коэффициента α ;
- 3) прогнозирование методом Брауна с аналогичными значениями коэффициента α .

В качестве базового метода прогнозирования выбран метод Брауна, основанный на простом экспоненциальном сглаживании. Широкое применение данного метода обусловлено его относительной простотой, наглядностью и достаточной точностью при краткосрочном прогнозировании. Прогноз значения показателя на период $(t + 1)$ формируется на основе прогноза предыдущего периода с учетом доли ошибки прогноза, определяемой коэффициентом сглаживания α .

К преимуществам метода Брауна относится его адекватная реакция на резкие изменения уровней временного ряда. В то же время недостатком является чувствительность прогноза к значениям предыдущих периодов, что требует обоснованного выбора коэффициента сглаживания.

Таблица 1
Значения прямого материального ущерба от пожаров на территории
Российской Федерации за период 2017–2024 гг.

Table 1
Direct material damage caused by fires in the Russian Federation
for the period 2017–2024

Год Year	Квартал Quarter	Прямой материальный ущерб, тыс. руб. Direct material damage, thousand rubles	Год Year	Квартал Quarter	Прямой материальный ущерб, тыс. руб. Direct material damage, thousand rubles
2017	I	4 273 309	2021	I	4 214 934
	II	3 399 067		II	3 976 785
	III	2 919 328		III	2 890 944
	IV	3 175 675		IV	5 166 033
2018	I	3 550 182	2022	I	4 591 596
	II	3 976 681		II	4 435 589
	III	2 547 268		III	4 693 042
	IV	5 443 025		IV	4 980 882
2019	I	5 260 731	2023	I	4 301 066
	II	4 144 726		II	5 190 366
	III	3 822 241		III	5 938 266
	IV	4 942 668		IV	6 755 733
2020	I	8 356 592	2024	I	5 349 951
	II	3 790 052		II	5 003 262
	III	4 296 771		III	5 663 758
	IV	4 432 888		IV	3 714 096

На первом этапе исследования было выполнено сглаживание временного ряда методом взвешенной скользящей средней с использованием периодов сглаживания: 3, 5 и 7. При расчете взвешенных скользящих средних могут быть использованы

веса — коэффициенты бинома Ньютона (табл. 2). В этом случае используется формула средней арифметической взвешенной [5, 6]:

$$\bar{y}_t = \frac{\sum y_t k}{\sum \sum k}, \tag{1}$$

где:

- $\bar{y}_t$ — скользящая средняя;
- y_t — фактические уровни динамического ряда на активном интервале сглаживания длиной n ;
- k — коэффициенты бинома Ньютона.

Таблица 2
Биномиальные коэффициенты
 Table 2
 Binomial Coefficients

Интервал сглаживания Smoothing interval	Коэффициенты бинома Ньютона, k Newton's binomial coefficients, k	Сумма коэффициентов бинома Ньютона The sum of the weights
3	1; 2; 1	4
5	1; 4; 6; 4; 1	16
7	1; 6; 15; 20; 15; 6; 1	64

Первые значения составили:

3-членная простая скользящая средняя

$$\bar{y}_{2017, II \text{ кв.}} = \frac{1 \cdot 4273309 + 2 \cdot 3399067 + 1 \cdot 2919328}{1 + 2 + 1} = 3497693;$$

5-членная простая скользящая средняя:

$$\bar{y}_{2017, III \text{ кв.}} = \frac{1 \cdot 4273309 + 4 \cdot 3399067 + 6 \cdot 2919328 + 4 \cdot 3175675 + 1 \cdot 3550182}{1 + 4 + 6 + 4 + 1} = 3227402;$$

7-членная простая скользящая средняя:

$$\bar{y}_{2017, IV \text{ кв.}} = \frac{1}{1+6+15+20+15+6+1} \cdot (1 \cdot 4273309 + 6 \cdot 3399067 + 15 \cdot 2919328 + 20 \cdot 3175675 + 15 \cdot 3550182 + 6 \cdot 3976681 + 1 \cdot 2547268) = 3306738.$$

Результаты сглаживания временного ряда представлены в табл. 3.

Таблица 3
Значения сглаживания временного ряда методом взвешенной скользящей средней
с использованием различных периодов сглаживания
 Table 3
 Smoothing values of a time series using the weighted moving average method with different
 smoothing periods

Год Year	Квартал Quarter	Прямой материальный ущерб, тыс. руб. Direct material damage, thousand rubles	3-членная взвешенная скользящая средняя 3-term weighted moving average	5-членная взвешенная скользящая средняя 5-term weighted moving average	7-членная взвешенная скользящая средняя 7-term weighted moving average
2017	I	4 273 309	—	—	—
	II	3 399 067	3 497 693	—	—
	III	2 919 328	3 103 350	3 227 402	—
	IV	3 175 675	3 205 215	3 269 240	3 306 738
2018	I	3 550 182	3 563 180	3 461 070	3 436 416
	II	3 976 681	3 512 703	3 554 287	3 607 619
	III	2 547 268	3 628 561	3 860 834	3 944 169
	IV	5 443 025	4 673 512	4 500 722	4 407 521

Окончание таблицы 3

Год Year	Квартал Quarter	Прямой материальный ущерб, тыс. руб. Direct material damage, thousand rubles	3-членная взвешенная скользящая средняя 3-term weighted moving average	5-членная взвешенная скользящая средняя 5-term weighted moving average	7-членная взвешенная скользящая средняя 7-term weighted moving average
2019	I	5 260 731	5 027 303	4 767 806	4 627 614
	II	4 144 726	4 343 106	4 474 121	4 568 080
	III	3 822 241	4 182 969	4 556 272	4 745 199
	IV	4 942 668	5 516 042	5 394 132	5 292 219
2020	I	8 356 592	6 361 476	5 824 340	5 553 349
	II	3 790 052	5 058 367	5 170 583	5 154 562
	III	4 296 771	4 204 121	4 452 745	4 587 940
	IV	4 432 888	4 344 370	4 275 687	4 284 092
2021	I	4 214 934	4 209 885	4 132 251	4 101 971
	II	3 976 785	3 764 862	3 867 696	3 946 965
	III	2 890 944	3 731 177	3 920 217	4 010 450
	IV	5 166 033	4 453 652	4 333 671	4 295 953
2022	I	4 591 596	4 696 204	4 596 253	4 536 216
	II	4 435 589	4 538 954	4 618 688	4 625 857
	III	4 693 042	4 700 639	4 669 800	4 669 067
	IV	4 980 882	4 738 968	4 717 980	4 731 482
2023	I	4 301 066	4 693 345	4 820 169	4 899 519
	II	5 190 366	5 155 016	5 239 759	5 279 062
	III	5 938 266	5 955 658	5 816 563	5 716 360
	IV	6 755 733	6 199 921	5 992 556	5 868 195
2024	I	5 349 951	5 614 724	5 671 107	5 654 696
	II	5 003 262	5 255 058	5 284 015	—
	III	5 663 758	5 011 219	—	—
	IV	3 714 096	—	—	—

Сравнительный анализ показал, что наилучшее выравнивание и минимальное искажение динамики достигается при использовании 3-членной взвешенной скользящей средней, которая была выбрана в качестве основы для дальнейших расчетов (рис. 2).

Далее на базе полученного сглаженного ряда было проведено экспоненциальное сглаживание с различными значениями коэффициента α : 0,06; 0,1; 0,5; 0,9. Значение коэффициента 0,06 вычислено по формуле:

$$\alpha = \frac{2}{n+1}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (2)$$

где n — количество наблюдений.

Экспоненциальное сглаживание вычисляется по формуле:

$$\bar{S}_t = \alpha \cdot \bar{y}_t + (1 - \alpha) \cdot \bar{S}_{t-1}, \quad (3)$$

где $\bar{S}_t$ — результат экспоненциального сглаживания;
 a — коэффициент влияния прошлого значения;
 y_t — скользящая средняя;
 $\bar{S}_{t-1}$ — результат экспоненциального сглаживания предшествующего периода.

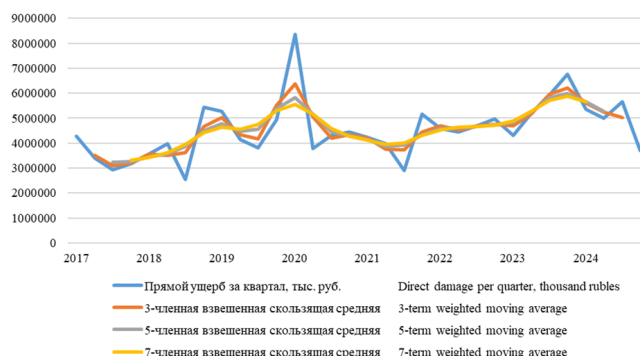


Рис. 2. Графики исходного и сглаженных временных рядов объемов прямого ущерба от пожаров

Fig. 2. Plots of raw and smoothed time series of direct fire damage volumes

Для каждой модели была рассчитана среднеквадратичная ошибка прогноза по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (y_t - \bar{y}_t)^2}{n}, \quad (4)$$

где:

y_t — фактические уровни динамического ряда на интервале сглаживания длиной n ;

$\bar{y}_t$ — скользящая средняя;

n — количество наблюдений.

Результаты вычислений показали, что наибольшую точность продемонстрировала модель с коэффициентом сглаживания $a = 0,06$ (табл. 4, 5).

Таблица 4

Значения экспоненциального сглаживания с различными значениями коэффициента a

Table 4

Exponential smoothing values with different values of the a coefficient

Год Year	Квартал Quarter	Прямой материальный ущерб, тыс. руб. Direct material damage, thousand rubles	Экспоненциаль- ное сглаживание, $a = 0,06$ Exponential smoothing, $a = 0,06$	Экспоненциаль- ное сглаживание, $a = 0,1$ Exponential smoothing, $a = 0,1$	Экспоненциаль- ное сглаживание, $a = 0,5$ Exponential smoothing, $a = 0,5$	Экспоненциаль- ное сглаживание, $a = 0,9$ Exponential smoothing, $a = 0,9$
2017	I	4 273 309	4 273 309	4 273 309	4 273 309	4 273 309
	II	3 399 067	3 544 230	4 195 747	3 885 501	3 575 254
	III	2 919 328	3 129 802	4 086 508	3 494 425	3 528 064
	IV	3 175 675	3 200 690	3 998 378	3 349 820	3 495 779
2018	I	3 550 182	3 541 431	3 954 858	3 456 500	3 502 519
	II	3 976 681	3 514 427	3 910 643	3 484 602	3 503 537
	III	2 547 268	3 621 712	3 882 435	3 556 581	3 516 040
	IV	5 443 025	4 610 404	3 961 542	4 115 047	3 631 787

Окончание таблицы 4

Год Year	Квартал Quarter	Прямой материальный ущерб, тыс. руб. Direct material damage, thousand rubles	Экспоненциаль- ное сглаживание, $\alpha = 0,06$ Exponential smoothing, $\alpha = 0,06$	Экспоненциаль- ное сглаживание, $\alpha = 0,1$ Exponential smoothing, $\alpha = 0,1$	Экспоненциаль- ное сглаживание, $\alpha = 0,5$ Exponential smoothing, $\alpha = 0,5$	Экспоненциаль- ное сглаживание, $\alpha = 0,9$ Exponential smoothing, $\alpha = 0,9$
2019	I	5 260 731	5 002 289	4 068 119	4 571 175	3 771 339
	II	4 144 726	4 382 657	4 095 617	4 457 140	3 828 515
	III	3 822 241	4 194 950	4 104 352	4 320 055	3 863 961
	IV	4 942 668	5 436 777	4 245 521	4 918 048	4 029 169
2020	I	8 356 592	6 305 994	4 457 117	5 639 762	4 262 400
	II	3 790 052	5 133 224	4 517 242	5 349 064	4 341 996
	III	4 296 771	4 259 867	4 485 930	4 776 592	4 328 209
	IV	4 432 888	4 339 300	4 471 774	4 560 481	4 329 825
2021	I	4 214 934	4 217 650	4 445 585	4 385 183	4 317 831
	II	3 976 785	3 792 029	4 377 513	4 075 023	4 262 534
	III	2 890 944	3 734 828	4 312 879	3 903 100	4 209 398
	IV	5 166 033	4 410 522	4 326 956	4 178 376	4 233 824
2022	I	4 591 596	4 679 063	4 363 881	4 437 290	4 280 062
	II	4 435 589	4 547 361	4 381 388	4 488 122	4 305 951
	III	4 693 042	4 691 442	4 413 313	4 594 380	4 345 420
	IV	4 980 882	4 736 116	4 445 879	4 666 674	4 384 774
2023	I	4 301 066	4 695 911	4 470 625	4 680 010	4 415 632
	II	5 190 366	5 127 470	4 539 064	4 917 513	4 489 570
	III	5 938 266	5 905 966	4 680 724	5 436 585	4 636 179
	IV	6 755 733	6 182 283	4 832 644	5 818 253	4 792 553
2024	I	5 349 951	5 648 778	4 910 852	5 716 489	4 874 770
	II	5 003 262	5 278 681	4 945 272	5 485 773	4 912 799
	III	5 663 758	5 027 266	4 951 867	5 248 496	4 922 641
	IV	3 714 096	—	—	—	—

Таблица 5
Значения среднеквадратичной ошибки для экспоненциального сглаживания
с различными значениями коэффициента α

Table 5
 Results of Mean Squared Error (MSE) for exponential smoothing across different
 α coefficient values

Значение коэффициента α The value of the coefficient α	Среднеквадратическая ошибка Standard deviation
$\alpha = 0,06$	358 394 862 087
$\alpha = 0,1$	1 108 914 955 403
$\alpha = 0,5$	599 108 008 552
$\alpha = 0,9$	1 139 002 401 144

На следующем этапе был реализован метод Брауна для прогнозирования прямого материального ущерба от пожаров. В качестве исходных данных использовались результаты экспоненциального сглаживания с коэффициентом $\alpha = 0,06$.

Аналогично предыдущему этапу, расчеты были выполнены для нескольких значений коэффициента сглаживания: 0,06; 0,1; 0,5; 0,9 (табл. 6).

Прогнозирование на последующий период выполняется по формуле:

$$S_{t+1} = \alpha \cdot y_t + (1 - \alpha) \cdot \bar{S}_t, \quad (5)$$

где:

S_{t+1} — прогнозируемое значение на период $(t + 1)$;

α — коэффициент влияния прошлого значения.

y_t — фактические уровни динамического ряда на активном интервале сглаживания длиной n ;

$\bar{S}_t$ — результат экспоненциального сглаживания.

Таблица 6
Прогнозируемые значения методом Брауна с различными значениями
коэффициента α

Table 6

Predicted values using the Brown method with different values of the α coefficient

Год Year	Квартал Quarter	Прямой материальный ущерб, тыс. руб. Direct material damage, thousand rubles	$\alpha = 0,06$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,9$
2017	I	4 273 309	—	—	—	—
	II	3 399 067	4 273 309	4 273 309	4 273 309	4 273 309
	III	2 919 328	3 535 520	3 529 713	3 471 648	3 413 583
	IV	3 175 675	3 117 174	3 108 755	3 024 565	2 940 375
2018	I	3 550 182	3 199 189	3 198 189	3 188 183	3 178 177
	II	3 976 681	3 541 956	3 542 306	3 545 806	3 549 307
	III	2 547 268	3 542 162	3 560 652	3 745 554	3 930 456
	IV	5 443 025	3 557 246	3 514 268	3 084 490	2 654 712
2019	I	5 260 731	4 660 362	4 693 66	5 026 715	5 359 763
	II	4 144 726	5 017 796	5 028 133	5 131 510	5 234 887
	III	3 822 241	4 368 381	4 358 864	4 263 691	4 168 519
	IV	4 942 668	4 172 588	4 157 679	4 008 596	3 859 512
2020	I	8 356 592	5 407 130	5 387 366	5 189 722	4 992 079
	II	3 790 052	6 429 030	6 511 054	7 331 293	8 151 532
	III	4 296 771	5 050 634	4 998 907	4 461 638	3 924 369
	IV	4 432 888	4 262 081	4 263 557	4 278 319	4 293 081

Окончание таблицы 6

Год Year	Квартал Quarter	Прямой материальный ущерб, тыс. руб. Direct material damage, thousand rubles	$\alpha = 0,06$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,9$
2021	I	4 214 934	4 344 915	4 348 659	4 386 094	4 423 529
	II	3 976 785	4 217 487	4 217 379	4 216 292	4 215 206
	III	2 890 944	3 803 115	3 810 505	3 884 407	3 958 309
	IV	5 166 033	3 684 195	3 650 439	3 312 886	2 975 332
2022	I	4 591 596	4 455 853	4 486 073	4 788 278	5 090 482
	II	4 435 589	4 673 815	4 670 316	4 635 329	4 600 343
	III	4 693 042	4 540 654	4 536 183	4 491 475	4 446 766
	IV	4 980 882	4 691 538	4 691 602	4 692 242	4 692 882
2023	I	4 301 066	4 750 802	4 760 593	4 858 499	4 956 405
	II	5 190 366	4 672 221	4 656 427	4 498 489	4 340 551
	III	5 938 266	5 131 243	5 133 759	5 158 918	5 184 076
	IV	6 755 733	5 907 904	5 909 196	5 922 166	5 935 036
2024	I	5 349 951	6 216 690	6 239 628	6 469 008	6 698 388
	II	5 003 262	5 630 848	5 618 895	5 499 364	5 379 834
	III	5 663 758	5 262 156	5 251 139	5 140 972	5 030 804
	IV	—	—	—	—	—

Оценка точности прогнозов осуществляется на основе среднеквадратической ошибки и процентного отклонения от фактического значения (табл. 7). Результаты показали, что минимальные значения ошибки

соответствуют моделям с коэффициентами сглаживания $\alpha = 0,06$ и $\alpha = 0,1$ (рис. 3), что свидетельствует о высокой устойчивости прогноза при малых значениях параметра сглаживания.

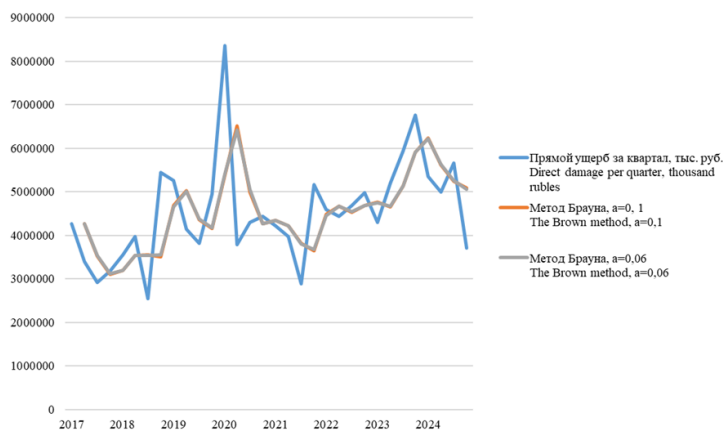


Рис. 3. Графики исходного и прогнозируемого временных рядов

Fig. 3. Plots of original and forecasted time series

Таблица 7
Значения среднеквадратической ошибки и процентного отклонения
от фактического значения временного ряда

Table 7

Root Mean Square Error (RMSE) and Percentage Deviations from Actual Time Series

Значение коэффициента α The value of the coefficient α	Среднеквадратическая ошибка Standard deviation	Процентное отклонение прогноза от фактического значения, % Percentage deviation of the forecast from the actual value, %
$\alpha = 0,06$	1 078 657 280 744	28
$\alpha = 0,1$	1 049 736 805 021	28
$\alpha = 0,5$	1 430 939 533 696	32
$\alpha = 0,9$	1 897 908 142 516	37

Заключение

Проведенное исследование показало, что адаптивные методы анализа временных рядов, в частности метод Брауна, являются эффективным инструментом краткосрочного прогнозирования прямого материального ущерба от пожаров на территории Российской Федерации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что выбранная модель адекватно отражает фактическую динамику показателя и способна учитывать его нестационарный характер и наличие резких колебаний. Проведено сравнение различных вариантов сглаживания и параметров моделей, что позволило обосновать выбор 3-членной взвешенной скользящей средней и метода Брауна с коэффициентами сглаживания $\alpha = 0,06$ и $\alpha = 0,1$ как наиболее точных для краткосрочного прогнозирования.

Качество прогнозной модели подтверждается результатами сравнительного анализа различных вариантов сглаживания и значений коэффициента α . Минимальные значения среднеквадратичной ошибки для малых значений параметра сглаживания $\alpha = 0,06$ и $\alpha = 0,1$ указывают на высокую устойчивость модели к случайным колеба-

ниям и шумам, присущим статистике ущерба от пожаров. Это особенно важно при анализе социально-экономических показателей, формируемых под воздействием большого числа случайных и трудно учитываемых факторов.

Использование предварительного сглаживания временного ряда 3-членной взвешенной скользящей средней позволило повысить точность прогнозирования благодаря снижению влияния краткосрочных случайных изменений без искажения итоговой тенденции величины показателя.

С практической точки зрения разработанная модель отличается простотой реализации и невысокими требованиями к объему и структуре исходного материала. Для построения прогноза используются данные из прошлой статистики, что делает модель удобной для применения в деятельности органов управления и аналитических подразделений, отвечающих за вопросы пожарной безопасности и оценки последствий чрезвычайных ситуаций. Модель может быть интегрирована в системы мониторинга и поддержки принятия решений для оперативной оценки ожидаемого уровня прямого материального ущерба.

В то же время следует отметить, что метод Брауна ориентирован преимущественно на краткосрочное прогнозирование и не учитывает явным образом сезонность, территориальную дифференциацию и влияние других некоторых факторов. Поэтому данную модель не получится применить при средне- и долгосрочных прогнозах. Дальнейшие исследования целесообразно направить на учет сезонности и расширение

модели за счет включения социально-экономических факторов.

Перспективы развития дальнейших исследований с расширением набора уточняющих переменных, а также сравнение адаптивных моделей с наиболее сложными машинными и другими моделями прогнозирования позволят повысить точность оценок и расширить область практического применения результатов исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствий : инф.-аналит. сборник / В. С. Гончаренко [и др.]. Балашиха, 2025. 112 с.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2022 г. Статистика пожаров и их последствий : инф.-аналит. сборник / В. С. Гончаренко [и др.]. Балашиха, 2023. 80 с.
3. Пожары и пожарная безопасность в 2017 г. Статистика пожаров и их последствий : стат. сборник / под общ. ред. Д. М. Гордиенко. М., 2018. 125 с.
4. Факторы пожарной опасности регионов Российской Федерации / В. А. Штерензон [и др.] // Техносферная безопасность. 2020. № 4. С. 89–101.
5. Атчаде М. Н. Адаптивные методы прогнозирования. Реализация в Excel и программе R. СПб., 2018. 101 с.
6. Шелобаев С. И., Шелобаева И. С. Анализ и прогнозирование финансовых процессов. Тула, 2009. 265 с.

REFERENCES

1. Fires and fire safety in 2024. Statistics on fires and their consequences : information and analytical collection / V. S. Goncharenko et al. Balashikha, 2025. 112 p.
2. Fires and fire safety in 2022. Statistics on fires and their consequences : information and analytical collection / V. S. Goncharenko et al. Balashikha, 2023. 80 p.
3. Fires and fire safety in 2017. Statistics on fires and their consequences : statistical collection / edited by D. M. Gordienko. Moscow, 2018. 125 p.
4. Fire hazard factors of the Russian Federation regions / V. A. Sterenzon et al. // Technosphere safety. 2020. No. 4. P. 89–101.
5. Adaptive forecasting methods. Implementation in Excel and R. Saint Petersburg, 2018. 101 p.
6. Shelobaev S. I., Shelobaeva I. S. Analysis and forecasting of financial processes. Tula, 2009. 265 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пичуева Елизавета Дмитриевна, студентка Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); SPIN-код: 6889-0932; AuthorID: 1333903; e-mail: pi4uevael@gmail.com

Худякова Светлана Александровна, канд. пед. наук, доцент, начальник кафедры математики и информатики Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); SPIN-код: 8243-6682; AuthorID: 788349; ORCID: 0000-0001-8721-5677; e-mail: KhudyakovaSA@uigps.ru

Шевелева Виктория Владимировна, старший преподаватель кафедры иностранных языков и профессиональных коммуникаций Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); SPIN-код: 9723-1771; AuthorID: 1097831; e-mail: shevelevavv@uigps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elizaveta D. Pichueva, student, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); SPIN-code: 6889-0932; AuthorID: 1333903; e-mail: pi4uevael@gmail.com

Svetlana A. Khudyakova, Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor, Head of Department of mathematics and informatics, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); SPIN-code: 8243-6682; AuthorID: 788349; ORCID: 0000-0001-8721-5677; e-mail: KhudyakovaSA@uigps.ru

Victoria V. Sheveleva, Senior Lecturer at the Department of foreign language and professional communications, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); SPIN-code: 9723-1771; AuthorID: 1097831; e-mail: shevelevavv@uigps.ru

УДК 614.841.45

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ОГНЕЗАЩИТНЫЕ ФУНКЦИИ ИНТУМЕСЦЕНТНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ СТАРЕНИИ

Головина Екатерина Валерьевна

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

Аннотация. В статье приведены результаты испытаний на огнезащитную эффективность огнезащитных интумесцентных составов, модифицированных минеральными и углеродными компонентами, после нахождения анализируемых покрытий в камере соляного тумана. Целью исследования являлся анализ влияния наполнителей на огнезащитные функции вспучивающегося материала при воздействии климатических факторов. В результате испытаний были решены следующие задачи: отбор модифицирующих компонентов, непосредственное проведение испытаний образцов после искусственного старения и анализ полученных результатов. На основе обобщения данных сравнительного анализа покрытий, содержащих модифицирующие добавки, можно заключить, что даже небольшое количество функциональных наполнителей способно существенно улучшить огнезащитные характеристики исследуемых интумесцентных материалов. При введении в огнезащитный состав волластонита и углеродных нанотрубок наблюдается положительный эффект как до, так и после испытаний на искусственное старение. Обнаружено увеличение времени огнезащитной эффективности для всех исследуемых режимов (после 2, 5 и 10 суток в камере соляного тумана). Таким образом, данное исследование подтверждает возможность применения функциональных наполнителей из числа кремнийсодержащих и углеродных компонентов в составе огнезащитных средств для улучшения их эксплуатационных свойств, необходимых для применения на промышленных предприятиях, расположенных в арктических районах.

Ключевые слова: интумесцентные покрытия, огнезащитная эффективность, алюмосиликатные микросферы, углеродные нанотрубки, волластонит, интеркалированный графит, воздействие климатических факторов, сохранение огнезащитных свойств

Для цитирования: Головина Е. В. Влияние модифицирующих наполнителей на огнезащитные функции интумесцентного покрытия при искусственном старении // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 37–45.

THE EFFECT OF MODIFYING FILLERS ON THE FLAME-RETARDANT FUNCTIONS OF AN INTUMESCENT COATING DURING ARTIFICIAL AGING

Ekaterina V. Golovina

UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of tests on the flame-retardant effectiveness of flame-retardant intumescent compositions modified with mineral and carbon components after the analyzed coatings were found in a salt mist chamber. The aim of the study was to analyze the effect of fillers on the flame-retardant functions of a bulging material under the influence of climatic factors. As a result of the tests, the following tasks were solved: selection of modifying components, direct testing of samples after artificial aging and analysis of the results obtained. Based on the generalization of data from a comparative analysis of coatings containing modifying additives, it can be concluded that even a small number of functional fillers can significantly improve the flame-retardant characteristics of the intumescent materials under study.

When wollastonite and carbon nanotubes are introduced into the flame retardant, a positive effect is observed both before and after artificial aging tests. An increase in the time of fire-retardant effectiveness was found for all studied modes (after 2, 5 and 10 days in the salt mist chamber). Thus, this study confirms the possibility of using functional fillers from among silicon-containing and carbon-based components in flame retardants to improve their operational properties necessary for use in industrial enterprises located in Arctic regions.

Keywords: intumescent coatings, flame-retardant efficiency, aluminosilicate microspheres, carbon nanotubes, wollastonite, intercalated graphite, exposure to climatic factors, preservation of flame-retardant properties

For citation: Golovina E. V. The effect of modifying fillers on the flame-retardant functions of an intumescent coating during artificial aging // Technosphere safety. 2026. No. 2 (51). P. 37–45.

Введение

Условия эксплуатации промышленных объектов, расположенных в арктических районах, характеризуются сложностью климатических особенностей (пониженные температуры, повышенная влажность, ультрафиолетовое излучение, сильный ветер и т. д.) и воздействием агрессивной химической среды, обусловленной спецификой предприятий нефтегазовой отрасли. Соответственно, огнезащитные материалы, применяемые на данного рода объектах, должны отвечать следующим требованиям [1–5]:

- работоспособность и сохранение характеристик прочности при температурах от -50°C до -75°C ;

- работоспособность при колебании температур от минусовых до плюсовых;
- атмосферостойкость;
- повышенные износостойкость, хорошая адгезия материалов при взаимодействии с осадками;
- сохранение эксплуатационных характеристик в условиях воздействия агрессивных сред.

Несоответствие огнезащитных материалов этим требованиям приводит к снижению огнезащитной эффективности и срока службы покрытия. В связи с этим исследование средств огнезащиты в условиях воздействия таких факторов, как перепады температур, высокая влажность, агрессивное воздействие химических веществ (например, нефтепродуктов) и др., остается необходимым для

оценки эксплуатационной эффективности анализируемых материалов. В настоящее время наметилась тенденция к использованию для огнезащиты в качестве компонентов, снижающих пожарную опасность покрытий, технологических добавок, что позволяет улучшить функциональные характеристики покрытий. В связи с этим изучение влияния модифицирующих компонентов на огнезащитные свойства интумесцентных материалов в результате длительной эксплуатации в условиях агрессивной внешней среды является актуальным и востребованным.

Материалы и методы

В результате ранее проведенных исследований [6–9] было установлено, что при проведении термического анализа интумесцентных материалов с добавлением модифицирующих компонентов наилучшие результаты по термостойкости получены при введении 5%-й добавки алюмосиликатных микросфер (далее — АСМ), что обусловлено каталитическими процессами, протекающими на их поверхности, а также при введении АСМ в наполнении 5 % и углеродных нанотрубок (далее — УНТ) в наполнении 0,05 %. Термогравиметрический анализ модифицированного состава показал, что введение комплексных добавок приводит к уменьшению потери массы только в том случае, когда в качестве углеродсодержащей составляющей модификатора применялись УНТ, что свидетельствует о повышении термостойкости огнезащитного материала.

Результаты исследования показали, что добавки углеродсодержащего и минерального компонентов при введении в огнезащитный интумесцентный состав на эпоксидной основе в целом способствуют снижению

горючести и повышению термостойкости покрытия. Наиболее эффективным является образец, в состав которого входит комплексная добавка УНТ и алюмосиликатных микросфер при степени наполнения 0,05 % и 5 % соответственно. Двойные добавки, содержащие интеркалированный графит (далее — ИГ) и минеральный наполнитель, комплексного положительного эффекта не показали.

Для проверки результатов испытаний огнезащитных составов с добавлением модифицирующих добавок методами синхронного термического анализа также было проведено экспериментальное исследование анализируемых составов методом оценки огнезащитной эффективности в соответствии с ГОСТ 1363-2-2014 [10] и ГОСТ 53295-2009 [11] в условиях углеводородного температурного режима. Для исследования сохранности огнезащитных свойств композиций интумесцентного типа с добавлением модифицирующих компонентов были проведены испытания методом искусственного старения в соответствии с ГОСТ 9.401-2018 [12]. Оценку огнезащитной эффективности проводили после 2, 5 и 10 суток выдержки образцов покрытий в камере соляного тумана (далее — КСТ).

В качестве объектов для анализа были отобраны комплексные модифицирующие добавки из числа минеральных и углеродсодержащих компонентов:

- CaSiO_3 (5 %) + УНТ (0,05 %);
- АСМ (5 %) + УНТ (0,05 %);
- CaSiO_3 (5 %) + ИГ (5 %);
- АСМ (5 %) + ИГ (5 %).

Результаты испытаний огнезащитного состава (далее — ОЗС) с добавлением комплексной добавки после ускоренного старения представлены на рис. 1–3.

В соответствии с данными испытаний наилучшие результаты по огнезащитной эффективности модифицированных составов до искусственного старения получены при введении 5 % добавки алюмосиликатных микросфер и 0,05 % углеродных нанотрубок — 61 минута, что выше показателя исходного образца на 14,8 %. Анализируемый модифицированный состав после искусственного старения так-

же демонстрирует достойный результат: наблюдается снижение после 1 суток КСТ циклов — на 4,9 %, после 5 суток КСТ — на 8,1 %, после 10 суток КСТ — на 9,8 % по сравнению с данными до искусственного старения.

Установлено, что сочетание интеркалированного графита с кремнийсодержащими компонентами в составе ОЗС имеет неоднозначное влияние (рис. 4).

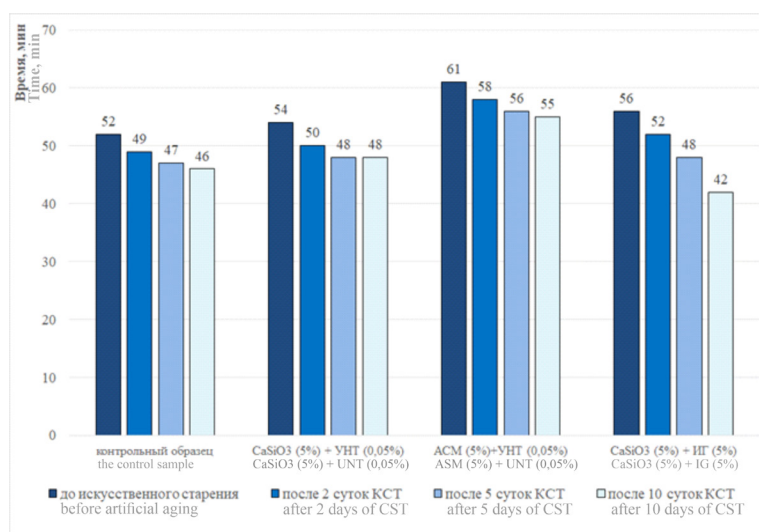


Рис. 4. Результаты огневых испытаний образцов искусственно состаренных покрытий с добавлением комплексной добавки

Fig. 4. Results of fire tests of samples of artificially aged coatings with the addition of a complex additive

С одной стороны, наблюдается увеличение времени сохранения защитных качеств образцов без искусственного старения при добавлении ИГ в сочетании с волластонитом и алюмосиликатными микросферами. С другой стороны, после искусственного старения происходит деградация свойств огнезащиты: если исходный образец после 10 суток в камере соляного тумана сохраняет требуемые характеристики 46 минут, то образцы с ИГ и минеральным компонентом снижают их на 9,5–12,1 % (42 и 41 минуты соответственно). Возможно, положительный эффект достигается именно за счет минеральных компонентов в составе интумесцентной композиции, в то время как

при длительном использовании сокращение огнезащитной эффективности происходит из-за введения интеркалированного графита, который, как было показано выше, увеличивает коэффициент вспучивания покрытия, но одновременно с этим делает термоизолирующий слой неустойчивым и уязвимым с течением времени. Таким образом, добавление ИГ в состав интумесцентной композиции не имеет длительного положительного эффекта: наблюдается снижение огнезащитной эффективности при увеличении срока эксплуатации анализируемого покрытия.

Изменения огнезащитной способности ОЗС с добавлением комплексной добавки

после искусственного старения обозначены на рис. 5. В соответствии с данными диаграммы наименее подвержен потере огнезащитных качеств интумесцентный материал с введением ACM (5 %) и УНТ (0,05 %): при испытаниях после 2 суток КСТ деградация

свойств огнезащиты составила 4,9 %, 5 суток КСТ — 8,2 %, 10 суток КСТ — 9,8 %. Следует отметить, что это самые низкие показатели среди анализируемых составов с добавлением минеральных и углеродсодержащих наполнителей.

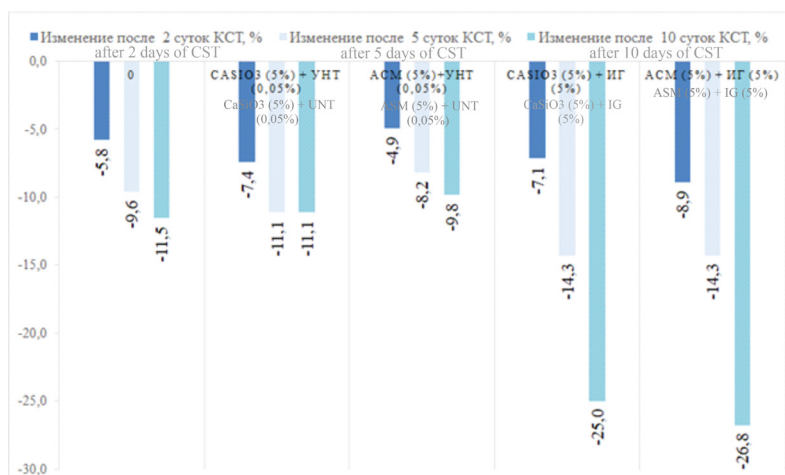


Рис. 5. Изменение огнезащитной способности ОЗС после искусственного старения с добавлением комплексной добавки

Fig. 5. Change in the flame retardant ability of the flame retardant composition after artificial aging with the addition of a complex additive

В случае добавления в ОЗС волластонита и углеродных нанотрубок также очевиден положительный эффект как до проведения испытаний по искусственному старению, так и после. Установлено увеличение времени огнезащитной эффективности при всех исследуемых режимах: после 2 суток воздействия соляного тумана снижение анализируемых показателей составило 7,4 %, в дальнейших исследованиях значения сохранялись и составили 11,1 %. Как говорилось выше, при введении ИГ в состав композиций положительного эффекта не выявлено.

Заключение

При обобщении результатов сравнительного анализа покрытий с добавлением модифицирующих добавок можно сделать вывод, что небольшие количества функциональных

наполнителей могут в значительной мере оказать влияние на огнезащитные свойства анализируемых интумесцентных материалов. На основании ранее проведенных исследований [6–9] было установлено, что наиболее благоприятным образом на защитные свойства ОЗС оказало добавление алюмосиликатных микросфер, волластонита, углеродных нанотрубок, но в достаточно умеренных количествах: 0,05 % для УНТ и 5 % для минеральных компонентов. Однако необходимо отметить, что при сочетании ACM (5 %) и УНТ (0,05 %) наблюдается результат несколько слабее, чем при введении данных добавок по отдельности. Если при содержании ACM (5 %) $\tau_{\text{ср}}$ до искусственного старения составило 64 минуты, а при содержании УНТ (0,05 %) — 66 минут, то при их объединении в тех же пропорциях $\tau_{\text{ср}}$ снизилось до 61 минуты. Несомненно, это результат удовлетворительный в сравнении

с исходным образцом, но введение одиночной добавки углеродных нанотрубок дает самый высокий результат. Как показали про-

веденные испытания, присутствие интеркалированного графита в составе покрытия положительного эффекта не оказывает.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gravit M., Shabunina D. Structural Fire Protection of Steel Structures in Arctic Conditions // Buildings. 2021. No. 11 (11). Art. 499. DOI: 10.3390/buildings11110499
2. Пехотиков А. В., Павлов В. В. Средства огнезащиты для стальных конструкций, актуальные вопросы при их применении, оценка технико-эксплуатационных характеристик // Промышленные покрытия. 2015. № 5–6. С. 12–19.
3. Hazard Assessment Studies on Hydrocarbon Fire and Blast: An Overview / M. Imran et al. // Advanced Science Letters. 2017. No. 23. P. 1243–1247. DOI: 10.1166/asl.2017.8349
4. Palazzi E., Fabiano B. Analytical modelling of hydrocarbon pool fires: Conservative evaluation of flame temperature and thermal power // Process Safety and Environmental Protection. 2012. No. 90. P. 121–128. DOI: 10.1016/j.psep.2011.06.009
5. Himoto K., Suzuki K. Computational framework for assessing the fire resilience of buildings using the multi-layer zone model // Reliability Engineering & System Safety. 2021. Vol. 216. Art. 108023. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108023
6. Применение методики оценки термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для условий углеводородного горения на примере составов, модифицированных кремнийсодержащими компонентами / Е. В. Головина [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. № 4 (19). С. 25–30. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.62.87.004
7. Беззапонная О. В., Головина Е. В. Оценка влияния минеральных наполнителей на термостойкость и горючесть огнезащитного состава интумесцентного типа на силиконовой основе // Журнал прикладной химии. 2018. Т. 91, № 1. С. 104–109.
8. Головина Е. В., Беззапонная О. В. Влияние кремнийсодержащих компонентов на термостойкость и снижение горючести огнезащитных составов интумесцентного типа // Проблемы управления рисками в техносфере. 2018. № 2 (46). С. 110–119.
9. Пути совершенствования огнезащитных терморасширяющихся составов для использования на объектах нефтегазового комплекса / О. В. Беззапонная [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26, № 12. С. 14–24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24
10. ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы. М., 2014. 17 с.
11. ГОСТ Р 53295-2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. М., 2009. 9 с.
12. ГОСТ 9.104-2018. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы условий эксплуатации. М., 2019. 11 с.

REFERENCES

1. Gravit M., Shabunina D. Structural Fire Protection of Steel Structures in Arctic Conditions // Buildings. 2021. No. 11 (11). Art. 499. DOI: 10.3390/buildings11110499
2. Pekhotikov A. V., Pavlov V. V. Fire protection products for steel structures, current issues in their application, assessment of technical and operational characteristics // Industrial coatings. 2015. No. 5–6. P. 12–19.
3. Hazard Assessment Studies on Hydrocarbon Fire and Blast: An Overview / M. Imran et al. // Advanced Science Letters. 2017. No. 23. P. 1243–1247. DOI: 10.1166/asl.2017.8349
4. Palazzi E., Fabiano B. Analytical modelling of hydrocarbon pool fires: Conservative evaluation of flame temperature and thermal power // Process Safety and Environmental Protection. 2012. No. 90. P. 121–128. DOI: 10.1016/j.psep.2011.06.009
5. Himoto K., Suzuki K. Computational framework for assessing the fire resilience of buildings using the multi-layer zone model // Reliability Engineering & System Safety. 2021. Vol. 216. Art. 108023. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108023
6. Application of methods for assessing the thermal resistance of intumescent flame retardants for hydrocarbon combustion conditions using the example of compositions modified with silicon-containing components / E. V. Golovina et al. // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2020. No. 4 (19). P. 25–30. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.62.87.004
7. Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V. Evaluation of the effect of mineral fillers on the heat resistance and flammability of an intumescent silicone-based flame retardant // Journal of Applied Chemistry. 2018. Vol. 91. No. 1. P. 104–109.
8. Golovina E. V., Bezzaponnaya O. V. Influence of silicon-containing components on heat resistance and reduction of flammability of intumescent flame retardants // Problems of risk management in the technosphere. 2018. No. 2 (46). P. 110–119.
9. Ways to improve flame-retardant thermally expanding compounds for use at oil and gas facilities / O. V. Bezzaponnaya et al. // Fire and explosion safety. 2017. Vol. 26. No. 12. P. 14–24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24
10. GOST R EN 1363-2-2014. Construction structures. Fire resistance tests. Part 2. Alternative and additional methods. Moscow, 2014. 17 p.
11. GOST R 53295-2009. Fire protection products for steel structures. General requirements. A method for determining fire-retardant effectiveness. Moscow, 2009. 9 p.
12. GOST 9.104-2018. A unified system of protection against corrosion and aging. Paint and varnish coatings. Groups of operating conditions. Moscow, 2019. 11 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Головина Екатерина Валерьевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры надзорной деятельности и права Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ekaterina V. Golovina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Supervision and Law, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

УДК 678.048.9

ПОЛИМЕРЫ С ПРИВИТЫМИ АНТИПИРЕНАМИ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Якубова Татьяна Валерьевна¹, Шкуро Алексей Евгеньевич²

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

² Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Полимеры с привитыми антипиренами (ППА, PGFR) представляют собой особый класс огнестойких материалов, в которых антипиренные фрагменты химически закреплены в структуре полимера. Это обеспечивает ковалентную фиксацию антипиренов, существенно снижает их миграцию и значительно повышает долговечность и термическую стабильность материалов в различных условиях эксплуатации. В настоящей работе представлены современные методы синтеза ППА, включая стратегии grafting from (прививка от), grafting onto (прививка на) и grafting through (прививка через), подробно описаны их механизмы и основные области применения. Особое внимание уделено фосфорорганическим соединениям как наиболее эффективным компонентам привитых систем. Рассмотрены основные механизмы огнезащитного действия, включая ингибирование радикальных реакций, образование защитного углеродного слоя и другие важные процессы. Обоснованы преимущества ППА по сравнению с традиционными добавками, в том числе с позиций экологической и санитарной безопасности, а также с точки зрения экономической эффективности. Обсуждаются существующие ограничения, такие как технологическая сложность синтеза и высокая стоимость, а также перспективные направления дальнейших исследований в области разработки высокоэффективных и экологичных антипиренов нового поколения с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: полимеры, антипирены, привитые системы, огнестойкость, термостабилизация, радикальное разложение, фосфорорганические соединения, экологическая безопасность

Для цитирования: Якубова Т. В., Шкуро А. Е. Полимеры с привитыми антипиренами: синтез, свойства и перспективы применения // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 46–61.

POLYMER-GRAFTED FLAME RETARDANTS: SYNTHESIS, PROPERTIES, AND APPLICATION PROSPECTS

Tatiana V. Yakubova¹, Alexey E. Shkuro²

¹ UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. Polymers with grafted flame retardants (PPA, PGFR) are a special class of fire-resistant materials in which flame retardant fragments are chemically fixed in the polymer structure. This ensures covalent fixation of flame retardants, significantly reduces their migration and significantly increases the durability and thermal stability of materials under various operating conditions. This paper presents modern methods for the synthesis of PGFR, including grafting from, grafting onto and grafting through strategies, and describes in detail their mechanisms and main areas of application. Particular attention is paid to organophosphorus compounds as the most effective components of grafted systems. The main mechanisms of fire-retardant action are considered, including inhibition of radical reactions, formation of a protective carbon layer and other important processes. The advantages of PGFR compared to traditional additives are substantiated, including from the standpoint of environmental and sanitary safety, as well as from the point of view of economic efficiency. Existing limitations, such as the technological complexity of synthesis and high cost, as well as promising areas of further research in the field of developing highly effective and environmentally friendly new-generation fire retardants with improved performance characteristics are also discussed.

Keywords: polymers, flame retardants, grafted systems, fire resistance, PGFR, thermal stabilization, radical degradation, phosphorus-containing compounds, environmental safety

For citation: Yakubova T. V., Shkuro A. E. Polymer-Grafted Flame Retardants: Synthesis, Properties, and Application Prospects // *Technosphere safety*. 2026. No. 2 (51). P. 46–61.

Введение

Полимерные материалы широко применяются в строительстве, транспорте, электронике, упаковке и текстильной промышленности благодаря их легкости, технологичности и широкому диапазону свойств. Однако большинство синтетических полимеров обладает высокой горючестью, что существенно ограничивает их применение в условиях, требующих повышенной огнестойкости. Для снижения воспламеняемости в полимерные системы традиционно вводят антипирены — добавки, способные ингибировать процессы горения за счет различных физических и химических механизмов [1, 2].

Наиболее распространенные аддитивные (т. е. применяемые в форме добавок) антипирены (фосфор-, азот-, галоген- и крем-

нийсодержащие соединения) эффективны, но имеют ряд существенных недостатков: склонность к миграции, ухудшение механических и эксплуатационных характеристик материала, а также возможность образования токсичных продуктов разложения. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых, более стабильных и безопасных систем огнезащиты [3–5].

Одним из перспективных направлений является создание полимеров с привитыми антипиренами (ППА, polymer-grafted flame retardants, PGFR), в которых антипиренные фрагменты соединены ковалентными связями с полимерной цепью [6]. Такая стратегия позволяет обеспечить долговременную огнезащиту без ухудшения физико-механических свойств, повысить термическую стабильность материала и снизить экологические риски,

связанные с вымыванием и деградацией добавок [7].

Настоящая статья представляет собой обзор современных подходов к синтезу ППА, их классификации, структурных особенностей, механизмов действия и областей применения. Особое внимание уделено преимуществам привитых антипиренов по сравнению с традиционными системами, а также существующим ограничениям и перспективам развития в данной области.

Классификация антипиренов

Антипирены классифицируются по химической природе на несколько основных групп: фосфор-, азот-, галоген- и кремнийорганические соединения, каждая из которых реализует специфические механизмы огнезащитного действия [8–10]. Наиболее широко применяются фосфорсодержащие антипирены, включая фосфаты, фосфонаты и производные *9,10*-дигидро-*9*-окса-*10*-фосфобензотриазин-*10*-оксида (DOPO), которые действуют преимущественно в конденсированной фазе, способствуя образованию углеродистого защитного слоя, а также ингибируют радикальные процессы в газовой фазе [11]. Азотсодержащие антипирены, такие как меламин и его производные, обеспечивают огнезащиту за счет термического разложения с выделением инертных газов (N_2 , NH_3), разбавляющих горючую среду и препятствующих распространению пламени. Галогенсодержащие антипирены, преимущественно броморганические соединения (например, декабромдифенилэфир, тетрабромбисфенол А), эффективны в газовой фазе [12], где они ингибируют цепные радикальные реакции, но ограничиваются в применении

из-за высокой токсичности продуктов их термодеструкции.

В качестве экологически безопасной альтернативы рассматриваются кремнийорганические антипирены, включая силоксаны и органосиланы, которые улучшают термостабильность и способствуют формированию барьерного слоя из термостойких кремнийсодержащих остатков [13]. Кроме того, активно исследуются комбинированные антипиренные системы (например, P–N, P–Si, P–N–Si), демонстрирующие синергетический эффект и особенно перспективные для разработки полимеров с привитыми антипиренами.

Антипирены также могут быть классифицированы по механизму огнезащитного действия на три основные группы: физические, химические и барьерные системы. Физические антипирены обеспечивают защиту за счет изменения тепловых и фазовых характеристик полимера, таких как охлаждение, разбавление горючих газов и образование защитного слоя, что замедляет передачу тепла и доступ кислорода к поверхности. К этой группе относятся, например, гидратированные соединения, выделяющие воду при нагревании, и газообразующие вещества. Химические антипирены воздействуют на радикальные процессы горения, прерывая цепные реакции в газовой фазе с помощью ингибирования активных радикалов. К ним относятся галогенорганические соединения, фосфорсодержащие и азотсодержащие вещества, действующие через образование летучих радикально-поглощающих продуктов. Барьерные антипирены создают физико-химические барьеры на поверхности материала или в его структуре, препятствуя доступу кислорода и распространению огня. К таким системам относятся силикатные и кремнийорганические соединения, а также вещества,

способствующие формированию углеродистых или кремнийсодержащих защитных слоев при термическом разложении [14, 15]. Часто в современных материалах применяются комбинированные антипирены, сочетающие несколько механизмов действия для достижения высокой эффективности огнезащиты [16].

Антипирены традиционно вводятся в полимеры двумя основными способами: как аддитивные добавки или посредством прививки (*grafting*) к полимерной матрице. Аддитивные антипирены обычно смешиваются с полимером физически и не связаны с его макромолекулами. Их основным преимуществом является простота внедрения и широкий ассортимент доступных соединений. Однако аддитивные антипирены имеют склонность к миграции и вымыванию, что снижает долговечность огнезащитного эффекта и может приводить к ухудшению механических свойств материала. Кроме того, высокая концентрация добавок может негативно влиять на процесс переработки и конечные свойства полимера. В противоположность этому привитые антипирены химически связаны с полимерной цепью, что значительно снижает миграцию и улучшает совместимость с матрицей. Это обеспечивает стабильный и долговременный огнезащитный эффект при более низких концентрациях. Кроме того, привитые системы часто демонстрируют улучшенные механические и термические свойства, так как интегрируются в полимерную структуру [17, 18]. Недостатками ППА являются более сложные методы синтеза и, как правило, более высокая стоимость. Таким образом, выбор между аддитивными и привитыми антипиренами определяется требованиями к долговечности, технологичности и стоимости конечного материала.

Методы синтеза привитых антипиренов

Методы прививки антипиренов к полимерной матрице традиционно подразделяются на три основные категории (рис.): *grafting from* (прививка от), *grafting onto* (прививка на) и *grafting through* (прививка через) [19–21].

Метод *grafting from* предполагает иницирование полимеризации функционализированных антипиренами мономеров непосредственно с поверхности полимерной цепи, на которую предварительно введены активные центры инициации. Такой подход обеспечивает высокую плотность привитых фрагментов и равномерное распределение огнезащитных групп, а также минимизирует проблемы, связанные с диффузией мономеров.

Метод *grafting onto* заключается в химическом присоединении заранее синтезированных полимерных цепей с антипиренными функциями к функциональным группам полимерной матрицы. Несмотря на простоту реализации, данный способ часто ограничен низкой степенью замещения из-за стерических препятствий при присоединении крупных молекул.

Метод *grafting through* предусматривает включение функционализированных антипиренных мономеров непосредственно в основную полимерную цепь посредством совместной полимеризации с основными мономерами, что позволяет получать сополимеры с интегрированными огнезащитными группами и контролируемой структурой. Выбор конкретного метода определяется природой полимера, типом антипирена и требованиями к конечным свойствам материала.



Рис. Методы прививки антипиренов к полимерной матрице [19]

Fig. Methods of grafting fire retardants to a polymer matrix [19]

Привитые антипирены получают путем химического связывания огнезащитных групп или молекул с полимерной матрицей, что позволяет повысить совместимость, снизить миграцию и улучшить долговечность антипиренного эффекта. Основные методы синтеза привитых антипиренов:

- Радикальная полимеризация с участием антипиренов — один из наиболее распространенных способов, при котором молекулы антипиренов или их функционализированные производные участвуют в радикальной сополимеризации

с мономерами. Это позволяет формировать химическую связь антипирена с полимерной цепью в процессе полимеризации или последующей гомополимеризации, обеспечивая равномерное распределение функциональных групп.

- Химическая модификация готовых полимеров. В данном методе функциональные группы антипиренов вводятся в уже синтезированный полимер посредством замещения, аминирования, этерификации, раскрытия циклов или других типов реакций. Такой подход позволяет

гибко модифицировать существующие полимерные материалы и оптимизировать структуру привитого антипирена.

– «Клик-химия». Высокоэффективные и селективные реакции, такие как азидо-алкиновое циклообразование (CuAAC), широко используются для прививки антипиренов к функционализированным полимерам. «Клик-реакции» отличаются высокой степенью конверсии, мягкими условиями проведения и минимальным образованием побочных продуктов [22–24].

– Иницированные электронообменные реакции (*Atom Transfer Radical Polymerization, ATRP*). Метод позволяет синтезировать привитые антипирены с заданной архитектурой и молекулярной массой, обеспечивая высокую точность распределения функциональных групп и возможность получения блок-сополимеров с антипиренами [25, 26].

– Полимеризация в расплаве или растворе с одновременной функционализацией. Метод предусматривает проведение полимеризационных реакций с одновременным введением антипиренных групп, что обеспечивает их стабильное включение и равномерное распределение без необходимости последующей модификации.

Выбор конкретного метода определяется природой полимера, типом антипирена, желаемыми свойствами конечного материала и технологическими возможностями.

Структура и свойства привитых антипиренных систем

Химическая структура привитых фрагментов в полимерах с антипиренными

свойствами определяется как природой функционального антипирена, так и способом его введения в полимерную цепь. Чаще всего для этих целей используют фрагменты, содержащие фосфор-, азот- или галогенсодержащие группы, обладающие способностью к ингибированию процессов горения. Наиболее широко применяются производные DOPO (9,10-дигидро-9-оксафосфотантрен-10-оксид), фосфонов, фосфатов, а также фосфониевых солей, благодаря их термической стабильности и высокой реакционной способности. Такие структуры часто включают винильные, эпоксидные, гидроксильные или аминогруппы, которые могут взаимодействовать с полимерной матрицей при прививке.

В методах *grafting from* и *grafting onto* структуры привитых фрагментов обычно включают как реакционноспособную группу, так и антипиренный фрагмент, соединенные между собой гибкой или жесткой связующей цепью. В подходе *grafting through* антипиренный мономер содержит полимеризуемую двойную связь, что позволяет ему включаться в основную цепь в процессе сополимеризации. Формирование таких привитых структур обеспечивает ковалентную фиксацию антипирена в полимерной матрице, что значительно снижает его миграцию, а также способствует повышению термической и огнестойкой стабильности материала.

Прививка антипиренных фрагментов к полимерной матрице оказывает комплексное влияние на физико-химические свойства материала. С точки зрения термической стабильности ковалентная фиксация антипирена снижает температуру начала термодеструкции по сравнению с исходным полимером, однако делает процесс

разложения более контролируемым и менее экзотермичным за счет ингибирования цепных реакций. Это особенно выражено при использовании фосфорорганических антипиренов, таких как производные DOPO, которые способствуют образованию термостойких фосфорсодержащих остатков.

Механические свойства модифицированных полимеров зависят от природы привитого фрагмента и плотности его прививки: в большинстве случаев наблюдается умеренное снижение прочности и модуля упругости из-за нарушения регулярности полимерной цепи, однако возможно и улучшение адгезионных характеристик или гибкости за счет введения полярных или гибкоцепных фрагментов.

Наиболее выраженное влияние прививка оказывает на огнестойкость: ковалентно связанные антипирены не мигрируют, обеспечивая длительный эффект и стабильную защиту. Такие материалы демонстрируют снижение показателей горючести, снижение дымовыделения, увеличение времени до воспламенения и образование защитного углеродистого слоя на поверхности при термодеструкции. Таким образом, применение привитых антипиренов позволяет достичь баланса между эффективной огнезащитой и сохранением эксплуатационных свойств полимеров [27–29].

Введение привитых антипиренов в состав полимерных композитов оказывает значительное влияние на морфологию материала и характер межфазных взаимодействий. Благодаря ковалентной фиксации антипиренных фрагментов к полимерной матрице улучшается совместимость между компонентами композита, особенно в системах, содержащих неорганические наполнители (например, оксиды, наноглины, волокна) или натуральные компоненты [15, 30, 31].

Привитые цепи могут выполнять роль межфазных связующих звеньев, способствуя снижению межфазного натяжения, равномерному распределению наполнителя и формированию устойчивой структурной морфологии. Это приводит к более мелкодисперсной морфологии, повышению когезии на границе раздела фаз и уменьшению вероятности дефектов или расслоений при деформации. Наличие функциональных групп в структуре привитых антипиренов (фосфонатов, аминов, гидроксидов) способствует образованию водородных или донорно-акцепторных связей с поверхностью наполнителей, что дополнительно укрепляет межфазную адгезию. В результате таких взаимодействий повышается термостойкость композитов, улучшаются их механические характеристики и огнезащитные свойства за счет образования интегрированной и более стабильной морфологической структуры. Таким образом, прививка антипиренов играет не только огнезащитную, но и структурообразующую роль в композиционных материалах [32].

Одним из ключевых преимуществ привитых антипиренов по сравнению с аддитивными является их высокая стабильность в составе полимера и стойкость к миграции. Ковалентное связывание антипиренного фрагмента с основной полимерной цепью предотвращает его вымывание, испарение или выделение на поверхность материала в процессе эксплуатации, особенно при воздействии тепла, влаги, растворителей или механических нагрузок. Это особенно важно для обеспечения долговременной огнезащиты, поскольку в традиционных системах с физически введенными антипиренами нередко наблюдаются потери эффективности со временем из-за диффузии или десорбции активных компонентов.

Кроме того, привитые антипирены демонстрируют лучшую термоокислительную стабильность, поскольку образование низкомолекулярных летучих продуктов при термодеструкции существенно снижается. Такая устойчивость также способствует сохранению эстетических и механических свойств полимера, предотвращая поверхностное обесцвечивание, липкость и изменение текстуры.

Таким образом, привитые антипирены обеспечивают не только эффективную и устойчивую огнезащиту, но и повышают эксплуатационную надежность и экологическую безопасность полимерных материалов.

Механизмы огнезащитного действия

Огнезащитное действие привитых антипиренов реализуется через механизмы, характерные как для конденсированной, так и для газовой фаз [33, 34].

В конденсированной фазе привитые антипирены, особенно фосфорсодержащие (например, производные DOPO), способствуют формированию термостойкого углеродистого остатка, который играет роль защитного барьера, изолирующего подлежащий полимер от доступа кислорода и тепла. Это препятствует распространению пламени и снижает скорость термодеструкции. Кроме того, плотный слой кокса уменьшает испарение горючих продуктов, стабилизируя полимерную матрицу.

В газовой фазе антипиренные фрагменты могут высвобождать негорючие или разбавляющие газы (например, H_3PO_4 , H_2O , CO_2), которые понижают концентрацию кислорода и горючих радикалов в пламени. Некоторые привитые структуры способны ингибировать свободные радикалы, обра-

зующиеся в пламени, тем самым нарушая цепные реакции горения [33, 34].

В отличие от аддитивных антипиренов, привитые фрагменты более термически стабильны, не мигрируют и не выделяются из матрицы, обеспечивая длительный и локализованный эффект. Это снижает токсичность и дымообразование, а также повышает эффективность огнезащиты при меньшей концентрации антипиренного агента. Таким образом, привитые антипирены реализуют комбинированное барьерное и радикал-интерцепторное действие, превосходя традиционные системы по экологичности, стабильности и эксплуатационным характеристикам.

Области применения

Полимеры с привитыми антипиренами находят все более широкое применение благодаря способности обеспечивать длительную, эффективную и экологически безопасную защиту от горения. Одной из наиболее активно развивающихся областей являются древесно-полимерные композиты (ДПК), используемые в строительстве, мебельной промышленности и ландшафтном дизайне. В таких материалах ППА повышают термическую стабильность и снижают скорость распространения пламени без ущерба для механических свойств. Прививка антипиренов к полимерной матрице предотвращает их вымывание и обеспечивает устойчивость к воздействию влаги и ультрафиолетового излучения, что особенно важно для наружных конструкций [35–37].

В области электротехнических материалов и кабельных оболочек ППА применяются для модификации полиолефинов, ПВХ и термопластичных эластомеров, обеспечивая

огнезащиту, совместимую с требованиями стандартов по низкому дымо- и газовыделению. Благодаря ковалентному закреплению, такие антипирены не мигрируют и не ухудшают диэлектрические свойства материала, что критично для работы оборудования в условиях повышенной температуры и напряжения.

Крупнотоннажные полимеры, применяемые в строительстве, такие как ПВХ, ПЭ, ПП и полистирол, получают дополнительную огнестойкость при модификации ППА, что позволяет использовать их в напольных покрытиях, отделочных панелях, герметиках и кровельных материалах. ППА в этих системах позволяют отказаться от использования традиционных токсичных антипиренов, сохраняя при этом соответствие нормативам пожарной безопасности.

В текстильной промышленности волокна и ткани, модифицированные привитыми антипиренами, обладают стойкостью к многократным стиркам и трению без потери огнезащитных свойств. Это особенно важно для защитной одежды, мебели, штор и автомобильной обивки, где требуется стабильная и долговременная защита при эксплуатации.

Наконец, особое внимание уделяется применению ППА в биополимерах и биоразлагаемых материалах, таких как полилактид (ПЛА), полигидроксibuтират (ПГБ) и полибутиленсукцинат (ПБС). Эти полимеры, обладая хорошими экологическими характеристиками, страдают от низкой термической стабильности и высокой горючести. Прививка антипиренных групп позволяет существенно повысить их огнестойкость без ухудшения биоразлагаемости, что открывает перспективы их использования в упаковке, медицине и устойчивом строительстве.

В этом контексте ППА служат не только огнезащитной, но и функциональной платформой для создания безопасных и устойчивых полимерных решений в соответствии с принципами «зеленой» химии [19].

Экологические и токсикологические аспекты

Полимеры с привитыми антипиренами обладают рядом значительных преимуществ в контексте экологической безопасности и токсикологической приемлемости. Одним из ключевых факторов является снижение миграции антипиренов из полимерной матрицы. Благодаря ковалентному привязыванию антипиренного фрагмента к основной цепи полимера исключается его высвобождение в окружающую среду в процессе эксплуатации, что особенно актуально для изделий, контактирующих с человеком, водой и пищевыми продуктами. Кроме того, ППА позволяют контролировать состав и токсичность продуктов термодеструкции. В отличие от традиционных галогенсодержащих антипиренов, способных выделять при горении высокотоксичные соединения (например, диоксины, фураны, HCl), привитые фосфор-, азот- или кремнийорганические соединения обеспечивают менее опасные летучие продукты и снижают уровень дымообразования.

Проблемы и перспективы развития

Несмотря на очевидные преимущества полимеров с привитыми антипиренами (ППА), их широкое промышленное применение сопряжено с рядом существенных проблем. Одной из главных трудностей является трудоемкость и высокая стоимость синтеза таких

материалов, что связано с необходимостью проведения многоэтапных химических реакций и применения специализированных катализаторов или условий полимеризации. Это ограничивает доступность ППА для массового производства и повышает конечную стоимость продукции. Кроме того, совместимость привитых антипиренов с различными промышленными полимерами требует тщательного подбора реакционных условий и молекулярной архитектуры, чтобы избежать снижения механических и технологических характеристик материала [6].

Важной задачей для дальнейшего развития является масштабирование синтетических процессов, которое требует оптимизации реакторных систем и снижения экологического воздействия. Одновременно ведется разработка универсальных привитых антипиренов, способных эффективно работать в широком спектре полимерных матриц и обеспечивать стабильную огнезащиту при минимальной концентрации [6, 38].

С перспективной точки зрения, ППА играют важную роль в концепции экономики замкнутого цикла. Благодаря повышенной долговечности, снижению миграции токсичных веществ и возможности интеграции с биоразлагаемыми полимерами, ППА способствуют снижению экологического следа полимерных изделий и переходу к более ответственному потреблению ресурсов. В будущем развитие ППА может стать ключевым фактором в создании безопасных, эффективных и экологически совместимых полимерных материалов нового поколения.

Выводы

Полимеры с привитыми антипиренами представляют собой инновационную форму

огнезащиты, сочетающую высокую эффективность, стойкость к миграции и хорошую совместимость с полимерной матрицей. Привитые антипирены обеспечивают огнестойкость за счет ковалентного встраивания в структуру материала, что минимизирует их влияние на механические свойства и повышает долговечность композитов.

Обзор существующих методов синтеза (*grafting from, onto, through*) показал, что на сегодняшний день доступны разнообразные пути химической модификации полимеров с использованием фосфорорганических, азотсодержащих, кремний- и галогенсодержащих фрагментов. Такие системы демонстрируют как конденсированные, так и газофазные механизмы огнезащиты и позволяют значительно повысить термостойкость материалов.

Несмотря на высокую научную и практическую ценность ППА, их промышленное внедрение ограничивается рядом факторов: сложностью синтеза, высокой стоимостью прекурсоров и необходимостью адаптации под массово применяемые полимеры. Тем не менее активное развитие направлений «зеленой» химии, устойчивых полимеров и материалов с пониженной токсичностью создает благоприятные условия для дальнейшего прогресса в этой области.

Таким образом, полимеры с привитыми антипиренами представляют собой перспективный класс материалов нового поколения, способных удовлетворять требованиям безопасности, экологии и функциональности. Их разработка и масштабное применение открывают путь к созданию более устойчивых и безопасных полимерных систем для широкого круга применений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жирикова З. М., Алоев В. З., Тарчокова М. А. Огнестойкость полимерных материалов и способы ее повышения // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2019. № 3 (25). С. 43–48.
2. Огнестойкие полимеры / И. Ристич [и др.] // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2014. № 1. С. 7–15.
3. Troitzsch J. H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2024. Vol. 7. Iss. 3. P. 263–272. DOI: 10.1016/j.aiepr.2023.05.002
4. Flame-retardant strategies for lignocellulose: recent progress and prospect / H. Liu et al. // Progress in Materials Science. 2026. Vol. 155. Art. 101529. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2025.101529
5. Samani P., van der Meer Y. Life cycle assessment (LCA) studies on flame retardants: A systematic review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 274. Art. 123259. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123259
6. A grafted flame-retardant gel polymer electrolyte stabilizing lithium metal for high-safety lithium metal batteries / C. Shaoshan et al. // J. Mater. Chem. A. 2024. Vol. 12. P. 28296–28306.
7. Editorial: Flame-Retardant Polymeric Materials and Polymer Composites / Y. Shi et al. // Frontiers in Materials. 2021. Vol. 8. DOI: 10.3389/fmats.2021.703123
8. Современные тенденции в разработке антипиренов для полимерных композиций. Состав, свойства, применение / Б. А. Бураков [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 12 (247). С. 7–24. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-12-247-7-24
9. Добавки для понижения горючести полимеров / И. И. Зарипов [и др.] // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 2. С. 156–161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161
10. Селиверстов В. В., Князев А. С. Антипирены для полимерных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 8. С. 42–47. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-8-42-47
11. Multiparameter toxicity assessment of novel DOPO-derived organophosphorus flame retardants / C. Hirsch et al. // Archives of Toxicology. 2017. Vol. 91. DOI: 10.1007/s00204-016-1680-4
12. Akinrinade O. E., Rosa A. H. A global review of PCBs and halogenated flame retardants in indoor air: Implication for human exposure risks // Chemosphere. 2025. Vol. 384. Art. 144495. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144495
13. Han A., Fina G., Camino G. Chapter 12 — Organosilicon Compounds as Polymer Fire Retardants // Polymer Green Flame Retardants / C. D. Papaspyrides, P. Kiliaris (Eds.). Elsevier, 2014. P. 389–418. DOI: 10.1016/B978-0-444-53808-6.00012-3
14. A comprehensive review of reactive flame retardants for polyurethane materials: current development and future opportunities in an environmentally friendly direction / P. Parcheta-Szwindowska et al. // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25 (10). Art. 5512. DOI: 10.3390/ijms25105512
15. Курбанова М. А., Исмаилов И. И. Антипирены на основе борсодержащих кремнийорганических соединений // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2015. № 12. URL: <https://clck.ru/ulTMV> (дата обращения: 22.02.2026).
16. Исследование влияния синергических систем антипиренов на огнетеплостойкость эластомерных композиций / В. Ф. Каблов и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 4 (159). С. 81–84.

17. Tsafack M. J., Levalois-Grützmacher J. Plasma-induced graft-polymerization of flame retardant monomers onto PAN fabrics // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 3503–3510. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.11.030
18. Micro-crosslinking of phosphaphenanthrene/siloxane molecule initiate aggregation flame retardant and toughening enhancement effects on its polycarbonate composite / W. Zhipeng et al. // *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 466. Art. 143169. DOI: 10.1016/j.cej.2023.143169
19. Polymer grafting and its chemical reactions / P. Purohit et al. // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Jan. DOI: 10.3389/fbioe.2022.1044927
20. Minko S. Grafting on solid surfaces: "Grafting to" and "Grafting from" methods // *Polymer Surfaces and Interfaces* / M. Stamm (Ed.). Springer, Berlin, Heidelberg. 2008. P. 215–234. DOI: 10.1007/978-3-540-73865-7_11
21. Grafting from versus grafting to approaches for the functionalization of graphene nanoplatelets with poly(methyl methacrylate) / N. Rubio et al. // *Macromolecules*. 2017. Vol. 50. No. 18. P. 7070–7079. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b01047
22. A novel click-chemistry approach to flame retardant polyurethanes / A. Borreguero et al. // *Reactive and Functional Polymers*. 2013. Vol. 73. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2013.06.003
23. Xu L., Wang W., Yu D. Preparation of a reactive flame retardant and its finishing on cotton fabrics based on click chemistry // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 2044–2050. DOI: 10.1039/C6RA26075F
24. Harnessing metal-free click chemistry: phosphorus and triazole synergy for improved flame retardant epoxy thermosets / I. Gunderen et al. // *Progress in Organic Coatings*. 2025. Vol. 207. Art. 109396. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109396
25. Synthesis of high-molecular-weight bifunctional additives with both flame retardant properties and antistatic properties via ATRP / S. Dong et al. // *ACS Omega*. 2022. Vol. 7. Iss. 48.
26. Hochół A., Flejszar M., Chmielarz P. Advances and opportunities in synthesis of flame retardant polymers via reversible deactivation radical polymerization // *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 214. Art. 110414. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110414
27. Influence of monomer reactivity on radiation grafting of phosphorus flame retardants on flax fabrics / R. Hajj et al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2019. Vol. 166. P. 86–98. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.025
28. Improving the flame retardancy of flax fabrics by radiation grafting of phosphorus compounds / R. Sonnier et al. // *European Polymer Journal*. 2015. Vol. 68. P. 313–325.
29. Preparation of hexakis (4-aldehyde phenoxy) cyclotriphosphazene grafted kaolinite and its synergistic fire resistance in poly(butylene succinate) / S. Zhang et al. // *Polymer Composites*. 2020. Vol. 41. No. 3. P. 1024–1035.
30. Flame-retardant strategy and mechanism of fiber reinforced polymeric composite: a review / X. H. Shi et al. // *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 233. Art. 109663. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109663
31. Ezech E., Udochukwu E. C., Aworabhi E. Applications of fire retardant polymer composites for improved safety in the industry: a review // *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2024. Vol. 90. DOI: 10.1007/s43538-024-00333-7

32. Rubber-based phosphaphenanthrene grafted polymer and its application to fabricate flame retardant polycarbonate blend with satisfied comprehensive mechanical properties / A. Liu et al. // Polymer. 2024. Vol. 299. Art. 126969. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126969
33. Incorporation of a grafted brominated monomer in glass fiber reinforced polypropylene to improve the fire resistance / L. Ferry et al. // Polymer Degradation and Stability. 2001. Vol. 74. P. 449–456. DOI: 10.1016/S0141-3910(01)00182-3
34. The flame-retardant mechanisms and preparation of polymer composites and their potential application in construction engineering / J. Shen et al. // Polymers (Basel). 2021. Vol. 14 (1). Art. 82. DOI: 10.3390/polym14010082
35. Design of compressible flame retardant grafted porous organic polymer based separator with high fire safety and good electrochemical properties / M. Xiaowei et al. // Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 405. Art. 126946. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126946
36. Flame-retardant self-healing polymers: a review / M. Kianfar et al. // Journal of Polymer Science. 2024. DOI: 10.1002/pol.20240489
37. Morgan A. B., Gilman J. W. An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions // Fire and Materials. 2013. Vol. 37. No. 4. DOI: 10.1002/fam.2128
38. New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites / F. Laoutid et al. // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2009. Vol. 63. P. 100–125. DOI: 10.1016/j.mser.2008.09.002

REFERENCES

1. Zhirikova Z. M., Aloe V. Z., Tarchokova M. A. Fire resistance of polymeric materials and methods for its improvement // Bulletin of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov. 2019. No. 3 (25). P. 43–48.
2. Flame-resistant polymers / I. Ristic et al. // Supervisory activities and forensic examination in the security system. 2014. No. 1. P. 7–15.
3. Troitzsch J. H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2024. Vol. 7. Iss. 3. P. 263–272. DOI: 10.1016/j.aiepr.2023.05.002
4. Flame-retardant strategies for lignocellulose: recent progress and prospect / H. Liu et al. // Progress in Materials Science. 2026. Vol. 155. Art. 101529. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2025.101529
5. Samani P., van der Meer Y. Life cycle assessment (LCA) studies on flame retardants: A systematic review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 274. Art. 123259. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123259
6. A grafted flame-retardant gel polymer electrolyte stabilizing lithium metal for high-safety lithium metal batteries / C. Shaoshan et al. // J. Mater. Chem. A. 2024. Vol. 12. P. 28296–28306.
7. Editorial: Flame-Retardant Polymeric Materials and Polymer Composites / Y. Shi et al. // Frontiers in Materials. 2021. Vol. 8. DOI: 10.3389/fmats.2021.703123
8. Modern trends in the development of flame retardants for polymer compositions. Composition, properties, application / B. A. Buravov et al. // Bulletin of the Volgograd State Technical University. 2020. No. 12 (247). P. 7–24. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-12-247-7-24

9. Additives for reducing the flammability of polymers / I. I. Zaripov et al. // *Nanotechnology in Construction: Scientific Online Journal*. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 156–161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161
10. Seliverstov V. V., Knyazev A. S. Flame retardants for polymeric materials // *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2023. No. 8. P. 42–47. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-8-42-47
11. Multiparameter toxicity assessment of novel DOPO-derived organophosphorus flame retardants / C. Hirsch et al. // *Archives of Toxicology*. 2017. Vol. 91. DOI: 10.1007/s00204-016-1680-4
12. Akinrinade O. E., Rosa A. H. A global review of PCBs and halogenated flame retardants in indoor air: Implication for human exposure risks // *Chemosphere*. 2025. Vol. 384. Art. 144495. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144495
13. Han A., Fina G., Camino G. Chapter 12 — Organosilicon Compounds as Polymer Fire Retardants // *Polymer Green Flame Retardants* / C. D. Papaspyrides, P. Kiliaris (Eds.). Elsevier, 2014. P. 389–418. DOI: 10.1016/B978-0-444-53808-6.00012-3
14. A comprehensive review of reactive flame retardants for polyurethane materials: current development and future opportunities in an environmentally friendly direction / P. Parcheta-Szwindowska et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25 (10). Art. 5512. DOI: 10.3390/ijms25105512
15. Kurbanova M. A., Ismailov I. I. Flame retardants based on boron-containing organosilicon compounds // *Bulletin of Higher Education Institutions. Chemistry and Chemical Technology*. 2015. No. 12. URL: <https://clck.su/ulTMV> (accessed 22.02.2026).
16. Study of the influence of synergistic flame retardant systems on the fire and heat resistance of elastomer composites / V. F. Kablov et al. // *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 2015. No. 4 (159). P. 81–84.
17. Tsafack M. J., Levalois-Grützmacher J. Plasma-induced graft-polymerization of flame retardant monomers onto PAN fabrics // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 3503–3510. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.11.030
18. Micro-crosslinking of phosphaphenanthrene/siloxane molecule initiate aggregation flame retardant and toughening enhancement effects on its polycarbonate composite / W. Zhipeng et al. // *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 466. Art. 143169. DOI: 10.1016/j.cej.2023.143169
19. Polymer grafting and its chemical reactions / P. Purohit et al. // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Jan. DOI: 10.3389/fbioe.2022.1044927
20. Minko S. Grafting on solid surfaces: "Grafting to" and "Grafting from" methods // *Polymer Surfaces and Interfaces* / M. Stamm (Ed.). Springer, Berlin, Heidelberg. 2008. P. 215–234. DOI: 10.1007/978-3-540-73865-7_11
21. Grafting from versus grafting to approaches for the functionalization of graphene nanoplatelets with poly(methyl methacrylate) / N. Rubio et al. // *Macromolecules*. 2017. Vol. 50. No. 18. P. 7070–7079. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b01047
22. A novel click-chemistry approach to flame retardant polyurethanes / A. Borreguero et al. // *Reactive and Functional Polymers*. 2013. Vol. 73. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2013.06.003
23. Xu L., Wang W., Yu D. Preparation of a reactive flame retardant and its finishing on cotton fabrics based on click chemistry // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 2044–2050. DOI: 10.1039/C6RA26075F

24. Harnessing metal-free click chemistry: phosphorus and triazole synergy for improved flame retardant epoxy thermosets / I. Gunderen et al. // *Progress in Organic Coatings*. 2025. Vol. 207. Art. 109396. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109396
25. Synthesis of high-molecular-weight bifunctional additives with both flame retardant properties and antistatic properties via ATRP / S. Dong et al. // *ACS Omega*. 2022. Vol. 7. Iss. 48.
26. Hochół A., Flejszar M., Chmielarz P. Advances and opportunities in synthesis of flame retardant polymers via reversible deactivation radical polymerization // *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 214. Art. 110414. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110414
27. Influence of monomer reactivity on radiation grafting of phosphorus flame retardants on flax fabrics / R. Hajj et al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2019. Vol. 166. P. 86–98. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.025
28. Improving the flame retardancy of flax fabrics by radiation grafting of phosphorus compounds / R. Sonnier et al. // *European Polymer Journal*. 2015. Vol. 68. P. 313–325.
29. Preparation of hexakis (4-aldehyde phenoxy) cyclotriphosphazene grafted kaolinite and its synergistic fire resistance in poly(butylene succinate) / S. Zhang et al. // *Polymer Composites*. 2020. Vol. 41. No. 3. P. 1024–1035.
30. Flame-retardant strategy and mechanism of fiber reinforced polymeric composite: a review / X. H. Shi et al. // *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 233. Art. 109663. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109663
31. Ezech E., Udochukwu E. C., Aworabhi E. Applications of fire retardant polymer composites for improved safety in the industry: a review // *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2024. Vol. 90. DOI: 10.1007/s43538-024-00333-7
32. Rubber-based phosphaphenanthrene grafted polymer and its application to fabricate flame retardant polycarbonate blend with satisfied comprehensive mechanical properties / A. Liu et al. // *Polymer*. 2024. Vol. 299. Art. 126969. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126969
33. Incorporation of a grafted brominated monomer in glass fiber reinforced polypropylene to improve the fire resistance / L. Ferry et al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2001. Vol. 74. P. 449–456. DOI: 10.1016/S0141-3910(01)00182-3
34. The flame-retardant mechanisms and preparation of polymer composites and their potential application in construction engineering / J. Shen et al. // *Polymers (Basel)*. 2021. Vol. 14 (1). Art. 82. DOI: 10.3390/polym14010082
35. Design of compressible flame retardant grafted porous organic polymer based separator with high fire safety and good electrochemical properties / M. Xiaowei et al. // *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 405. Art. 126946. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126946
36. Flame-retardant self-healing polymers: a review / M. Kianfar et al. // *Journal of Polymer Science*. 2024. DOI: 10.1002/pol.20240489
37. Morgan A. B., Gilman J. W. An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions // *Fire and Materials*. 2013. Vol. 37. No. 4. DOI: 10.1002/fam.2128
38. New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites / F. Laoutid et al. // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009. Vol. 63. P. 100–125. DOI: 10.1016/j.mser.2008.09.002

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якубова Татьяна Валерьевна, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры химии и процессов горения Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 488997; ORCID: 0009-0006-1880-8368; e-mail: tatanaakubova71723@gmail.com

Шкуро Алексей Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологий ЦБП и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (620100, Российская Федерация, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37); РИНЦ ID: 652044; Scopus AuthorID: 56151722700; ResearcherID: A-2772-2014; ORCID: 000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Tatyana V. Yakubova, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Combustion Processes, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 488997; ORCID: 0009-0006-1880-8368; e-mail: tatanaakubova71723@gmail.com

Aleksey E. Shkuro, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Pulp and Paper Industry Technologies and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (37 Sibirsky Tract, Ekaterinburg, 620100, Russian Federation); ID RSCI: 652044; Scopus AuthorID: 56151722700; ResearcherID: A-2772-2014; ORCID: 000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

УДК 614.841

ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И СВЯЗИ ПРИ НИЗОВЫХ ПОЖАРАХ

Монахов Антон Андреевич¹, Мельников Никита Олегович^{1, 2}, Акинин Николай Иванович¹,
Максименко Сергей Анатольевич³

¹ РХТУ им. Д. И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

² Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В. А. Кучеренко,
г. Москва, Российская Федерация

³ Сенежская НПЛ защиты древесины, г. Солнечногорск, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема воздействия низовых пожаров на деревянные опоры линий электропередачи и связи, пропитанные трудновымываемыми биозащитными препаратами. Изучена возможность повышения их огнестойкости при помощи огнезащитных бандажей на основе стекловолоконных и кремнеземных тканей. Методами дифференциально-термического анализа изучено поведение образцов четырех видов тканей при нагревании и получены зависимости потери массы и скорости потери массы от температуры стекловолоконной и кремнеземной ткани с различными покрытиями. Установлено, что ткани без дополнительного покрытия в процессе эксперимента не теряют массу при нагревании до 1 000 °С и термическое разложение их отсутствует. Ткани с дополнительным полиуретановым покрытием начинают терять массу при 250 °С, и потеря ее составляет от 4 % до 8 % в зависимости от марки. По методикам ГОСТ 12.1.044–2018 и ГОСТ Р 53292–2009 проведены исследования огнезащитных свойств исследуемых тканей с различными способами крепления к древесине. В результате проведенных экспериментов получены зависимости изменения температуры продуктов горения от времени эксперимента и средние потери массы исследуемых образцов. Установлено, что все исследуемые ткани имеют первую группу огнезащитной эффективности, а некоторые переводят также древесину в трудногорючий материал. Все образцы показали значительное снижение роста температуры газообразных продуктов горения относительно контрольного образца незащищенной древесины.

Ключевые слова: огнезащитный бандаж, огнезащита древесины, огнезащитная эффективность, низовой пожар, деревянные опоры

Для цитирования: Повышение огнестойкости деревянных опор линий электропередачи и связи при низовых пожарах / А. А. Монахов [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 62–76.

INCREASING THE FIRE RESISTANCE OF WOODEN POLES OF POWER AND COMMUNICATION LINES DURING SURFACE FIRES

Anton A. Monakhov¹, Nikita O. Melnikov^{1, 2}, Nikolai I. Akinin¹, Sergey A. Maksimenko³

¹ Mendeleev University, Moscow, Russian Federation

² Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko, Moscow, Russian Federation

³ Senezh Scientific and Production Laboratory of Wood Protection, Solnechnogorsk, Russian Federation

Abstract. The article discusses the problem of the impact of surface fires on wooden supports of power transmission and communication lines treated with leach-resistant bioprotective agents. The possibility of increasing their fire resistance using fire-resistant bandages has been studied. Using differential thermal analysis (DTA), the behavior of four types of fabric samples during heating was examined, and the dependences of mass loss (TG curves) and mass loss rate (DTG curves) on temperature were obtained for fiberglass and silica fabrics with various coatings. It was established that fabrics without additional coating do not lose mass when heated up to 1 000 °C during the experiment, and thermal decomposition is absent. Polyurethane-coated fabrics exhibit mass loss starting at 250 °C, ranging from 4 % to 8 % based on the specific grade. According to the methods of GOST 12.1.044–2018 and GOST R 53292–2009, the fire-resistant properties of fiberglass and silica fabrics with various coatings and methods of attachment to wood have been investigated. As a result of the conducted experiments, the dependence of the temperature change of combustion products on the time of the experiment and the average mass loss of the studied samples were obtained. It was found that all the studied fabrics have the first group of fire protection efficiency, and some of them also convert wood into a non-combustible material. All the samples showed a significant decrease in the temperature increase of gaseous combustion products relative to the control sample of unprotected wood.

Keywords: fire-retardant bandages, fire-retardant treatment of wood, fire-retardant efficiency, surface fires, wooden poles

For citation: Increasing the fire resistance of wooden poles of power and communication lines during surface fires / A. A. Monakhov et al. // Technosphere safety. 2026. No. 2 (51). P. 62–76.

Введение

В настоящее время при строительстве и плановой реновации линий электропередачи (далее — ЛЭП) и связи все еще широкое применение находят деревянные опоры. По некоторым оценкам, только ПАО «Россети» эксплуатирует около 17 млн деревянных опор ЛЭП. Их преимущество связано с рядом обстоятельств: себестоимость; удобство доставки и монтажа (меньший вес по сравнению с бетонными опорами); большая устойчивость к попе-

речным нагрузкам (ветер и падение дерева на ЛЭП); возобновляемость исходного сырья и, конечно же, долговечность. Использование древесины в качестве материала все еще является универсальным сочетанием затрат на производство опоры и технических характеристик материала, а отказ от воздушных ЛЭП и перенос их под землю может обходиться в 10 раз дороже существующих решений [1]. В работе [2] подробно показаны преимущества деревянных опор по сравнению с другими материалами.

Учитывая неодолимость процессов биологического разрушения древесины в условиях контакта с землей, срок службы деревянных опор без специальных защитных мер невелик. По данным долговременных наблюдений, средний срок службы химически незащищенных опор из древесины сосны составляет от 4 до 6 лет в условиях средней полосы России [3]. Поскольку стоимость замены опоры в 2,5 раза выше первоначальной стоимости ее установки, непропитанные опоры обычно не применяются.

Наиболее распространенным по экономическим соображениям, с точки зрения надежности защиты, является автоклавный способ пропитки по типу «вакуум — давление — вакуум» (ВДВ) по ГОСТ 20022.6–93 [4], который широко используется в России более 80 лет. Средняя продолжительность службы обработанной опоры при этом варьируется от 30 до 40 лет [5]. В условиях растущей стоимости качественной древесины, а также экологических проблем, связанных с утилизацией химически обработанных опор, требуются инновационные методы восстановления и поддержания структурной целостности эксплуатируемых деревянных опор [6].

В настоящий момент для биологической защиты деревянных опор ЛЭП в России используются в основном антисептики типа ССА (хром — медь — мышьяк) (получили наибольшее распространение), СС (хром — медь) и ССФ (хром — медь — фтор) [7]. У некоторых специалистов есть мнение, что трудновымываемые препараты на основе группировки СС, применяемые для биозащиты, имеют и огнезащитные свойства [8].

В работе [9] исследования показали, что трудновымываемые ССА-, ССФ- и СС-препараты с поглощениями, при которых

ГОСТ 20022.0–2016 [10] регламентирует их применение, а именно около 10 кг/м^3 для биозащиты деревянных опор ЛЭП и связи не обладают огнезащитной эффективностью.

Единственным стандартизованным препаратом на основе группировки СС в соответствии с ГОСТ 28815–2018 [11] является ХМХА-1110, обеспечивающий первую группу огнезащитной эффективности по ГОСТ 16363–98 [12] (в России ГОСТ Р 53292–2009 [13]) при общих поглощениях $70\text{--}85 \text{ кг/м}^3$, но данный препарат рекомендован к применению в I–V классах условий службы по ГОСТ 20022.2–2018 [14], то есть там, где отсутствует его вымывание из древесины. Других разработанных, рекомендованных и применяемых на практике трудновымываемых огнебиозащитных средств для глубокой пропитки древесины не существует. Поэтому повысить огнестойкость опор можно только дополнительными мероприятиями уже после автоклавной пропитки трудновымываемыми антисептиками.

Это приводит к необходимости разработки как новых огнебиозащитных средств, так и дополнительных решений, которые в совокупности с обработкой имеющимися составами обеспечат требуемый уровень защиты. Более того сегодня вводятся в действие нормативные документы, регламентирующие обязательную противопожарную защиту опор ЛЭП. Так, например, в соответствии с ГОСТ Р 70237–2022 [15] п. 4.7 часть «д» деревянные опоры должны быть обработаны с учетом требований ГОСТ 20022.0–2016 [10], ГОСТ Р 53292–2009 [13] специальными консервантами, обеспечивающими срок службы не менее 40 лет, антисептиками и обязательно антипиренами, предотвращающими загнивание и загорание стоек. В местах возможного возникновения низовых пожаров

применение деревянных опор без проведения дополнительных противопожарных мероприятий не допускается.

Ввиду отсутствия огнебиозащитных препаратов, обеспечивающих срок службы древесины 40 лет, необходимо проводить изыскание других технических решений по повышению огнестойкости уже пропитанных биозащитными препаратами деревянных опор ЛЭП.

В качестве средства повышения огнестойкости возможно применение противопожарных бандажей, устанавливаемых уже на эксплуатируемую опору. Схема применения такого бандажа представлена

на рис. 1. Анализ показал наличие такого рода импортных аналогов. Например, эффективность использования огнестойкой стеклоткани с различными дополнительными слоями для огнезащиты древесины подтверждается в патенте [16]. В работе [17] показана неэффективность применения вспучивающихся красок и протестированы защитные ткани для деревянных опор в условиях низового пожара. Полученные результаты показали, что тканевая защита дает удовлетворительные результаты, легко монтируется на месте, позволяет защищать уже установленные опоры и заменять их после пожара.

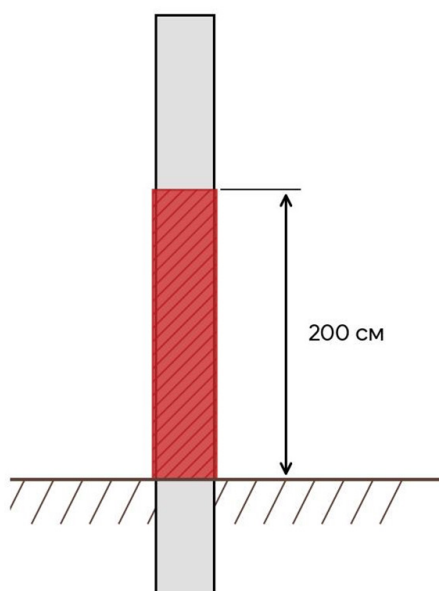


Рис. 1. Схема крепления огнезащитного бандажа на опору

Fig. 1. Installation diagram of the fire-retardant bandage on pole

Настоящая работа посвящена изучению стекловолоконных и кремнеземных тканей отечественного производства и их свойств в качестве основы огнезащитного бандажа для деревянных опор ЛЭП и связи.

Материалы и методы

Объектами исследования являются следующие ткани:

- стекловолоконная по ГОСТ 19170–2001 [18] марки Т-11 без специального покрытия и СТ-ПУ с покрытием на основе полиуретана;
- кремнеземная марки по ТУ 6-48-64-91 [19] КТ-11-С8/3-ТО без специального покрытия и КА-600-ПУ с покрытием на основе полиуретана.

Характеристики тканей, заявляемые производителем, представлены в таблице.

Таблица
Характеристики исследуемых тканей
 Table
 The characteristics of the studied fabrics

Марка ткани Fabric grade	Плотность, г/м ² Area Weight, g/m ²	Номинальная толщина ткани, мм Nominal fabric thickness, mm	Разрывная нагрузка, Н, не менее Tensile strength, N, min		Рабочая температура, °С, до Service temperature, °C, up to
			Основа Warp	Уток Weft	
Т-11	385	0,28	2 744	1 568	550
СТ-ПУ	430	0,46	2 475	1 670	550
КТ-11-С8/3-ТО	580 ± 60	0,68	735	343	1 000
КА-600-ПУ	650 ± 30	0,79	3 807,6	2 280,6	1 000

Поведение образцов тканей при нагревании исследовали с помощью дифференциально-термического анализа (ДТА), который проводили на дериватографе Q-1500 d системы F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey по методике, подробно описанной в работе [20]. Поведение тканей под действием направленного пламени газовой горелки оценивалось визуально.

В качестве методик для оценки эффективности использования исследуемых тканей в виде огнезащитного банджа были выбраны ГОСТ 12.1.044–2018 [21] с целью определения группы трудногорючих и горючих твердых веществ, а также ГОСТ Р 53292–2009 [13] с целью определения группы огнезащитной эффективности.

Исследования проводились на образцах прямослойной воздушно-сухой древесины заболони сосны с влажностью 8–15 % и средней плотностью 450 кг/м³ в виде прямоугольных брусков с поперечным сечением 30 × 60 мм и длиной вдоль волокон 150 мм, обернутых исследуемой тканью в один и два слоя. Крепление ткани к образцу древесины осуществлялось с помощью металлических скоб или жидкого стекла по ГОСТ 13078–2021 [22] со средним расходом 1 300 мл/м².

Для исследования использовалась установка ОТМ (рис. 2), которая представляет собой керамическую камеру прямоугольной формы высотой 295 ± 2 мм и имеющую в сечении квадрат со стороной стенки 88 ± 2 мм, металлическую подставку, газовую горелку диаметром $7,0 \pm 0,1$ мм, зонт с рукояткой, шаблон (рис. 3), предназначенный для контроля положения образца относительно его вертикальной оси, установленный соосно на верхнюю кромку реакционной камеры и смотровое зеркало для наблюдения за образцом. Внутренняя поверхность камеры покрывалась двумя слоями алюминиевой фольги толщиной не более 0,2 мм, которую по мере прогорания и/или загрязнения заменяли на новую.

По методике ГОСТ 12.1.044–2018 [21] испытания проводили в разогретой до 200 ± 5 °С печи в течение 300 ± 2 с, в процессе испытания регистрировали: максимальную температуру дымовых газов и время от начала испытания до достижения максимальной температуры. В конце горелку выключали и образец оставляли в камере до полного остывания. Остывший образец извлекали из камеры и измеряли его массу.

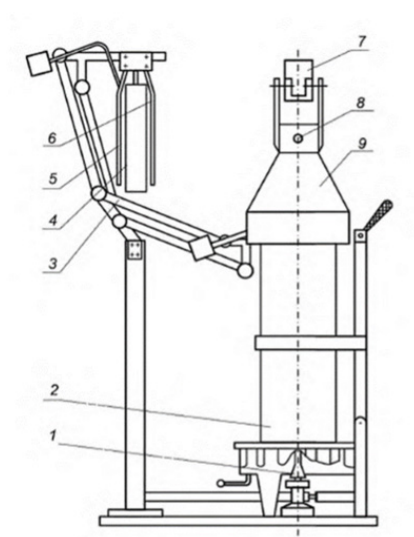


Рис. 2. Общий вид установки по определению группы трудногорючих и горючих твердых веществ и материалов:
1 — горелка; 2 — реакционная камера; 3 — механизм ввода образца; 4 — образец; 5, 6 — держатели образца;
7 — зеркало; 8 — термоэлектрический преобразователь; 9 — зонд

Fig. 2. General view of the apparatus for determining the group of slow-burning and combustible solid substances and materials:

1 — burner; 2 — reaction chamber; 3 — specimen input mechanism; 4 — specimen; 5, 6 — specimen holders;
7 — mirror; 8 — thermoelectric converter; 9 — probe

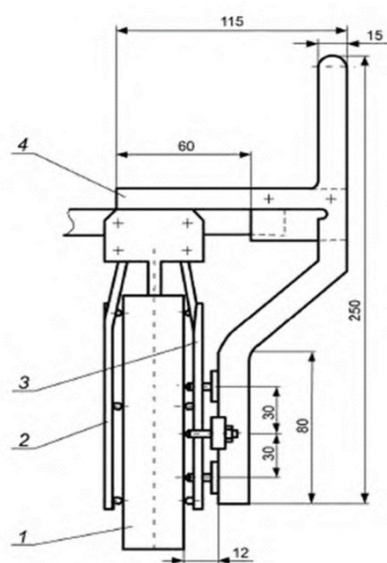


Рис. 3. Шаблон: 1 — образец; 2, 3 — держатели образца; 4 — шаблон

Fig. 3. Template: 1 — specimen; 2, 3 — specimen holders; 4 — template

Для каждого образца вычисляли максимальное приращение температуры по формуле:

$$\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_0, \quad (1)$$

где:

$t_{\max}$ — максимальная температура газообразных продуктов горения исследуемого материала, °C;

t_0 — начальная температура испытания, равная 200 °C.

Для каждого образца вычисляют уменьшение массы (Δm) в процентах по формуле:

$$\Delta m = \frac{m_n - m_k}{m_n} \cdot 100, \quad (2)$$

где:

m_n — масса образца до испытания, г;

m_k — масса образца после испытания, г.

По значению максимального прираще-
ния температуры $\Delta t_{\max}$ и потере массы Δm
материалы классифицировали:

- на трудногорючие — $\Delta t_{\max}$ меньше
60 °С и Δm меньше 60 %;
- горючие — $\Delta t_{\max}$ больше и равно 60 °С
и Δm больше или равно 60 %.

Горючие материалы подразделяли в за-
висимости от времени (τ) достижения $t_{\max}$:

- на трудновоспламеняемые, если вре-
мя достижения $t_{\max}$ больше 180 с;
- легковоспламеняемые, если время
достижения $t_{\max}$ меньше 180 с.

По методике ГОСТ Р 53292–2009 [13]
время испытания составляло 120 с. По фор-
муле (2) вычислялось уменьшение массы
образца в процентах. По результатам испы-
тания устанавливалась группа огнезащит-
ной эффективности испытанного покрытия
при данном способе его применения. При
потере массы образца не более 9 % уста-
навливалась первая группа огнезащитной
эффективности. При потере массы более
9 %, но не более 25 %, устанавливалась вто-
рая группа огнезащитной эффективности.

При потере массы более 25 % считали, что
данный образец не обеспечивает огнезащиту
древесины.

Результаты и их обсуждение

Методами ДТА получены зависимости
потери массы (ТГ-кривые, рис. 4) и скорости
потери массы (ДТГ-кривые, рис. 5) от темпе-
ратуры исследуемых тканей. Ткани марок
Т-11 и КТ-11-С8/3-ТО без дополнительного
покрытия в процессе эксперимента не теря-
ли массу при нагревании до 1 000 °С и тер-
мическое разложение отсутствовало. Ткани
с дополнительным полиуретановым по-
крытием начинали терять массу при 250 °С,
и потеря ее составила 4 % для марки КА-
600-ПУ и 8 % — для марки СТ-ПУ.

При визуальном наблюдении за пове-
дением тканей под действием пламени
газовой горелки с температурой 1 250 °С
кремнеземные ткани не претерпевали замет-
ных изменений, тогда как стеклоткани начи-
нали плавиться и уменьшаться в объеме.
Полиуретановые покрытия при этом сгорали.

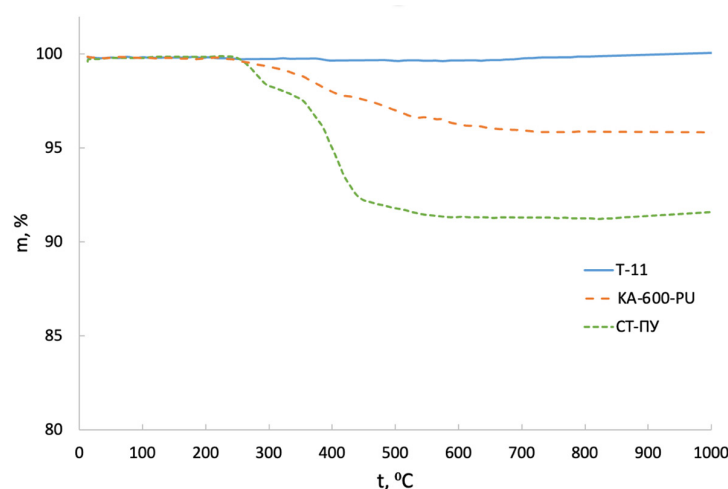


Рис. 4. ТГ-кривые исследуемых тканей

Fig. 4. TG curves of the studied fabric

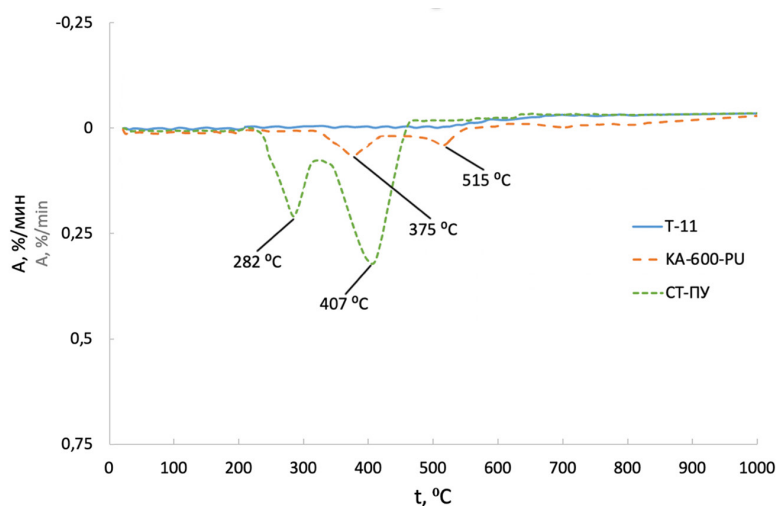


Рис. 5. ДТГ-кривые исследуемых тканей

Fig. 5. DTG curves of the studied fabric

По методике ГОСТ 12.1.044–2018 [21] получены зависимости изменения температуры газообразных продуктов горения от времени эксперимента для деревянных брусков, обернутых одним и двумя слоями исследуемых тканей с креплением на металлические скобы (рис. 6, 7). Все образцы показали значительное снижение роста температуры газообразных продуктов горения относительно контрольного образца незащищенной древесины. Для образцов ткани с полиуретановым покрытием наблюдается снижение роста температуры газообразных продуктов горения и средней потери массы образца в ходе эксперимента. В ходе экспери-

мента ткань теряла свою гибкость, при этом сохраняя целостность оболочки вокруг деревянного образца. Использование второго слоя также снижало динамику роста температуры и в случае со стеклотканью с полиуретановым покрытием использование двух слоев позволило перевести образец в категорию «трудногорючий» в соответствии с классификацией ГОСТ 12.1.044–2018 [21]. Остальные исследуемые образцы были классифицированы как «горючие, легковоспламеняемые». Внешний вид образцов до (а), после 2 минут (б) и 5 минут (в) испытания с тканью Т-11, КТ-11-С8/3-ТО, КА-600-PU представлен на рис. 8, 9 и 10 соответственно.

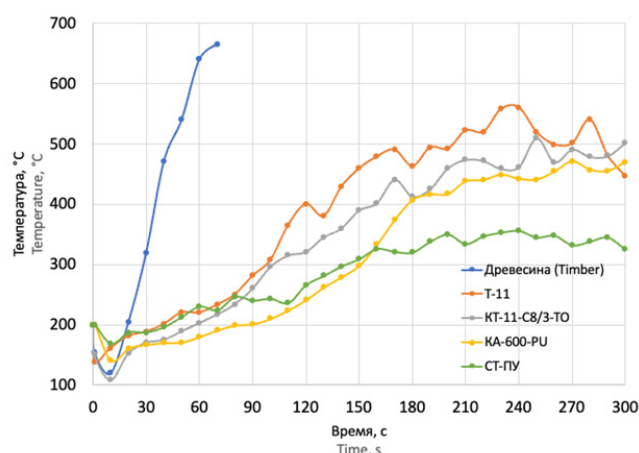


Рис. 6. Зависимости изменения температуры газообразных продуктов горения от времени для образцов с одним слоем ткани

Fig. 6. Dependence of the temperature change of gaseous combustion products on time for samples with one layer of fabric

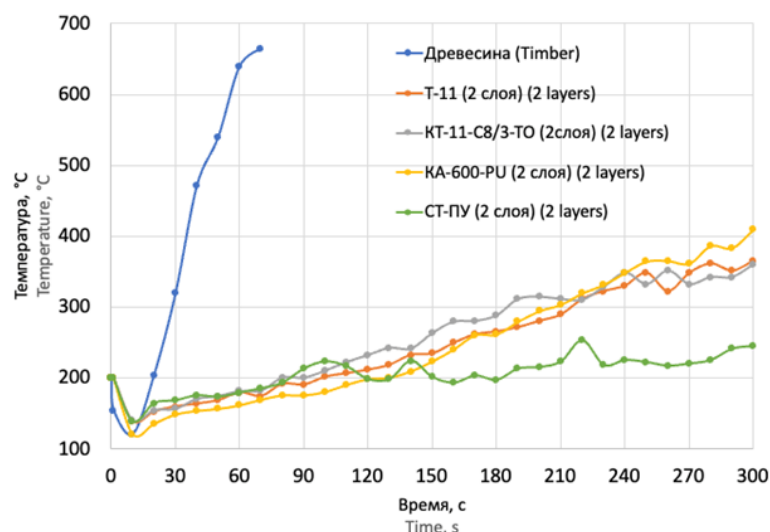


Рис. 7. Зависимости изменения температуры газообразных продуктов горения от времени для образцов с двумя слоями ткани

Fig. 7. Dependence of the temperature change of gaseous combustion products on time for samples with two layers of fabric



а (а)



б (б)



в (с)

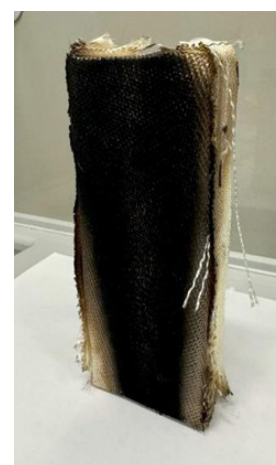
Рис. 8. Внешний вид образцов до (а), после 2 минут (б) и 5 минут (в) испытания с тканью Т-11
Fig. 8. Appearance of the samples before (а), after 2 minutes (б), and after 5 minutes (в) of testing with T-11 fabric



а (а)



б (б)



в (с)

Рис. 9. Внешний вид образцов до (а), после 2 минут (б) и 5 минут (в) испытания с тканью КТ-11-С8/3-ТО
Fig. 9. Appearance of the samples before (а), after 2 minutes (б), and after 5 minutes (в) of testing with КТ-11-С8/3-ТО fabric

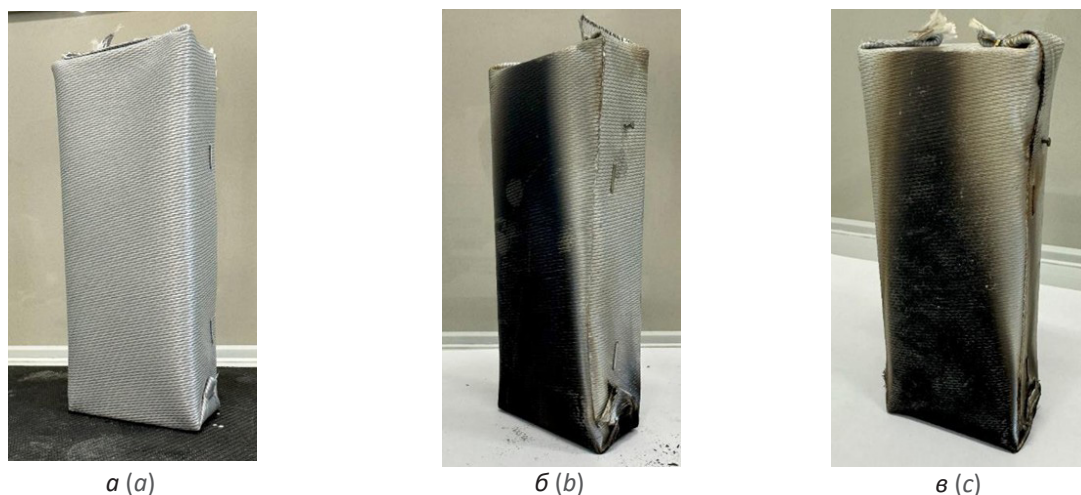


Рис. 10. Внешний вид образцов до (а), после 2 минут (б) и 5 минут (в) испытания с тканью КА-600-PU

Fig. 10. Appearance of the samples before (a), after 2 minutes (b), and after 5 minutes (c) of testing with KA-600-PU fabric

В качестве альтернативы креплению на металлические скобы было рассмотрено крепление образцов ткани к древесине посредством жидкого стекла. Данный способ крепления позволил еще заметнее снизить динамику роста температуры газообраз-

ных продуктов горения образцов (рис. 11) и перевести образец с тканью КА-600-PU из категории «легковоспламеняемых» в категорию «трудновоспламеняемых», а с тканями Т-11 и КТ-11-С8/3-ТО из «горючих» в «трудногорючие».

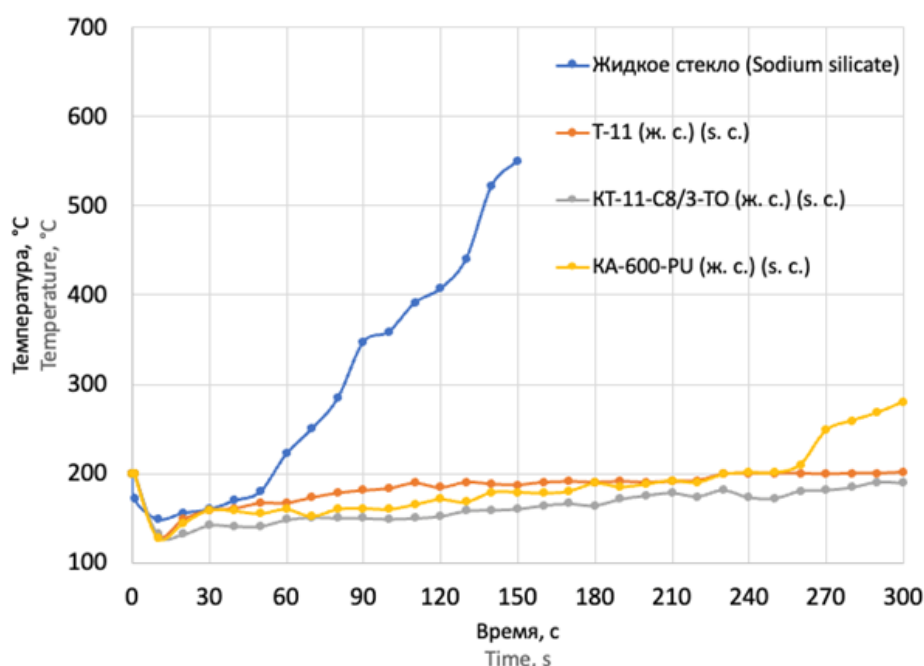


Рис. 11. Зависимости изменения температуры газообразных продуктов горения от времени при креплении ткани на жидкое стекло

Fig. 11. Dependence of the temperature change of gaseous combustion products on time when fabric is attached to liquid glass

Данный эффект был достигнут благодаря механизму термического разложения жидкого стекла, при котором в процессе

нагрева происходило удаление связанной воды, образуя пористую белую массу и, подобно действию прочих вспучивающихся

составов, замедляя нагрев древесины. Стоит отметить, что данный вид крепления не подходит для показавшей лучшие значения в ходе эксперимента со скобами стеклоткани с полиуретановым покрытием. В ходе испытания стеклоткани с полиуретановым покрытием в сочетании с жидким стеклом образец терял целостность, трескался и пламя попадало напрямую к образцу древесины, вызывая ее открытое горение. Внешний вид образцов до (а), после 2 минут (б) и 5 минут

(в) испытания с тканью Т-11, КТ-11-С8/3-ТО, КА-600-PU представлен на рис. 12, 13 и 14 соответственно.

В ходе испытаний по методике ГОСТ Р 53292–2009 [13] все исследуемые образцы тканей в сочетании с древесиной показали значения потери масс, соответствующие первой группе огнезащитной эффективности. Это позволяет сделать вывод о возможности использования бандажей в качестве альтернативы огнезащитным составам.

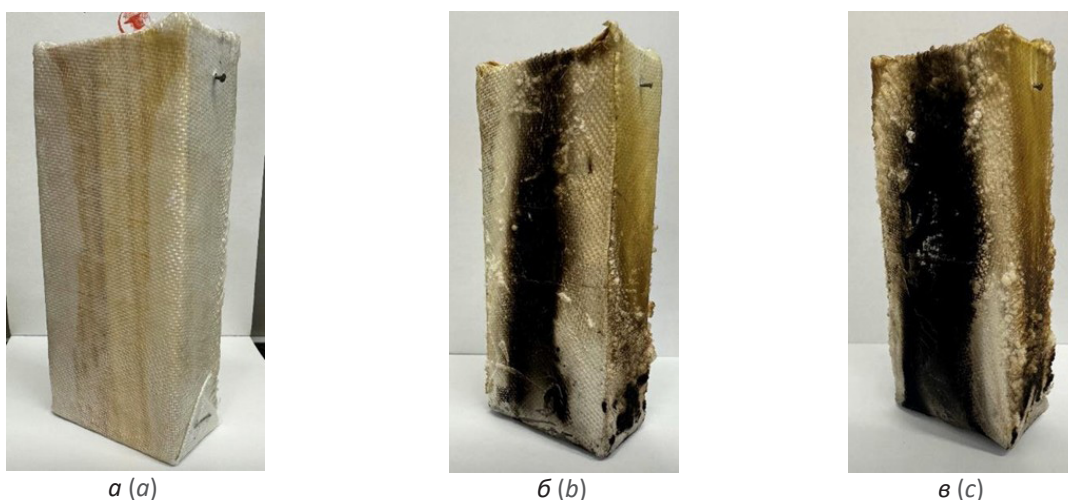


Рис. 12. Внешний вид образцов до (а), после 2 минут (б) и 5 минут (в) испытания с тканью Т-11, прикрепленной на жидкое стекло

Fig. 12. Appearance of the samples before (a), after 2 minutes (b), and after 5 minutes (c) of testing with T-11 fabric attached to the liquid glass



Рис. 13. Внешний вид образцов до (а), после 2 минут (б) и 5 минут (в) испытания с тканью КТ-11-С8/3-ТО, прикрепленной на жидкое стекло

Fig. 13. Appearance of the samples before (a), after 2 minutes (b), and after 5 minutes (c) of testing with KT-11-C8/3-TO fabric attached to the liquid glass

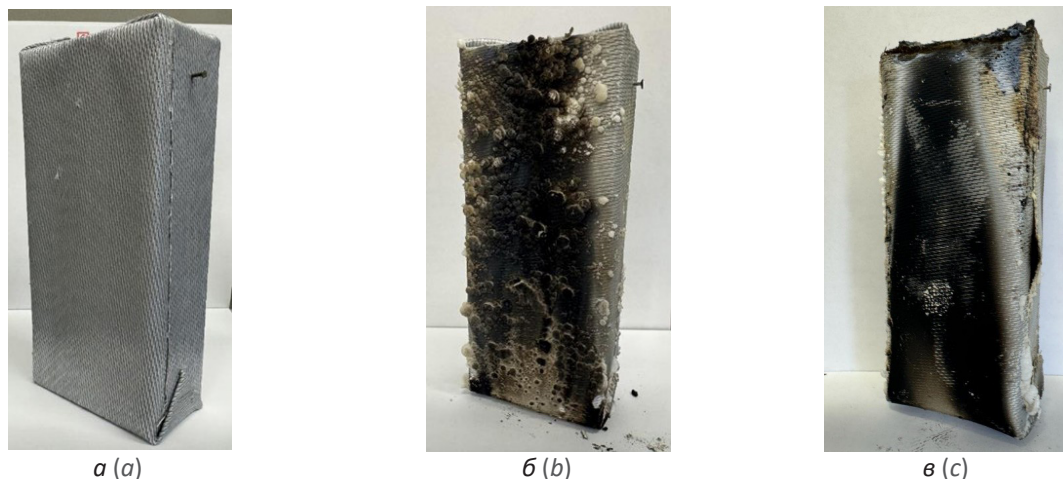


Рис. 14. Внешний вид образцов до (а), после 2 минут (б) и 5 минут (в) испытания с тканью КА-600-ПУ, прикрепленной на жидкое стекло

Fig. 14. Appearance of the samples before (a), after 2 minutes (b), and after 5 minutes (c) of testing with KA-600-PU fabric attached to the liquid glass

Закключение

В результате проведенного исследования установлено, что на сегодняшний день не существует трудновываемых огнебиозащитных составов, которые можно применять при глубокой пропитке деревянных опор ЛЭП и связи и обеспечивающих срок эксплуатации 40 лет. Поэтому защитить опоры от воздействия низовых пожаров можно

только дополнительными мероприятиями уже после автоклавной пропитки трудно-вываемыми антисептиками. В работе показано, что наиболее доступным способом может быть применение огнезащитных бандажей на основе различных тканей, которые крепятся уже на установленную опору, переводят древесину в трудносгораемый материал и обеспечивают первую группу огнезащитной эффективности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bernhardt B. Wood Poles Still Best Alternative for Most Uses // Natural Gas & Electricity. 2017. No. 34. P. 9–14. DOI: 10.1002/gas.22002
2. Шергунова Д. М. Пропитанные деревянные опоры — идеальный материал для воздушных линий электропередачи // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2007. № 2 (20). С. 163–167.
3. Никанорова А. И. Консервирование столбов для воздушных линий связи. М., 1951. 34 с.
4. ГОСТ 20022.6–93. Защита древесины. Способы пропитки. Минск, 1994. 20 с.
5. Bingel N. G. Cost saving benefits of wood structure maintenance // Proceedings of ESMO'95 — 1995 IEEE 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance. New York, 1995. P. 11–16. DOI: 10.1109/TDCLLM.1995.485030

6. Polizois D., Kell Jon A. Repair and rehabilitation of wood utility poles with fibre-reinforced polymers // Canadian Journal of Civil Engineering. 2007. No. 34 (1). P. 116–119. DOI: 10.1139/l06-105
7. Современные трудновываемые препараты для биологической защиты деревянных опор линий электропередач и связи / Н. О. Мельников [и др.] // Химическая промышленность сегодня. 2019. № 1. С. 32–37.
8. Беленков Д. А., Левинский Ю. Б., Стенина Е. И. Изучение свойств древесины, пропитанной антисептиком УЛТАН // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : труды международного евразийского симпозиума / под ред. И. Т. Глебова. Екатеринбург, 2006. С. 49–52.
9. Винокурова В. В., Монахов А. А., Мельников Н. О. Исследование огнезащитающей способности трудновываемых препаратов для пропитки древесины опор ЛЭП и связи // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35, № 10 (245). С. 15–17.
10. ГОСТ 20022.0–2016. Защита древесины. Параметры защищенности. М., 2017. 52 с.
11. ГОСТ 28815–2018. Растворы водные защитных средств для древесины. Технические условия. М., 2018. 16 с.
12. ГОСТ 16363–98. Средства защитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств. Минск, 1998. 6 с.
13. ГОСТ Р 53292–2009. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний. М., 2019. 15 с.
14. ГОСТ 20022.2–2018. Защита древесины. Классификация. М., 2018. 12 с.
15. ГОСТ Р 70237–2022. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Установки электрические. Правила устройства. Воздушные линии электропередачи напряжением до 1 кВ. Общие требования. М., 2022. 44 с.
16. Hu Zhengping. Electric pole fireproof sleeve. Patent CN, no. 212679892U, 2021.
17. Machado J. S., Cordeiro E., Knapic S. Fire Protection of Utility Pine Wood Poles // Fire. 2025. Vol. 8. No. 1. DOI: 10.3390/fire8010003
18. ГОСТ 19170–2001. Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. Технические условия. Минск, 2002. 10 с.
19. ТУ 6-48-64–91. Ткани кремнеземные. Технические условия.
20. Оценка эффективности смесей антипиренов для огнезащиты древесины / В. Ю. Колесова [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 52–66.
21. ГОСТ 12.1.044–2018. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М., 2018. 183 с.
22. ГОСТ 13078–2021. Стекло натриевое жидкое. Технические условия. М., 2021. 19 с.

REFERENCES

1. Bernhardt B. Wood Poles Still Best Alternative for Most Uses // Natural Gas & Electricity. 2017. No. 34. P. 9–14. DOI: 10.1002/gas.22002
2. Shergunova N. A. Impregnated wooden poles as an ideal material for overhead power lines // Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. 2007. No. 2 (20). P. 163–167.

3. Nikanorova A. I. Preservation of poles for overhead communication lines. Moscow, 1951. 34 p.
4. GOST 20022.6–93. Wood protection. Impregnation methods. Minsk, 1994. 20 p.
5. Bingel N. G. Cost saving benefits of wood structure maintenance // Proceedings of ESMO'95 — 1995 IEEE 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance. New York, 1995. P. 11–16. DOI: 10.1109/TDCLLM.1995.485030
6. Polizois D., Kell Jon A. Repair and rehabilitation of wood utility poles with fibre-reinforced polymers // Canadian Journal of Civil Engineering. 2007. No. 34 (1). P. 116–119. DOI: 10.1139/l06-105
7. Modern hard-to-wash preparations for the biological protection of wooden power lines poles and communication / N. O. Melnikov et al. // Chemical Industry Developments. 2019. No. 1. P. 32–37.
8. Belenkov D. A., Levinskiy Yu. B., Stenina E. I. Studying of properties of the wood impregnated by antiseptic tank ultan // Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI century : proceedings of the International Eurasian Symposium / edited by I. T. Glebov. Yekaterinburg, 2006. P. 49–52.
9. Vinokurova V. V., Monakhov A. A., Melnikov N. O. Study of the fire-retardant capacity of heavy-duty preparations for the impregnation of wood for power lines and communication poles // Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2021. Vol. 35. No. 10 (245). P. 15–17.
10. GOST 20022.0–2016. Wood protection. Security parameters. Moscow, 2017. 52 p.
11. GOST 28815–2018. Water solutions of protective agents for wood. Specifications. Moscow, 2018. 16 p.
12. GOST 16363–98. Protective agents for wood. Methods for determining fire-retardant properties. Minsk, 1998. 6 p.
13. GOST R 53292–2009. Fire retardant compositions and substances for wood and wood-based materials. General requirements. Test methods. Moscow, 2019. 15 p.
14. GOST 20022.2–2018. Wood protection. Classification. Moscow, 2018. 12 p.
15. GOST R 70237–2022. United power system and isolated power systems. Electric installation. Rules for design. Overhead electric power lines at voltage up to 1 kV. General requirements. Moscow, 2022. 44 p.
16. Hu Zhengping. Electric pole fireproof sleeve. Patent CN, no. 212679892U, 2021.
17. Machado J. S., Cordeiro E., Knapic S. Fire Protection of Utility Pine Wood Poles // Fire. 2025. Vol. 8. No. 1. DOI: 10.3390/fire8010003
18. GOST 19170–2001. Glass fiber. Structural fabric. Specifications. Minsk, 2002. 10 p.
19. TU 6-48-64–91. Silica fabrics. Specifications.
20. Evaluation of the effectiveness of flame retardant mixtures for wood fire protection / V. Yu. Kolesova et al. // Technosphere safety. 2025. No. 1 (46). P. 52–66.
21. GOST 12.1.044–2018. Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination. Moscow, 2018. 183 p.
22. GOST 13078–2021. Sodium silicate solute. Specifications. Moscow, 2021. 19 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Монахов Антон Андреевич, ассистент кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); РИНЦ ID: 1038060; e-mail: antonmonahov913@yandex.ru

Мельников Никита Олегович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); заведующий лабораторией исследований огнестойкости строительных конструкций научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций им. В. А. Кучеренко (109428, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, к. 1); РИНЦ ID: 694341; Scopus AuthorID: 57189368987; e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Акинин Николай Иванович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); РИНЦ ID: 51759; Scopus AuthorID: 6602574271; e-mail: akinin.n.i@muctr.ru

Максименко Сергей Анатольевич, канд. хим. наук, генеральный директор АО «Сенежская НПЛ защиты древесины» (141503, Российская Федерация, Московская обл., г. Москва, д. Чепчиха, к. 6); Scopus AuthorID: 7004065649; e-mail: max123-62@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton A. Monakhov, Assistant Professor at the Department of Technosphere Safety, University Mendeleev (9 Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation); ID RSCI: 1038060; e-mail: antonmonahov913@yandex.ru

Nikita O. Melnikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, University Mendeleev (9 Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation); Laboratory Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko (6 2nd Institutskaya St., Moscow, 109428, Russian Federation); ID RSCI: 694341; Scopus AuthorID: 57189368987; e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Nicolai I. Akinin, Doc. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Technosphere Safety, University Mendeleev (9 Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation); ID RSCI: 51759; Scopus AuthorID: 6602574271; e-mail: akinin.n.i@muctr.ru

Sergey A. Maksimenko, Cand. Sci. (Chem.), General Director, Senezh Scientific and Production Laboratory of Wood Protection JSC (6, Chepchikha, Moscow, Moscow region, 141503, Russian Federation); Scopus AuthorID: 7004065649; e-mail: max123-62@mail.ru

УДК 614.841.45

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СМЕСЯХ АНТИПИРЕНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДРЕВЕСИНЫ

Мельников Никита Олегович^{1,2}, Шугаева Арина Романовна¹, Монахов Антон Андреевич¹, Черепанов Евгений Александрович³

¹ РХТУ им. Д. И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

² Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В. А. Кучеренко, г. Москва, Российская Федерация

³ Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема снижения пожарной опасности древесины посредством возможного повышения огнезащитной эффективности защитных средств для древесины при комбинировании антипиренов, проявляющих синергизм или взаимное усиление свойств. Представлен обзор по известным смесям антипиренов, нашедшим широкое применение на практике. Методами термического анализа исследовано влияние моноаммонийфосфата, аммония тетраборнокислого 4-водного и их смеси в массовом соотношении 3:1 на термоокислительное разложение пропитанной древесины в зависимости от содержания химических веществ, определены кинетические параметры и огнезащитная эффективность по ГОСТ 30028.3–2022. Исследовано совместное действие антипиренов, и получены зависимости энергии активации основной стадии термоокислительного разложения пропитанной древесины от общего поглощения. Установлено, что для смеси антипиренов энергия активации процесса имеет наибольшие значения и возрастает с увеличением поглощения, а потеря массы уменьшается, температура максимума потери массы при этом сдвигается примерно на 70 °С в область более низких температур, что способствует более раннему образованию защитного коксового слоя на поверхности древесины. Огнезащитная эффективность в смеси взаимно усиливается и достигает I класса, по сравнению с индивидуальными антипиренами, в нее входящими. Экспериментально подтвержден синергетический эффект в смеси исследуемых антипиренов.

Ключевые слова: антипирен, огнезащитная эффективность, огнезащита древесины, термический анализ, кинетические параметры термического разложения, синергизм, синергетические эффекты

Для цитирования: Синергетические эффекты в смесях антипиренов для защиты древесины / Н. О. Мельников [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 77–87.

SYNERGISTIC EFFECTS IN FLAME RETARDANT MIXTURES FOR WOOD PROTECTION

Nikita O. Melnikov^{1,2}, Arina R. Shugaeva¹, Anton A. Monakhov¹, Evgeny A. Cherepanov³

¹ Mendeleeev University, Moscow, Russian Federation

² Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko, Moscow, Russian Federation

³ UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The article considers the problem of reducing the fire hazard of wood by means of a possible increase in the fire-retardant effectiveness of protective agents for wood when combining flame retardants that exhibit synergy or mutual enhancement of properties. An overview of well-known flame-retardant mixtures that have found wide application in practice is presented. The effect of monoammonium phosphate, ammonium tetraborate 4-aqueous and their mixtures in a 3:1 mass ratio on the thermal and oxidative decomposition of impregnated wood, depending on the content of chemicals, was studied by thermal analysis methods, kinetic parameters and fire-retardant effectiveness were determined according to GOST 30028.3-2022. The combined effect of flame retardants was investigated and the dependences of the activation energy of the main stage of thermal and oxidative decomposition of impregnated wood on the total absorption were obtained. It was found that for a mixture of flame retardants, the activation energy of the process has the highest values and increases with increasing absorption, and the mass loss decreases, while the temperature of the maximum mass loss shifts by about 70 °C to lower temperatures, which contributes to the earlier formation of a protective coke layer on the wood surface. The flame-retardant effectiveness in the mixture is mutually enhanced and reaches Class I, compared with the individual flame retardants included in it. The synergistic effect in the mixture of flame retardants studied has been experimentally confirmed.

Keywords: flame retardant, fire-retardant efficiency, fire protection of wood, thermal analysis, kinetic parameters synergism, synergistic effects

For citation: Synergistic effects in flame retardant mixtures for wood protection / N. O. Melnikov et al. // Technosphere safety. 2026. No. 2 (51). P. 77–87.

Введение

На протяжении веков древесина остается одним из ключевых строительных материалов, поэтому до настоящего времени актуальной задачей является обеспечение защиты данного строительного материала при пожаре. Применение для этих целей пропиточных составов на основе различных антипиренов в практике нашло наибольшее распространение. Несмотря на огромное количество предлагаемых к применению готовых рецептов, изыскание новых высокоэффективных средств огнезащиты активно продолжается.

Поэтому изучению механизмов огнезащитного действия антипиренов и их влиянию на термическое разложение пропитанной древесины в последнее время уделяется большое внимание. Многочисленные работы [1–5], посвященные анализу наиболее известных и применяемых на практике веществ в качестве антипиренов, и попытки их систематизировать не выявили еще вполне апробированного принципа выбора антипиренов при разработке эффективных защитных средств. Высказываемые различными авторами предположения о влиянии индивидуальных антипиренов

на термическое разложение и огнезащитную эффективность носят иногда весьма противоречивый характер. Особенно это касается сочетанного (синергетического или антагонистического) действия, проявляемого в смесях антипиренов.

Синергетический эффект, или взаимное усиление свойств, достигается при комбинировании различных типов огнезащитных веществ, что позволяет существенно повысить их эффективность при защите древесины. Проявление синергизма и подтверждение этих явлений весьма актуально, так как дает возможность совершенствования, модернизации и удешевления рецептур средств огнезащиты. При этом надо учитывать, что при построении рецептур защитных средств вводимые в них вещества с целью придания антисептических свойств могут снижать огнезащитную эффективность и стимулировать процесс горения.

Применение некоторых антипиренов в комбинации друг с другом известно и применяется на практике достаточно давно. Так, например, известно, что борная кислота сама по себе не является антипиреном по отношению к древесине, но в смеси с бурой имеют огнезащитную эффективность. Огнебиозащитный препарат ББ-11 на их основе стандартизирован [6] и нашел широкое применение на практике. Проявляемые в смеси буры и борной кислоты синергетические эффекты, а также влияние их на термическое разложение древесины подробно изучены в работах [7–9].

Одним из наиболее распространенных пропиточных составов для поверхностной обработки древесины согласно [10] является состав МС, где в качестве антипиренов используется смесь аммония фосфорнокислого и аммония сернокислого в массовом

соотношении 4:1. При этом допускается использование диаммонийфосфата технического, диаммонийфосфата кормового или аммофоса.

Синергизм проявляют смеси диаммонийфосфата и карбамида. В работе [11] установлено, что огнезащитная эффективность при определенной комбинации антипиренов может взаимно усиливаться. Смесь диаммонийфосфата и карбамида в соотношении 2:1 обладает наибольшей огнезащитной эффективностью, чем эти же смеси в соотношении 1:1 и 1:2 и индивидуальные антипирены. В работах [8, 9, 11] также подробно изучалось термическое разложение древесины, пропитанной этой смесью антипиренов.

В работе [12] показано, что смесь хлорида аммония и буры показывает синергию, что обеспечивало лучшие огнезащитные свойства по сравнению с использованием каждого из них по отдельности, а именно снижали скорость распространения пламени и время пламенного горения, а время воспламенения и выход несгораемого остатка увеличивались.

Настоящая работа посвящена исследованию синергетических эффектов в смеси азотфосфорсодержащих и азотборсодержащих антипиренов, проведению термического анализа пропитанной древесины и определению огнезащитной эффективности на примере моноаммонийфосфата и аммония тетроборнокислого 4-водного.

Материалы и методы

Объектами исследования являются следующие антипирены и их смеси:

- моноаммонийфосфат $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ТУ 20.15.73-702-00209438-21);

- аммоний тетраборнокислый 4-водный $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (ТУ 6-09-2654-78);
- моноаммонийфосфат и аммоний тетраборнокислый 4-водный в соотношении 3:1.

Исследования проводились на образцах воздушно-сухой древесины заболони сосны размером $15 \times 15 \times 6$ мм (последний размер соответствует направлению волокон) с влажностью 6–8 % и средней плотностью 450 кг/м^3 . Растворы антипиренов заданной концентрации готовили растворением в воде соответствующего количества вещества. Пропитку

образцов проводили согласно ГОСТ 30028.3–2022 [13] по методу «вакуум — атмосферное давление», обеспечивающему равномерное распределение веществ по всему объему образца, с начальным вакуумом не менее 0,09 МПа, продолжительностью 15 ± 1 мин и продолжительностью выдержки в растворе антипиренов при атмосферном давлении 30 ± 1 мин. После пропитки образцы сушили до постоянной массы.

Общее поглощение антипиренов в пропитанной древесине Q в кг/м^3 определяли согласно (1).

$$Q_1 = \frac{(m_2 - m_1) \cdot c \cdot 10}{V_1}, \quad (1)$$

где:

m_2 — масса образца древесины после пропитки, г;

m_1 — масса образца древесины до пропитки, г;

c — заданная концентрация защитного средства, %;

V_1 — объем образца древесины, см^3 .

Равномерность распределения антипиренов в объеме древесины подтверждали методом сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа JEOL 1610LV (JEOL, Япония) с энергодисперсионным спектрометром для электронно-зондового микроанализа

SSD X-Max Inca Energy (Oxford Instruments, Великобритания) (исследования проводились в ЦКП РХТУ им. Д. И. Менделеева). На рис. 1 представлено распределение фосфора в поперечном срезе образца после пропитки моноаммонийфосфатом и сушки древесины.



Рис. 1. Распределение фосфора (светлые точки) в поперечном срезе образца древесины при картировании на сканирующем электронном микроскопе

Fig. 1. Phosphorus distribution (light dots) in a cross-section of a wood sample when mapped on a scanning electron microscope

Для исследования термического разложения образцов древесины использовался дифференциально-термический анализ (ДТА), проводимый на дериватографе Q-1500 d системы F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey.

Условия проведения эксперимента: нагрев — 1 000 °С; скорость нагрева — 10 °С/мин; атмосфера — воздух; навеска (измельченная древесина) — 100 мг; тигли — корунд; образец сравнения — Al_2O_3 .

Кинетические параметры основной стадии термического разложения рассчитывали по ТГ- и ДТГ-кривым по методике, описанной в [11].

Огнезащитную эффективность определяли в соответствии с ГОСТ 30028.3–2009 [13].

Результаты и их обсуждение

Методами ДТА получены зависимости потери массы (ТГ-кривые) и скорости потери массы (ДТГ-кривые) от температуры как исходной непропитанной древесины, так и огнезащитной исследуемыми антипиренами и их смесью с различными общими поглощениями.

На рис. 2–4 представлены совмещенные ТГ- и ДТГ-кривые исходной древесины и образцов, пропитанных моноаммонийфосфатом, аммонием тетраборнокислым 4-водным и их смесью в массовом соотношении 3:1.

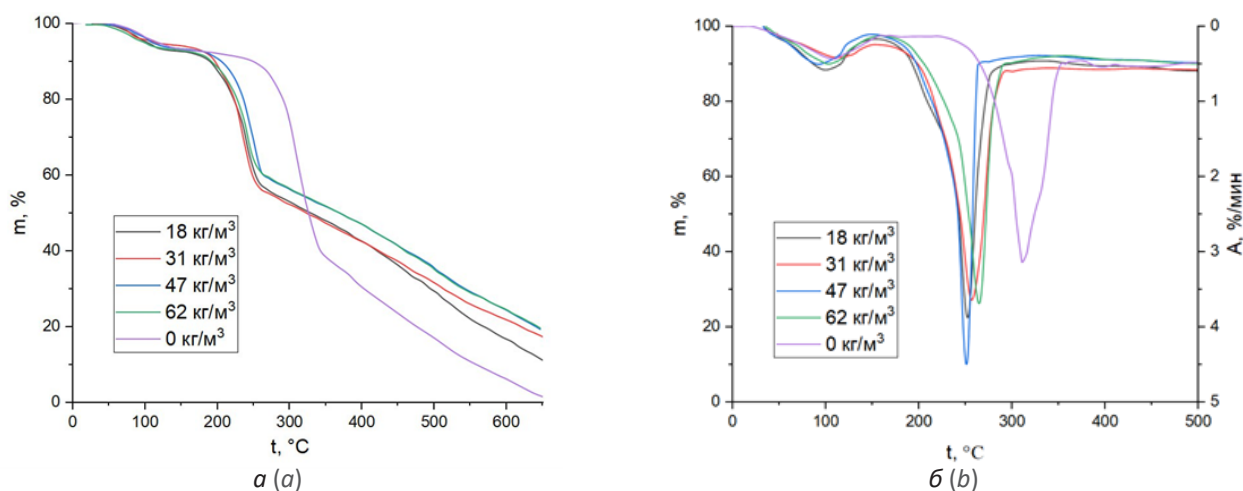


Рис. 2. Кривые ТГ (а) и ДТГ (б) древесины, пропитанной моноаммонийфосфатом
Fig. 2. Curves TG (a) and DTG (b) of wood impregnated with monoammonium phosphates

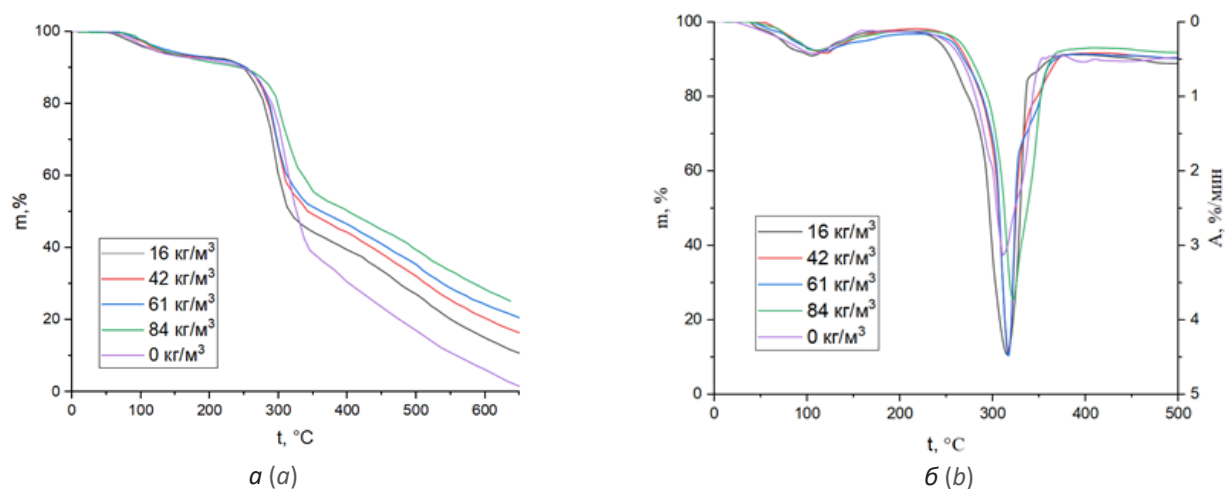


Рис. 3. Кривые ТГ (а) и ДТГ (б) древесины, пропитанной аммонием тетраборнокислым 4-водным
Fig. 3. Curves TG (a) and DTG (b) of wood impregnated with ammonium tetraboric acid 4-aqueous

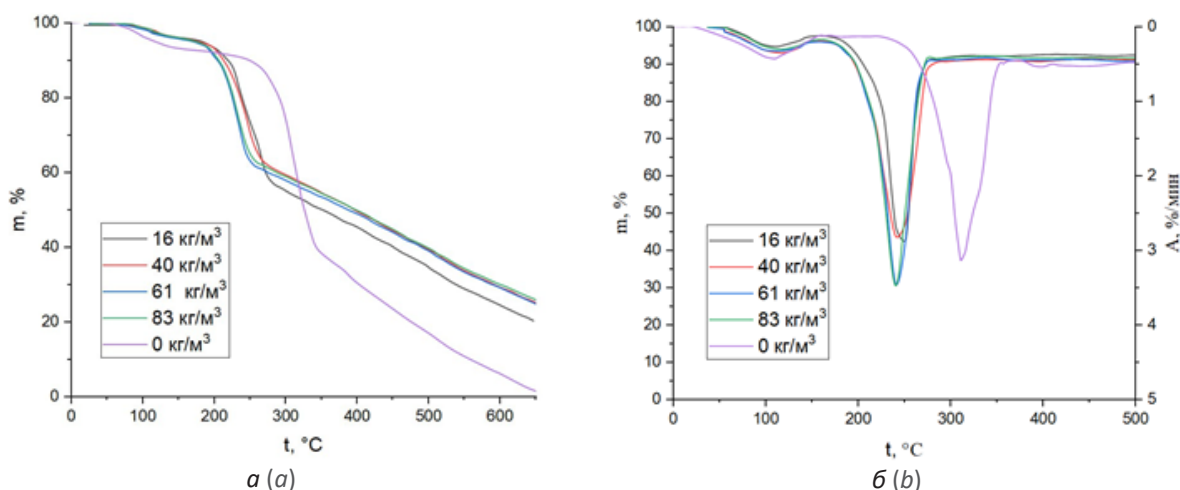


Рис. 4. Кривые ТГ (а) и ДТГ (б) древесины, пропитанной смесью моноаммонийфосфата и аммония тетраборнокислотного 4-водного в соотношении 3:1

Fig. 4. Curves TG (a) and DTG (b) of wood impregnated with a mixture of monoammonium phosphate and ammonium tetraboric acid 4-water in a ratio of 3:1

Разложение непропитанной древесины (на графиках обозначено «0 кг/м³») характеризуется тремя основными стадиями. На первом этапе при температуре в среднем 100 °С происходит потеря приблизительно 8 % массы, связанная с выделением содержащейся влаги в образце. Основная стадия интенсивного термоокислительного разложения происходит в интервале 180–360 °С и сопровождается максимумом скорости потери массы (3,2 %/мин) при температуре около 315 °С. На третьей стадии происходит сгорание углистого остатка с полной потерей массы до 700 °С.

Для древесины, пропитанной моноаммонийфосфатом, основная стадия термоокислительного разложения смещается в область более низких температур, а максимум скорости потери массы наблюдается при 250–260 °С во всем исследованном диапазоне общих поглощений. Начало интенсивного разложения приходится на 150 °С. Третья стадия разложения углистого остатка становится более длительной, и полная потеря массы уже не наблюдается при 700 °С. Выход несгораемого остатка увеличивается с общим поглощением антипирена.

Для образцов, пропитанных аммонием тетраборнокислым 4-водным, смещение пика основной стадии разложения не наблюдается, и он совпадает с непропитанной древесиной при температуре в среднем 315 °С. При этом наблюдается увеличение выхода углистого остатка, который пропорционален общему поглощению антипирена.

Для образцов, пропитанных смесью антипиренов, наблюдается еще больший сдвиг потери массы в область низких температур по сравнению с индивидуальным моноаммонийфосфатом. Максимум скорости потери массы наблюдается уже при 240 °С в зависимости от общего поглощения смеси антипиренов. Выход углистого остатка увеличивается по сравнению с образцами, пропитанными индивидуальными веществами. Данный факт свидетельствует о наличии синергетического эффекта в смеси, который в большей степени катализирует термическое разложение древесины и тем самым раньше начинается процесс обугливания и образования защитного коксового слоя на поверхности, а количество его увеличивается. Логично предположить, что если бы отсутствовало взаимное усиление свойств, то пик максимума

скорости потери массы в смеси антипиренов (рис. 4б) располагался бы правее температуры 240 °С и по мере уменьшения содержания моноаммонийфосфата приближался к пику при 315 °С непропитанной древесины и аммония тетраборнокислого 4-водного.

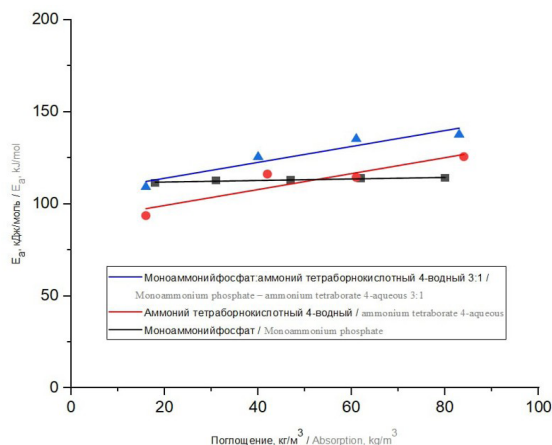
По экспериментальным данным, полученным с помощью ДТА, был проведен расчет кинетических параметров основной стадии термического разложения. В таблице представлены сводные экспериментальные и расчетные данные исходной и пропитанной

древесины исследуемыми антипиренами в зависимости от поглощения: температура максимума ДТГ-кривой, потеря массы образца в интервале температур основной стадии терморазложения, максимальная скорость потери массы, коксовый остаток при 500 °С и рассчитанные энергия активации и предэкспоненциальный множитель в интервале температур основной стадии терморазложения. На рис. 5 представлены зависимости энергии активации E_a процесса термического разложения от поглощения антипиренов.

Таблица
Основные параметры процесса термического разложения исходной и пропитанной антипиренами древесины

Table
The main parameters of the thermal decomposition process of the original and flame retardant-impregnated wood

Поглощение, кг/м ³ Absorption, kg/m ³	Температура максимума потери массы, $T_{\max}$, °C Maximum mass loss temperature, $T_{\max}$, °C	Макси- мальная скорость потери массы $A_{\max}$, %/мин Maximum mass loss $A_{\max}$, %/min	Потеря массы, Δm , % Weight loss, Δm , %	Остаток, %, при 500 °C Residue %, at 500 °C	Температур- ный интервал, °C Temperature range, °C	Энергия активации, E_a , кДж/ моль Activation energy, E_a , kJ/mol	Предэкспо- ненциальный множитель, k The pre- exponential multiplier, k
Непропитанная древесина / Non-impregnated wood							
0	315	3,2	54,4	17,6	180–360	95,7	$8,3 \cdot 10^{10}$
Моноаммонийфосфат / Monoammonium phosphate							
18	250	3,8	41,2	30,2	156–325	111,4	$2,72 \cdot 10^{13}$
31	255	3,6	40,0	32,6	155–290	112,8	$3,30 \cdot 10^{13}$
47	252	4,5	34,0	38,6	154–300	112,9	$3,35 \cdot 10^{13}$
62	260	3,7	32,8	38,9	150–292	113,9	$5,77 \cdot 10^{13}$
Аммоний тетраборнокислый 4-водный / Ammonium tetraborate 4-aqueous							
16	320	4,5	49,6	28,0	202–374	93,7	$2,92 \cdot 10^{10}$
42	320	4,5	44,0	32,2	210–366	116,2	$3,51 \cdot 10^{12}$
61	320	4,5	40,9	37,5	202–366	114,4	$3,00 \cdot 10^{12}$
84	325	3,7	40,0	41,2	211–374	125,7	$1,84 \cdot 10^{13}$
Моноаммонийфосфат — аммоний тетраборнокислый 4-водный 3:1 / Monoammonium phosphate — ammonium tetraborate 4-aqueous 3:1							
16	245	2,9	40,0	35,0	158–308	109,2	$1,22 \cdot 10^{13}$
40	240	2,8	36,0	38,9	158–274	125,5	$1,52 \cdot 10^{15}$
61	240	3,5	35,8	39,8	155–282	135,3	$1,58 \cdot 10^{16}$
83	240	3,5	33,6	40,0	158–287	137,7	$3,41 \cdot 10^{16}$

Рис. 5. Зависимость энергии активации E_a от поглощения (кг/м³) антипиреновFig. 5. Dependence of the E_a activation energy on the absorption (kg/m³) of flame retardants

Анализируя полученные экспериментальные и расчетные данные, установлено, что для всех антипиренов выход коксового остатка увеличивается, а потеря массы в пике интенсивного терморазложения снижается с увеличением общего поглощения. Энергия активации основной стадии термического разложения древесины с моноаммонийфосфатом практически не меняется с увеличением содержания вещества и равна в среднем 113 кДж/моль, для аммония тетраборнокислого 4-водного она растет по мере увеличения общего поглощения и достигает 125,7 кДж/моль при 84 кг/м³, а для смеси антипиренов 3:1 (синяя линия на рис. 5) при равных поглощениях с индивидуальными веществами энергия активации больше в среднем на 15 кДж/моль, что

говорит о большей термостойкости древесины, пропитанной смесью исследуемых веществ, и свидетельствует о взаимном усилении защитных свойств.

Для исследуемых антипиренов определена огнезащитная эффективность в соответствии с требованиями ГОСТ 30028.3–2022 [13]. На рис. 6 представлен график зависимости потери массы образцов от общего поглощения антипиренов. Установлено, что общее поглощение, обеспечивающее потерю массы 25 %, для моноаммонийфосфата составляет 33 кг/м³, что соответствует II классу огнезащитной эффективности, аммония тетраборнокислого 4-водного 62 кг/м³ — III класс, а смесь данных антипиренов при 23 кг/м³ обеспечивает I класс.

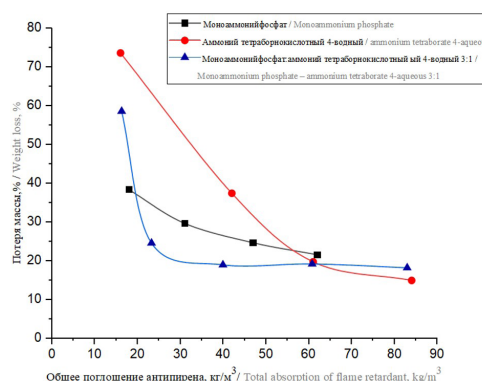


Рис. 6. График зависимости потери массы образца (%) от общего поглощения (кг/м³) антипиренов

Fig. 6. Graph of the dependence of the mass loss of the sample (%) on the total absorption (kg/m³) of flame retardants

По графику на рис. 6 (синяя кривая) также наблюдается бóльшая огнезащитная эффективность смеси по сравнению с индивидуальными веществами, в нее входящими, в интервале поглощений от 20 до 60 кг/м³, то есть наблюдается взаимное усиление свойств. Если бы синергетические эффекты в смеси отсутствовали, то кривая ее потери массы от поглощения располагалась бы между линиями индивидуальных антипиренов и с уменьшением содержания более эффективного моноаммонийфосфата приближалась бы к кривой аммония тетраборнокислого 4-водного.

Заключение

В результате проведенного исследования методами ДТА определены кинетические параметры основной стадии интенсивного термоокислительного разложения древеси-

ны, пропитанной моноаммонийфосфатом, аммонием тетраборнокислым 4-водным и их смесью в массовом соотношении 3:1 с различными общими поглощениями. Установлено, что для смеси антипиренов энергия активации процесса разложения имеет наибольшие значения и возрастает с увеличением поглощения, а потеря массы уменьшается. Температура максимума потери массы при этом сдвигается примерно на 70 °С в область более низких температур, что способствует более раннему образованию защитного коксового слоя на поверхности древесины. Установлено, что огнезащитная эффективность в смеси взаимно усиливается и достигает I класса, по сравнению с индивидуальными антипиренами, в нее входящими. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают синергетический эффект в смеси исследуемых антипиренов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Characterisation of the fire behaviour of wood: From pyrolysis to fire retardant mechanisms / R. A. Mensah et al. // J Therm Anal Calorim. 2023. Vol. 148. P. 1407–1422. DOI: 10.1007/s10973-022-11442-0
2. Берлин А. А., Сивенков А. Б., Хасанова Г. Ш. Химические основы снижения пожарной опасности материалов на основе целлюлозы // Горение и плазмохимия. 2021. № 19 (2). С. 65–77.
3. Lowden L., Hull T. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // Fire Science Reviews. 2013. Vol. 2. Art. 4. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
4. Исследование параметров воспламеняемости и процесса термоокислительного разложения древесины в присутствии эффективных средств огнебиозащиты / А. А. Кобелев [и др.] // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 5. С. 474–481.
5. Комарова М. А. Огнезащитная эффективность покрытий металлических строительных конструкций при ускоренном климатическом старении / М. А. Комарова [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 3–22.
6. ГОСТ 28815–2018. Растворы водные защитных средств для древесины. Технические условия. М., 2018. 23 с.

7. Мельников Н. О., Акинин Н. И. Влияние антипиренов на термическое разложение древесины // Химическая промышленность сегодня. 2022. № 5. С. 52–57. DOI: 10.53884/27132854_2022_5_52.
8. Исследование термического разложения огнезащитной древесины / Ю. В. Кривцов [и др.] // Пожарная безопасность. 2010. № 2. С. 85–88.
9. Вопросы снижения пожарной опасности древесины / Н. И. Акинин, Н. О. Мельников, С. А. Максименко // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 3 (25). С. 28–31.
10. Способы и средства огнезащиты древесины : руководство / ВНИИПО МЧС России. 4-е изд., доп. и перераб. М., 2011. 80 с.
11. Оценка эффективности смесей антипиренов для огнезащиты древесины / В. Ю. Колесова [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 52–66.
12. Synergistic Study on the Effect of Flame Retardants on Timber / C. C. Nwajiobi et al. // American Journal of Engineering Research (AJER). 2015. Vol. 4. Iss. 12. P. 41–44.
13. ГОСТ 30028.3–2022. Средства защитные для древесины. Экспресс-метод определения огнезащитной эффективности. М., 2022. 6 с.

REFERENCES

1. Characterisation of the fire behaviour of wood: From pyrolysis to fire retardant mechanisms / R. A. Mensah et al. // J Therm Anal Calorim. 2023. Vol. 148. P. 1407–1422. DOI: 10.1007/s10973-022-11442-0
2. Berlin A. A., Sivenkov A. B., Khasanova G. Sh. Chemical bases for reducing the fire hazard of cellulose-based materials // Gorenje i plasmochimistry. 2021. No. 19 (2). P. 65–77.
3. Lowden L., Hull T. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // Fire Science Reviews. 2013. Vol. 2. Art. 4. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
4. Study of the parameters of flammability and the process of thermal and oxidative decomposition of wood in the presence of effective fire protection agents / A. A. Kobelev et al. // Nanotechnology in construction. 2023. Vol. 15. No. 5. P. 474–481.
5. Fire-resistant effectiveness of coatings of metal building structures under accelerated climatic aging / M. A. Komarova et al. // Technosphere safety. 2024. No. 4 (45). P. 3–22.
6. GOST 28815–2018. Water solutions of protective agents for wood. Technical specifications. Moscow, 2018. 23 p.
7. Melnikov N. O., Akinin N. I. The effect of flame retardants on the thermal decomposition of wood // Chemical industry today. 2022. No. 5. P. 52–57. DOI: 10.53884/27132854_2022_5_52
8. Investigation of thermal decomposition of fire-proof wood / Y. V. Krivtsov et al. // Fire safety. 2010. No. 2. P. 85–88.
9. Issues of reducing the fire hazard of wood / N. I. Akinin, N. O. Melnikov, S. A. Maksimenko // Vector of Science Tolyatti State University. 2013. No. 3 (25). P. 28–31.
10. Methods and means of fire protection of wood: management / VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 4th ed., additional and revised. Moscow, 2011. 80 p.
11. Evaluation of the effectiveness of flame retardants mixtures for fire protection of wood / V. Yu. Kolesova et al. // Technosphere safety. 2025. No. 1 (46). P. 52–66.

12. Synergistic Study on the Effect of Flame Retardants on Timber / С. С. Nwajiobi et al. // American Journal of Engineering Research (AJER). 2015. Vol. 4. Iss. 12. P. 41–44.

13. GOST 30028.3–2022. Protective equipment for wood. Express method for determining flame-retardant effectiveness. Moscow, 2018. 23 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мельников Никита Олегович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); заведующий лабораторией исследований огнестойкости строительных конструкций научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций им. В. А. Кучеренко (109428, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, к. 1); РИНЦ ID: 694341; Scopus AuthorID: 57189368987; e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Шугаева Арина Романовна, магистрант кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); e-mail: arishechka01@bk.ru

Монахов Антон Андреевич, ассистент кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); РИНЦ ID: 1038060; e-mail: antonmonahov913@yandex.ru

Черепанов Евгений Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры надзорной деятельности и права Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 849208; e-mail: cherepanov_evgen@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita O. Melnikova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, University Mendeleev (9 Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation); Laboratory Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko (6 2nd Institutskaya St., Moscow, 109428, Russian Federation); ID RSCI: 694341; Scopus AuthorID: 57189368987; e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Arina R. Shugaeva, master's student of the Department of Technosphere Safety, University Mendeleev (9 Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation); e-mail: arishechka01@bk.ru

Anton A. Monakhov, Assistant Professor at the Department of Technosphere Safety, University Mendeleev (9 Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation); ID RSCI: 1038060; e-mail: antonmonahov913@yandex.ru

Evgeny A. Cherepanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Supervision and Law, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ykaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 849208; e-mail: cherepanov_evgen@mail.ru

УДК 658.386.012.2:621.643

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ ПО ПОЖАРНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Хафизов Ильдар Фанилевич¹, Озден Инна Владимировна¹, Кандалов Алексей Сергеевич², Шевченко Дмитрий Иванович³, Мелюсева Ирина Анатольевна³

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

² Газпром ОНУТЦ, г. Калининград, Российская Федерация

³ НПП «Автоматизация технологических процессов», г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. В статье предлагается комплексная методика повышения интенсивности и эффективности подготовки специалистов трубопроводного транспорта. В основе методики лежит объективная экономическая оценка использования учебного времени и обучающих технических устройств, среди которых тренажеры. В основе исследования лежит разработанная интервальная модель, позволяющая определять величину удельного предотвращенного ущерба и удельную стоимость обучения. Данная модель дает возможность точно определять оптимальную продолжительность курсов, согласовывая ее с заданными ресурсными ограничениями.

Для формирования итогового учебного плана предлагается инновационный алгоритм «селектора максимума». Этот алгоритм поэтапно отбирает учебные мероприятия на основе критерия максимизации соотношения предотвращенного риска к затратам на обучение. Практическая апробация методики продемонстрирована на примере распределения восьмидесяти учебных часов. Расчеты наглядно показывают, как из плана исключаются экономически неэффективные виды занятий, а освободившийся ресурс перераспределяется в пользу тренингов с наибольшим удельным эффектом. На основе методики даны практические рекомендации по аудиту существующих тренажеров и обоснованию инвестиций в их модернизацию или разработку новых средств обучения. Результаты исследования представляют практическую ценность для компаний трубопроводного транспорта, заинтересованных в оптимизации бюджетов на обучение и максимизации экономического эффекта от подготовки своего оперативного персонала.

Ключевые слова: методика обучения, тренажеры, трубопроводный транспорт, интенсивность подготовки, оценка эффективности, оптимизация учебного времени, предотвращенный ущерб

Для цитирования: Методика повышения эффективности обучения по пожарной и промышленной безопасности для специалистов трубопроводного транспорта / И. Ф. Хафизов [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 88–96.

METHODOLOGY FOR INCREASING THE EFFECTIVENESS OF FIRE AND INDUSTRIAL SAFETY TRAINING FOR PIPELINE TRANSPORT SPECIALISTS

Ildar F. Khafizov¹, Inna V. Ozden¹, Aleksei S. Kandalov², Dmitrii I. Shevchenko³, Irina. A. Melyuseva³

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

² GAZPROM's Training Simulator Computer Center, Kaliningrad, Russian Federation

³ NPP "Automation of Technological Processes", Ufa, Russian Federation

Abstract. This article proposes a comprehensive methodology for increasing the intensity and effectiveness of pipeline specialist training. The methodology is based on an objective economic assessment of the use of training time and technical training aids, such as simulators. The core of the research is a developed interval model that allows for evaluating the specific prevented damage and the specific cost of training. This model enables the precise determination of the optimal course duration, aligning it with given resource constraints.

An innovative "maximum selector" algorithm is proposed for forming the final curriculum. This algorithm sequentially selects training activities by maximizing the ratio of prevented risk to training costs. The practical application of the methodology is demonstrated using the example of allocating eighty training hours. The calculations clearly demonstrate how cost-ineffective activities are excluded from the plan, the freed-up resources are redistributed in favor of trainings with the greatest specific impact.

The methodology provides practical recommendations for auditing existing simulators and justifying investments in their modernization or the development of new training tools. The study's results are of practical value to pipeline transportation companies interested in optimizing training budgets and maximizing the economic impact of training their operational personnel.

Keywords: training methodology, simulators, pipeline transport, training intensity, efficiency assessment, optimization of instructional time, prevented damage

For citation: Methodology for Increasing the Effectiveness of Fire and Industrial Safety Training for Pipeline Transport Specialists / I. F. Khafizov et al. // Technosphere safety. 2026. No. 2 (51). P. 88–96.

Введение

Управление объектами ТЭК в условиях повышенного износа оборудования увеличивает нагрузку на операторов и диспетчеров [1–4]. Подготовка кадров затруднена ограниченностью ресурсов: малой плотностью населения на больших территориях, дефицитом финансовых и временных ресурсов.

Единственным решением является интенсификация процесса обучения с постоянной верификацией уровня подготовки и объективной оценкой эффективности обучающих методик [5, 6]. Тем не менее в настоящий момент имеется определенный дефицит объективных методик построения наиболее эффективных курсов обучения и объективной оценки самого процесса обучения [7, 8].

Результаты и их обсуждение

В настоящий момент при обучении специалистов трубопроводного транспорта используются эффективные технические средства обучения, в частности, тренажеры. При использовании таких тренажеров можно не только проводить эффективные тренинги, но и объективно оценивать уровень подготовки и самого процесса обучения по количеству ошибок, совершаемых обучаемым в процессе выполнения тестовых заданий. В основе предлагаемого подхода лежит применение высокоэффективных тренажеров. Введем формальную модель эффективности трена-

жерной подготовки. Систематическое исключение инцидентов Y_i в ходе контрольных испытаний после прохождения обучающего модуля (тренинга) X_i значительно снижает вероятность аналогичных событий на реальных объектах в период между подготовками. Основная цель обучения — предупредить возникновение инцидентов определенного типа путем системной подготовки операторов, которым предстоит работать на объектах трубопроводного транспорта. Обучение проводится для группы из M операторов, распределяемых по N объектам. Тогда величина предотвращенного ущерба R_i для инцидента типа Y_i определяется как:

$$R_i = D_i \cdot N, \quad (1)$$

где D_i — усредненный ущерб от одного инцидента Y_i .

Тогда полную стоимость часа обучения S_i можно вычислить как:

$$S_i = C_1 + C_2 + C_3, \quad (2)$$

где:

C_1 — стоимость часовой ставки обучаемого оператора;

C_2 — усредненная стоимость тренинга (без учета оборудования);

C_3 — амортизационная стоимость использования учебного оборудования за час.

Для нормированной оценки введем удельные величины предотвращенного ущерба и стоимости тренинга. Соотношение $R_{уд_i}$ и $S_{уд_i}$ позволяет количественно оценить рентабельность тренинга X_i (рис. 1).

Эффективность образовательного процесса в целом может быть оценена путем вычитания удельных затрат на него из удельного объема предотвращенного вреда. Следует учитывать, что группа обучающихся неоднородна, что отражается на результативности учебного процесса. Длительность тренинга является недетерминированной величиной, что обуславливает применение интервального подхода к оценке параметров обучения. Метод опи-

сывает зависимость, где при увеличении длительности тренинга общий ущерб систематически снижается — от начального уровня (при минимальной продолжительности) до полного исчезновения (при максимальной продолжительности). Когда даже наименее успешные слушатели перестают делать ошибки, устанавливается значение, равное нулю (рис. 2). Последующее обучение в такой ситуации экономически неоправданно, так как не ведет к улучшению результатов, а приводит лишь к избыточным издержкам. Оптимальная длительность тренинга достигается из условия равенства удельных величин $R_{уд_i}$ и $S_{уд_i}$.

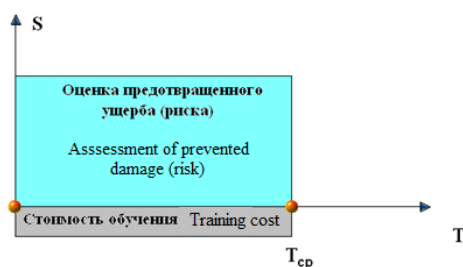


Рис. 1. Зависимость стоимости тренинга от его продолжительности

Fig. 1. The dependence of the cost of training on its duration

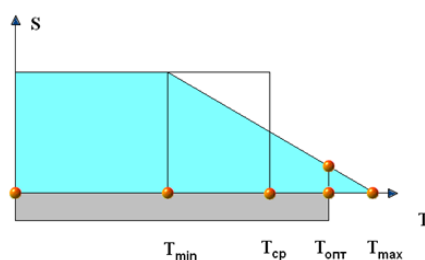


Рис. 2. Интервальная зависимость стоимости тренинга от его продолжительности

Fig. 2. The interval dependence of the cost of training on its duration

Предлагается методология рационального ранжирования образовательных ресурсов (времени и средств), ориентированная на максимизацию критерия эффективности, состоящая из нескольких этапов.

Этап 1 — категоризация и параметризация занятий. Рассмотрим все типы занятий i , которые включают в себя теорию, практику и тренинги. Для каждого из занятия сформируем оценки эффективности как на рис. 1. Далее рассчитаем два показателя: первый — потенциальный предотвращенный ущерб, второй — удельную стоимость тренинга. Расчет выполним на основании ранее представленной методики.

Этап 2 — дискретизация временных ресурсов. Декомпозируем каждый вид занятия на часовые сегменты, где получим в итоге набор числовых показателей, отражающих во временных интервалах эффективность.

Этап 3 — алгоритм селекции оптимальных пар. Для отбора комбинации наиболее рентабельных параметров введем вычислительную процедуру, которая представляет собой итерационный алгоритм. На каждой итерации алгоритм, ориентируясь на соот-

ношение величин, выбирает максимальные значения $R_{уд_i}$ и $S_{уд_i}$, которые должны быть неотрицательными, и добавляет в оптимальное множество j , после чего удаляет пару из множества интервальных оценок. Далее повторяет процедуру для следующего шага.

Для всех тренингов формируется оптимальный набор занятий (рис. 3). Затем проводим ограничение множества, используя для этого предельно допустимую продолжительность тренингов или максимально допустимую стоимость на обучение. В итоге мы можем сформировать детализированную программу с указанным в ней количеством часов для каждого вида тренинга. При разработке прикладных учебных программ, когда количество часов по какому либо виду занятий меньше минимально допустимого времени T_{min} , возможно либо полностью исключить эти часы из плана, либо перераспределить нагрузку, сократив часы по другому виду тренинга в пределах допустимого. Такие подробные графики показывают, насколько продуктивно задействуются технические средства и тренажеры. Кроме того, появляется база для решения вопросов

модернизации существующего оборудования или создания новых обучающих инструментов. Ключевым индикатором здесь выступает совокупный объем часов использования средств в рамках оптимальных планов. Если этот показатель оказывается низким, это сигнализирует о неэффективно-

сти применяемого оборудования. На основании полученных данных допустимо сделать предварительную оценку касемо целесообразности модернизации или разработки инновационных технических средств обучения. Такой анализ дает общее представление о необходимости подобных мероприятий.

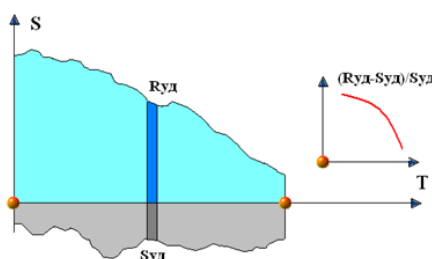


Рис. 3. Оптимальное множество для оценки эффективности занятий

Fig. 3. Optimal set for assessing the effectiveness of classes

Пусть перед нами стоит задача проектирования тренинга. Объектом обучения являются операторы нефтеперекачивающих станций и диспетчеры. Распределим для этого восемьдесят часов на программу, состоящую из девяти тренировочных модулей, где каждый модуль нацелен на отработку стандартных операционных процедур и профилактику инцидентов и аварий. Вычислим среднее время тренинга как

разность максимального и минимального затраченного времени, деленная на два. Величина удельного ущерба коррелирует с затраченным учебным временем, цена которого варьируется в зависимости от технической сложности используемого оборудования и ресурсоемкости самого тренинга. Начальные значения представлены в табл. 1.

Результаты применения указанной методики отражены в табл. 2.

Таблица 1
Начальные значения

Table 1
Initial values

Наименование Title	Код Code	Удельный ущерб, руб. Specific damage, rub	$T_{\min}'$, мин $T_{\min}'$, min	$T_{\max}'$, мин $T_{\max}'$, max	Стоимость часа обучения, руб. Training cost per hour, rub
Занятие вида 1 Training type 1	A1	30 000,00	8	16	2 500,00
Занятие вида 2 Training type 2	A2	65 000,00	16	24	4 500,00
Занятие вида 3 Training type 3	A3	20 000,00	4	16	3 500,00
Занятие вида 4 Training type 4	A4	70 000,00	8	24	6 500,00
Занятие вида 5 Training type 5	A5	15 000,00	4	8	2 500,00

Окончание таблицы 1

Наименование Title	Код Code	Удельный ущерб, руб. Specific damage, rub	$T_{\min'}$, мин $T_{\min'}$, min	$T_{\max'}$, мин $T_{\max'}$, max	Стоимость часа обучения, руб. Training cost per hour, rub
Занятие вида 6 Training type 6	A6	35 000,00	8	16	2 500,00
Занятие вида 7 Training type 7	A7	28 000,00	4	12	2 500,00
Занятие вида 8 Training type 8	A8	10 000,00	4	8	1 500,00
Занятие вида 9 Training type 9	A9	75 000,00	12	18	4 500,00

Таблица 2
Вычисленные показатели

Table 2
Calculation values

Наименование Title	Код Code	Удельный ущерб, руб. Specific damage, rub	Рекомендуемый объем занятий, ч, мин Recommended amount of classes, h, min	Стоимость часа, руб. Cost per hour, rub	Затраты на обучение, руб. Training costs, rub	Оценка предотвращенного ущерба, руб. Assessment of prevented damage, rub
Занятие вида 1 Training type 1	A1	30 000	12 ч 03 мин	2 500	29 073,54	295 110,2
Занятие вида 2 Training type 2	A2	65 000	20 ч 25 мин	4 500	91 103,57	1 151 622,33
Занятие вида 3 Training type 3	A3	0	0	0	0	0
Занятие вида 4 Training type 4	A4	70 000	14 ч 37 мин	6 500	90 784,1	809 010,32
Занятие вида 5 Training type 5	A5	0	0	0	0	0
Занятие вида 6 Training type 6	A6	35 000,00	12 ч 14 мин	2 500	30 340,5	357 002,43
Занятие вида 7 Training type 7	A7	28 000,00	7 ч 17 мин	2 500	17 925,63	165 253,04
Занятие вида 8 Training type 8	A8	0	0	0	0	0
Занятие вида 9 Training type 9	A9	75 000	15 ч 58 мин	4 500	70 120,21	1 018 345,88
Суммарное количество Total quantity	—	—	81 ч 54 мин	—	329 347,55	3 796 344,2

На основании проведенного анализа выявлено, что занятия вида 3, 5 и 8 де-

монстрируют низкую эффективность — их целесообразно исключить из программы

тренинга. Представленная таблица служит практическим инструментом для разработки реальной программы обучения. Кроме того, изучение рекомендаций по рациональному использованию технического оборудования позволяет принять решения как о замене имеющихся технических средств на более современные, так и о модернизации (реконструкции) существующего оборудования.

Выводы

Предложенная методика обеспечивает объективную основу для оптимизации учебных курсов по критерию соотношения предотвращенного ущерба к затратам. Применение методики позволяет оценивать эффективность использования технических средств обучения и принимать решения об их модернизации или разработке новых тренажеров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соромотин А. В. Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов. Ликвидация последствий разливов // International Agricultural Journal. 2021. № 1. С. 69–74.
2. Болотов Г. Б. Примеры и некоторые статистические данные о разливах нефти и нефтепродуктов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2021. № 4 (41). С. 123–128.
3. Захаров Д. Ю., Климова И. В., Щербатюк Я. В. Оценка влияния функционального состояния персонала на риски возникновения аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса // Нефтегазовое дело. 2017. № 4. С. 152–164.
4. Уроки, извлеченные из аварий // Ростехнадзор. URL: <https://clck.ru/iVbXm> (дата обращения: 22.10.2025).
5. Усовершенствование процедуры групповой экспертной оценки при анализе профессиональных рисков на предприятиях ТЭК / Е. И. Карчина [и др.] // Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 994–1003.
6. ФНИП «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» : приказ Ростехнадзора от 15 декабря 2020 г. № 533 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/400128950/> (дата обращения: 22.10.2025).
7. Automated information support system for AOR methods of hazard and risk analysis for oil and gas industry / I. A. Melyuseva et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. AGRITECH — VI. 2021. Vol. 981. No. 3. P. 103–112. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032057
8. Разработка тренажерных установок для подготовки персонала нефтеперерабатывающих предприятий / И. А. Мелюсева [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 10. С. 82–87.

REFERENCES

1. Soromotin A. V. Emergency spills of oil and oil products. Liquidation of spill consequences // International Agricultural Journal. 2021. No. 1. P. 69–74.

2. Bolotov G. B. Examples and some statistics on oil and oil products spills // Geology and mineral resources of the Western Urals. 2021. No. 4 (41). P. 123–128.
3. Zakharov D. Yu., Klimova I. V., Shcherbatyuk Ya. V. Assessment of the influence of personnel functional state on the risks of emergencies at oil and gas facilities // Oil and Gas Business. 2017. No. 4. P. 152–164.
4. Lessons learned from accidents // Rostekhnadzor. URL: <https://clck.ru/iVbXm> (accessed 22.10.2025).
5. Improvement of the group expert assessment procedure in the analysis of professional risks at fuel and energy complex enterprises / E. I. Karchina et al. // Journal of Mining Institute. 2024. No. 270. P. 994–1003.
6. Federal norms and rules "General Explosion Safety Rules for Explosion and Fire Hazardous Chemical, Petrochemical and Oil Refining Industries" : order of Rostekhnadzor dated 15.12.2020 No. 533 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/400128950/> (accessed 22.10.2025).
7. Automated information support system for AOR methods of hazard and risk analysis for oil and gas industry / I. A. Melyuseva et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. AGRITECH — VI. 2021. Vol. 981. No. 3. P. 103–112. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032057
8. Development of simulator systems for training personnel of oil refineries / I. A. Melyuseva et al. // Labor Safety in Industry. 2021. No. 10. P. 82–87.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хафизов Ильдар Фанилевич, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); РИНЦ ID: 592403; ORCID: 0000-0002-2638-9937; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Озден Инна Владимировна, канд. хим. наук, доцент кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); РИНЦ ID: 907017; Scopus AuthorID: 55275397100; ORCID: 0000-0001-9385-4600; e-mail: inessa_21@bk.ru

Кандалов Алексей Сергеевич, директор ЧУ ДПО «Газпром ОНУТЦ» (236006, г. Калининград, ул. Генерала Галицкого, д. 20); e-mail: director@onutc.ru

Шевченко Дмитрий Иванович, д-р техн. наук, инженер НПП «Автоматизация технологических процессов» (450073, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Кузнецовский Затон, д. 22); e-mail: info@nppatp.com

Мелюсева Ирина Анатольевна, директор НПП «Автоматизация технологических процессов» (450073, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Кузнецовский Затон, д. 22); e-mail: info@nppatp.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ildar F. Khafizov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation); ID RSCI: 592403; ORCID: 0000-0002-2638-9937; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Inna V. Ozden, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation); ID RSCI: 907017; Scopus AuthorID: 55275397100; ORCID: 0000-0001-9385- 4600; e-mail: inessa_21@bk.ru

Aleksei S. Kandalov, Head of the JSC «Gazprom ONUTC» (20 General Galitsky St., Kaliningrad, 236006, Russian Federation); e-mail: director@onutc.ru

Dmitrii I. Shevchenko, Dr. Sci. (Eng.), Engineer of the NPP «ATP», (Room 301, Block 2, Building 22, Kuznetsovsky Zaton St., Ufa, 450073, Russian Federation); e-mail: info@nppatp.com

Irina A. Melyusena, Head of the NPP «ATP» (Room 301, Block 2, Building 22, Kuznetsovsky Zaton St., Ufa, 450073, Russian Federation); e-mail: info@nppatp.com

УДК 614.841.332

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ

Леменков Михаил Дмитриевич, Шархун Сергей Владимирович, Штерензон Вера Анатольевна,
Черепанов Евгений Александрович

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

Аннотация. В данной работе представлен аналитический обзор отечественных и зарубежных методов и технических средств оценки характеристик теплоизоляционных материалов, применяемых в современных фасадных системах. Авторами выявлено, что при стабильном росте производства и потребления пенополистирола в РФ, достигающего 20 % от общего объема теплоизоляции, вопросы его эксплуатационной надежности в условиях термического воздействия остаются изученными не в полной мере. Основное внимание в исследовании уделено проблеме скрытых повреждений внутреннего изоляционного слоя при пожаре, которые не визуализируются без демонтажа декоративного покрытия. В ходе критического анализа нормативной базы (ГОСТ, NFPA, ISO) установлено, что существующие методики направлены преимущественно на определение показателей пожарной опасности (горючесть, воспламеняемость), но игнорируют критерии сохранения функциональных свойств материала после температурного нагружения. Авторами систематизированы существующие критерии термостойкости и выявлены ключевые ограничения приборной базы, включая невозможность варьирования дистанции теплового потока и отсутствие системного подхода к анализу материалов в составе многослойных конструкций. В заключение обосновывается необходимость разработки инновационного измерительного прибора и методики оценки, позволяющих учитывать ранее не регистрируемые параметры поведения пенополистирола после пожара.

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы, воздействие повышенных температур, фасадные системы, тепловой поток, пожарная безопасность, пенополистирол

Для цитирования: Аналитический обзор отечественных и зарубежных средств контроля теплоизоляционных материалов фасадных систем / М. Д. Леменков [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 97–110.

ANALYTICAL REVIEW OF DOMESTIC AND FOREIGN TOOLS FOR MONITORING THERMAL INSULATION MATERIALS IN FACADE SYSTEMS

Mikhail D. Lemenkov, Sergey V. Sharkhun, Vera A. Shterenzon, Evgeny A. Cherepanov
UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This paper provides an analytical review of domestic and international methods and technical tools for evaluating the characteristics of thermal insulation materials used in modern facade systems. The authors reveal that while the production and consumption of expanded polystyrene (EPS) in the Russian Federation is steadily growing, reaching 20 % of the total insulation market, its operational reliability under thermal exposure remains insufficiently studied. The study focuses on the problem of latent damage to the internal insulation layer during a fire, which cannot be visualized without dismantling the decorative coating. A critical analysis of the regulatory framework (GOST, NFPA, ISO) establishes that existing methodologies primarily focus on determining fire hazard indicators (combustibility, flammability) but ignore criteria for maintaining the material's functional properties after thermal loading. The authors systematize existing heat resistance criteria and identify key limitations of the current instrumentation, including the inability to vary heat flux distance and the lack of a systematic approach to analyzing materials within multilayer structures. In conclusion, the paper justifies the need for developing an innovative measuring complex and a comprehensive evaluation methodology to account for previously unrecorded behavioral parameters of expanded polystyrene after fire exposure.

Keywords: thermal insulation materials, exposure to elevated temperatures, facade systems, heat flux, fire safety, expanded polystyrene

For citation: Analytical review of domestic and foreign tools for monitoring thermal insulation materials in facade systems / M. D. Lemenkov et al. // Technosphere safety. 2026. No. 2 (51). P. 97–110.

Введение

В 2024 г. объем производства пенополистирола достиг приблизительно 15 млн тонн [1]. На основе данных можно наблюдать, что тенденция к росту потребления пенополистирола в стране сохраняется. Повышение спроса на пенополистирол способствует увеличению количества производителей данного

вида материала. Согласно представленным статистическим данным (рис. 1, 2), на долю пенополистирола приходится порядка 20 % совокупного объема выпускаемых теплоизоляционных материалов [2]. Широкое распространение и высокая рыночная востребованность данного полимера обуславливают необходимость углубленного изучения его физико-технических характеристик.

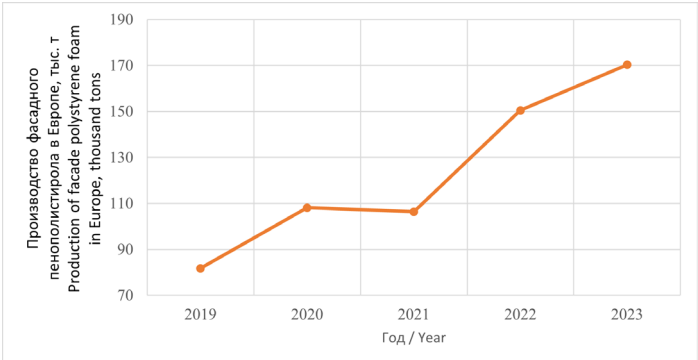


Рис. 1. Объем производства пенополистирола в Европе за 2019–2023 гг.
Fig. 1. Production volume expanded polystyrene in Europe for 2019–2023



Рис. 2. Объем производства пенополистирола в Европе за 2019–2023 гг.

Fig. 2. Production volume expanded polystyrene in Europe for 2019–2023

Результаты и их обсуждение

Динамичное развитие строительного сектора (рис. 3) обуславливает ужесточение нормативов, касающихся архитектурно-планировочных решений, эксплуатационной безопасности и энергоэффективности объектов [2]. Расширение номенклатуры применяемых материалов создает проблему недостаточной изученности физико-технических свойств инновационных составов.

Несмотря на приоритетное использование негорючей теплоизоляции в конструкциях

фасадных систем, согласно статистическим данным, доля горючих полимерных материалов достигает 30 % от совокупного объема рынка [3]. Наличие подобных утеплителей в составе ограждающих конструкций выступает критическим фактором вертикального распространения пламени. Тем не менее в сегменте вспененного пенополистирола зафиксирована выраженная динамика: за первое полугодие 2024 г. объем его потребления в профессиональном строительстве увеличился на 13 %, демонстрируя устойчивый тренд к дальнейшему росту.

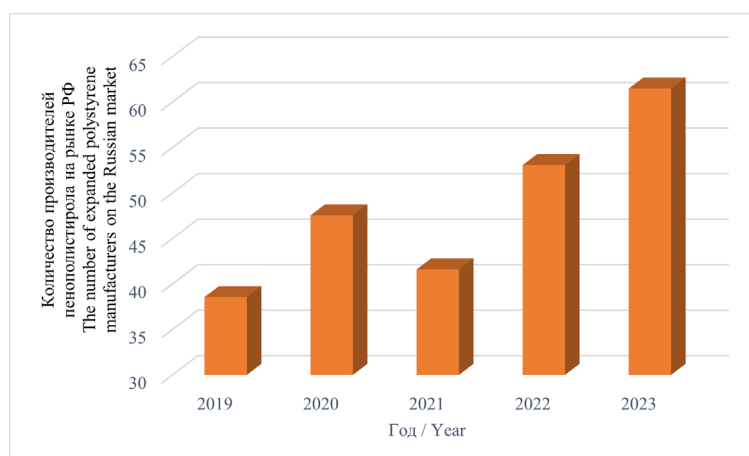


Рис. 3. Количество производителей пенополистирола на рынке Российской Федерации 2019–2023 гг.

Fig. 3. Number of manufacturers expanded polystyrene on the Russian market 2019–2023

В настоящее время, согласно требованиям нормативных документов по строительству, минимально требуемое противопожарное расстояние между жилыми и обществен-

ными зданиями I степени огнестойкости составляет 6 м [4] (табл. 1). Учитывая особенности современной городской застройки и опыт сотрудников пожарной охраны, при пожарах

с таким противопожарным расстоянием происходит тепловое воздействие от очага пожара на близлежащие объекты. При этом

наружный слой остается целым, а теплоизолирующий слой при применении горючих материалов зачастую повреждается внутри.

Таблица 1
Минимальные требования к взаимному расположению зданий
согласно СП 4.13130 [4]

Table 1
Minimum requirements for the relative location of buildings according
to SP 4.13130 [4]

Степень огнестойкости здания жилых и общественных зданий Fire resistance rating of residential and public buildings	Класс конструктивной пожарной опасности Structural fire hazard class	Минимальные расстояния при степени огнестойкости и классе конструктивной пожарной опасности жилых и общественных зданий, м Minimum separation distances for residential and public buildings based on fire resistance rating and constructive fire hazard class, m			
		I, II, III C0	II, III C1	IV C0, C1	IV, V C2, C3
I, II, III	C0	6	8	8	10
II, III	C1	8	10	10	12
IV	C0, C1	8	10	10	12
IV, V	C2, C3	10	12	12	15

Прямой материальный ущерб от пожаров в жилом секторе за 2023 г. составил 61,5 млн руб., что на 15 % больше, чем в предыдущем году. В рамках анализа статистических данных была выявлена следующая закономерность: при уменьшении общего количества пожаров наблюдается увеличение материального ущерба от них (рис. 4). Это позволяет

сделать вывод о тенденции роста стоимости одного пожара, что свидетельствует об увеличении финансовых потерь от пожаров в зданиях жилого назначения в Российской Федерации с каждым годом. Все вышесказанное говорит о том, что термостойкость материалов не была оценена в полной мере и требует более детального исследования.

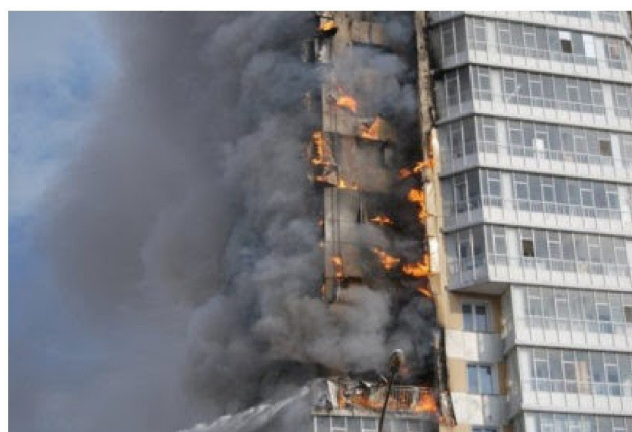
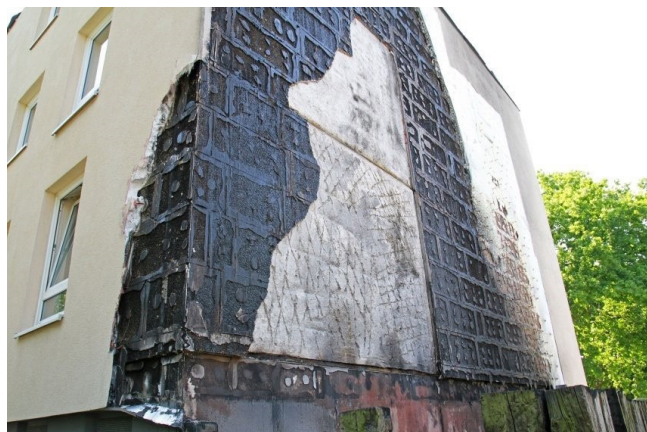


Рис. 4. Горючий утеплитель из пенополистирола
Fig. 4. Combustible insulation made of expanded polystyrene

При этом данные повреждения невозможно обнаружить непосредственно в период расследования пожара, что приводит к необходимости проведения повторных экспертиз. Даже при условии строгого соответствия объекта действующим нормативным требованиям пожарной безопасности относительно соблюдения противопожар-

ных разрывов интенсивное тепловое воздействие способно инициировать деструктивные процессы в материалах теплоизоляционного слоя. Характерно, что подобные изменения могут протекать латентно, без видимых повреждений целостности внешнего декоративно-защитного слоя. Данный эффект можно наблюдать на рис. 5.



Рис. 5. Фотографии пожаров фасадных утеплителей [5]

Fig. 5. Photos of facade insulation fires [5]

Этой широкой теме посвятили свои работы ведущие российские и зарубежные специалисты. Ряд ученых занимались исследованием методов контроля температурной стойкости различных материалов. Другая группа специалистов разрабатывала приборы и устройства для определения термостойкости. Тем не менее свойства термостойкости остаются недостаточно исследованными.

Методологические аспекты контроля температурной стойкости строительных материалов детально освещены в работах О. Н. Петрова, Р. Н. Галиахметова [6], А. С. Горбунова [7] и Е. В. Чернушевич [8]. Значительный вклад в изучение термостабильности теплоизоляции внесли П. П. Гуюмджян, С. В. Коканин и С. В. Цыбакин [9]. Однако специфика оценки термостойкости компонентов непосредственно в структуре фасадных систем до настоящего времени остается недостаточно проработанным вопросом. Несмотря

на предложенную Г. А. Пранцкявичюсом и В. И. Янукенасом [10] методику количественной оценки данного критерия, ее практическое применение ограничено рядом факторов: узким диапазоном применимости по механическим свойствам, высокой чувствительностью к точности настройки оборудования и жесткими требованиями к стабильности температурного режима.

В качестве первого этапа исследования проведен анализ существующих методов и средств контроля теплоизоляционных строительных материалов.

Строительные теплоизоляционные материалы подвергаются двум основным видам испытаний. Первая группа испытаний направлена на оценку физико-технических характеристик материалов (рис. 6) и позволяет проверить их эксплуатационные свойства без учета воздействия повышенных температур. Вторая группа испытаний

предназначена для определения пожароопасных свойств материалов (рис. 6). Однако результаты этих испытаний не позволяют

сделать вывод о сохранении эксплуатационных свойств материала после воздействия повышенных температур.



Рис. 6. Параметры теплоизоляционных материалов

Fig. 6. Parameters of thermal insulation materials

В результате сравнительного анализа методов оценки пожарно-технических характеристик (табл. 2) установлено, что существующая методология ориентирована преимущественно на определение параметров горючести материалов, скорость развития пожара и мониторинг опасных факторов пожара. В текущей нормативной

базе акцент смещен в сторону оценки антропогенного и экологического воздействия продуктов горения. Вместе с тем выявлено отсутствие стандартизированных подходов к оценке ухудшения эксплуатационных свойств материала, теплопроводности, прочности, огнестойкости после термического воздействия.

Таблица 2
Зарубежные методы испытаний

Table 2
Foreign test methods

Страна A country	Метод испытания Test method	Оценка пожароопасных свойств материалов Assessment of fire-hazardous properties of materials
США USA	NFPA 285 (+ ASTM E84)	Все свойства All properties
Канада Canada	ULC S134	Все свойства All properties

Окончание таблицы 2

Страна A country	Метод испытания Test method	Оценка пожароопасных свойств материалов Assessment of fire-hazardous properties of materials
Франция France	Lepir II	Все свойства All properties
Германия Germany	DIN 4102 Part 20	Все свойства All properties
Швеция Sweden	SP Fire 105	Все свойства All properties
Великобритания Great Britain	BS 8414-1	Все свойства All properties
Евросоюз European Union	EN 13823	Выделение тепла Heat generation
ISO	ISO 13785-2	Все свойства All properties
ISO	ISO 13784-1	Частичная (в небольшом помещении) Partial (in a small room)
ISO	ISO 13784-233	Частичная (в небольшом помещении) Partial (in a small room)
США USA	FM 4880 (25 ft. and 50 ft.)	Выделение тепла, распространение пламени Heat generation, flame propagation

Существующие методы характеризуются следующими ограничениями: во-первых, приоритетом анализа является влияние продуктов горения на людей и окружающую среду; во-вторых, отсутствие системного подхода к оценке остаточного ресурса и стабильности физико-механических свойств строительных материалов, подвергшихся температурному нагружению.

В рамках проведенного исследования были проанализированы зарубежные методики испытаний фасадных систем (рис. 7), в частности, подходы, применяемые в известных странах. Большинство из рассмотренных методик охватывают оценку всех пожароопасных свойств фасадных систем. Однако по результатам анализа было установлено, что данные методики не включают оценку термостойкости теплоизоляционных материалов. При этом ни один метод также не оценивает сохранение эксплуатацион-

ных свойств материала после воздействия теплового потока. На основании проведенного анализа отечественных и зарубежных методов оценки горючих материалов можно сделать вывод, что методы, представленные в табл. 2, измеряют пожароопасные свойства, но не термостойкость.

Анализ функциональных возможностей сертифицированного испытательного оборудования и нормативно закрепленных методик выявил их узкую специализацию. Текущая приборная база и применяемые в ней регистрирующие элементы адаптированы исключительно под стандартные алгоритмы испытаний, что исключает возможность прецизионного контроля термостойкости теплоизоляции на различных заданных дистанциях от источника теплового воздействия. Следовательно, потребность в разработке и внедрении новых измерительных комплексов для

контроля термической деградации материалов по-прежнему актуальна.

На следующем этапе исследования был проведен анализ отечественных приборов и установок контроля пожароопасных и термических свойств строительных материалов.

Текущее аппаратное обеспечение характеризуется невозможностью изменения

геометрических параметров теплового воздействия и отсутствием механизмов оценки материала как элемента многослойной фасадной конструкции. Ограниченность функционала рамками закрытого объема и значительные временные затраты на проведение испытаний указывают на необходимость модернизации существующих измерительных комплексов.



Стандарт NFPA 268 / NFPA 268



Стандарт NFPA 285 / NFPA 285

Рис. 7. Испытание фасадных материалов

Fig. 7. Testing of facade materials

Выводы

Проведенный анализ отечественных и зарубежных источников [7–10, 12–16] (табл. 3) выявил отсутствие унифицированного подхода к определению термостойкости. Установлено, что такие показатели, как динамика потери массы, достижение критических температурных порогов, возникновение пламенного горения и масштабы структурных повреждений, зачастую необоснованно исключаются из перечня определяющих критериев. Данное обстоятельство подтверждает дефицит комплексных исследований в области термостойкости по совокупности указанных параметров.

Таким образом, проведен анализ, результаты которого показали, что ни один известный метод контроля термостойкости не дает полной картины поведения пенополистирола. Существующие приборы не позволяют провести оценку огнесохранности теплоизоляционных материалов, а в качестве критерия термостойкости целесообразно учитывать ранее не оцениваемые параметры.

Для решения проблемы исследования необходимо разработать прибор контроля термостойкости материала при воздействии теплового потока для анализа его поведения в условиях пожара.

Таблица 3
Методы оценки термостойкости [7–10, 12–16]
Table 3
Methods for assessing heat resistance [7–10, 12–16]

Источник Source	Критерий термостойкости пенополистирола Polystyrene Expanded Heat Resistance Criteria									
	Разрушение ячеистой структуры Cellular Structure Destruction	Процент потери массы Percentage of Mass Loss	Количество циклов нагрева до частичного или полного разрушения Number of Heating Cycles to Partial or Complete Destruction	Процент (отношение объема усадки к общему объему изделия) Percentage (Ratio of Shrinkage Volume to Total Product Volume)	Достижение критической температуры Reaching Critical Temperature	Максимальная температура сохранения от химических превращений Maximum Temperature for Resilience from Chemical Transformations	Время появления повреждений при температуре 180–200 °С Damage Onset Time at 180–200 °C	Наличие пламенного горения Presence of Flame Combustion	Снижение твердости Hardness Reduction	Величина повреждений Damage Extent
Кудряшов В. А. Kudryashov V. A.				×			×			×
Гюмджян П. П. Guyumdzhyan P. P.	×								×	
Андрианов К. А. Andrianov K. A.							×			
Круглов Е. Ю. Kruglov E. Yu.				×						
Чернушевич Е. В. Chernushevich E. V.										
Ушков В. А. Ushkov V. A.						×				
Ковальский Б. И. Koval'skiy B. I.	×						×			

Окончание таблицы 3

Источник Source	Критерий термостойкости пенополистирола Polystyrene Expanded Heat Resistance Criteria									
	Разрушение ячеистой структуры Cellular Structure Destruction	Процент потери массы Percentage of Mass Loss	Количество циклов нагрева до частичного или полного разрушения Number of Heating Cycles to Partial or Complete Destruction	Процент (отношение объема усадки к общему объему изделия) Percentage (Ratio of Shrinkage Volume to Total Product Volume)	Достижение критической температуры Reaching Critical Temperature	Максимальная температура сохранения от химических превращений Maximum Temperature for Resilience from Chemical Transformations	Время появления повреждений при температуре 180–200 °C Damage Onset Time at 180–200 °C	Наличие пламенного горения Presence of Flame Combustion	Снижение твердости Hardness Reduction	Величина повреждений Damage Extent
Пискунов А. А. Piskunov A. A.	×									
Гагарин В. Г. Gagarin V. G.			×							
ГОСТ 7875.0–2018 GOST 7875.0–2018			×							
Кобелев А. А. Kobelev A. A.				×						
Сокорева Е. В. Sokoreva E. V.						×				
Коканин С. В. Kokanin S. V.	×								×	
Кошурина А. А. Koshurina A. A.					×					
ГОСТ 30402–96 GOST 30402–96								×		
Hirschler M. M. Hirschler M. M.				×			×		×	

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ размера и доли рынка EPS – тенденции роста и прогнозы // Mordor Intelligence : информационно-аналитический портал. URL: <https://clck.ru/3MjjQm> (дата обращения: 23.09.2025).
2. Polystyrene Market Size, Share, and Trends // Precedence Research : информационно-аналитический портал. URL: <https://clck.ru/3MjjXr> (дата обращения: 06.10.2025).
3. Теплоизоляция на основе полистирола: тенденции развития рынка // Кровли : интернет-издание. URL: <https://clck.ru/3Mjjcc> (дата обращения: 05.10.2025).
4. СП 4.13130. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://clck.ru/3N2mQ3> (дата обращения: 28.01.2025).
5. Леменков М. Д., Шархун С. В., Пономарев А. В. Формирование скрытого ущерба посредством влияния теплового потока очага пожара на фасадные системы с наружным штукатурным слоем // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы Международной XXXIV научно-практической конференции, посвященной 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, 23–24 августа 2022 г. М., 2022. С. 336–342. EDN: SBJJOO.
6. Метод контроля влияния продуктов температурной деструкции на процессы окисления моторных масел / Б. И. Ковальский [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. № 7–2. URL: <https://clck.ru/3MjsrU> (дата обращения: 06.01.2026). EDN: VCQCGR.
7. Горбунов А. С. Повышение сопротивления усталости зубчатых колес ГТД на основе выбора рационального метода и режимов локальной упрочняющей обработки : дисс. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2019. 228 с. EDN: EBOXNS.
8. Чернушевич Е. В. Разработка метода контроля термодеструктивной стойкости отделочных строительных материалов : дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2022. 170 с. EDN: PPSEKJ.
9. Гюмджян П. П., Коканин С. В., Пискунов А. А. О пожароопасности полистирольных пенопластов строительного назначения // Пожаровзрывобезопасность. 2011. № 8. URL: <https://clck.ru/3MjtEZ> (дата обращения: 28.01.2026). EDN: OFXCMD.
10. Патент № 374540 СССР, МПК G01N 33/38 (2006.01), G01N 3/08 (2006.01). Способ определения количественного критерия термостойкости: № 1645272/29-33 ; заявл. 22.04.1971 ; опубл. 20.03.1973 / Пранцявичюс Г. А., Януkenас В. И. ; заявитель Институт физико-технических проблем энергетики АН Литовской ССР. 2 с.
11. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон № 123 : принят Государственной Думой 04.07.2008 : одобрен Советом Федерации 11.07.2008 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 24.04.2026).
12. NFPA 285. Standard Fire Test Method for Evaluation of Fire Propagation Characteristics of Exterior Non-Load-Bearing Wall Assemblies Containing Combustible Components. NY, 2019. 35 p.
13. ISO 13785-2. Reaction-to-Fire Tests for Façades. Part 2 : Large-Scale Test. Geneva, 2002. 16 p.
14. ISO 13874-1. Reaction-to-Fire Tests for Sandwich Panel building Systems. Part 1 : Test Method for Small Rooms. Geneva, 2014. 32 p.

15. ISO 13874-233. Reaction-to-Fire Tests for Sandwich Panel Building systems. Part 2 : Test Method for Large Rooms. Geneva, 2020. 16 p.

16. EN 13823. Reaction to Fire Tests for Building Products. Building Products Excluding Floorings Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item. Brussels, 2020. 104 p.

REFERENCES

1. EPS Market Size and Share Analysis – Growth Trends and Forecasts // Mordor Intelligence : information and analytical portal. URL: <https://clck.ru/3MjjQm> (accessed 23.09.2025).

2. Polystyrene Market Size, Share, and Trends // Precedence Research : information and analytical portal. URL: <https://clck.ru/3MjjXr> (accessed 06.10.2025).

3. Polystyrene-Based Thermal Insulation: Market Development Trends // Krovli. URL: <https://clck.ru/3Mjjcc> (accessed 05.10.2025).

4. SP 4.13130. Fire protection systems. Limiting the spread of fire at protected facilities. Requirements for space-planning and design solutions // Codex: electronic fund of legal and regulatory-technical documents. URL: <https://clck.ru/3N2mQ3> (accessed 28.01.2025).

5. Lemenkov M. D., Sharkhun S. V., Ponomarev A. V. Formation of hidden damage through the influence of the heat flow of the fire source on façade systems with an external plaster layer // Actual problems of fire safety : materials of the International XXXIV scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the formation of the Federal State Budgetary Institution VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, August 23–24, 2022. Moscow, 2022. P. 336–342. EDN: SBJJOO.

6. Method for monitoring the influence of thermal degradation products on the oxidation processes of motor oils / B. I. Koval'skiy et al. // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2015. No. 7-2. URL: <https://clck.ru/3MjsrU> (accessed 06.01.2025). EDN: VCQCGR.

7. Gorbunov A. S. Increasing the fatigue resistance of gas turbine engine gears based on the selection of a rational method and modes of local hardening treatment : dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Rybinsk, 2019. 228 p. EDN: EBOXNS.

8. Chernushevich E. V. Development of a method for monitoring the thermal degradation resistance of finishing building materials : dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Krasnoyarsk, 2022. 170 p. EDN: PPSEKJ.

9. Guyumdzhyanyan P. P., Kokanin S. V., Piskunov A. A. On the fire hazard of polystyrene foam plastics for construction purposes // Fire and Explosion Safety. 2011. No. 8. URL: <https://clck.ru/3MjtEZ> (accessed 28.01.2025). EDN: OFXCMD.

10. Patent No. 374540 USSR, IPC G01N 33/38 (2006.01), G01N 3/08 (2006.01). Method for Determining the Quantitative Criterion of Heat Resistance: No. 1645272/29-33; declared 22.04.1971; published: 20.03.1973 / Prankevičius G. A., Janukenas V. I. ; applicant Institute of Physical and Technical Problems of Power Engineering of the Academy of Sciences of the Lithuanian SSR. 2 p.

11. Technical Regulations on Fire Safety Requirements : Federal Law No. 123 : adopted by the State Duma on 04.07.2008 : approved by the Federation Council on 11.07.2008 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (accessed 24.04.2026).

12. NFPA 285. Standard Fire Test Method for Evaluation of Fire Propagation Characteristics of Exterior Non-Load-Bearing Wall Assemblies Containing Combustible Components. NY, 2019. 35 p.
13. ISO 13785-2. Reaction-to-Fire Tests for Façades. Part 2 : Large-Scale Test. Geneva, 2002. 16 p.
14. ISO 13874-1. Reaction-to-Fire Tests for Sandwich Panel building Systems. Part 1 : Test Method for Small Rooms. Geneva, 2014. 32 p.
15. ISO 13874-233. Reaction-to-Fire Tests for Sandwich Panel Building systems. Part 2 : Test Method for Large Rooms. Geneva, 2020. 16 p.
16. EN 13823. Reaction to Fire Tests for Building Products. Building Products Excluding Floorings Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item. Brussels, 2020. 104 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леменков Михаил Дмитриевич, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве Уральского института ГПС МЧС России (620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); AuthorID: 1131113; SPIN-код: 5035-5595; e-mail: lemenkov@internet.ru

Шархун Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры пожарной безопасности в строительстве Уральского института ГПС МЧС России (620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); AuthorID: 795609; SPIN-код: 6300-8576; e-mail: s_sharkhun@mail.ru

Штерензон Вера Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, доцент Уральского федерального университета (620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19); доцент Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 660374; ORCID: 0000-0001-5265-9489; e-mail: v.a.shterenzon@urfu.ru

Черепанов Евгений Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры надзорной деятельности и права Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 849208; e-mail: cherepanov_evgen@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail D. Lemenkov, Lecturer of the Department of Fire Safety in Construction, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); AuthorID: 1131113; SPIN-code: 5035-5595; e-mail: lemenkov@internet.ru

Sergey V. Sharkhun, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor Deputy Head of the Department of Fire Safety in Construction, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); AuthorID: 795609; SPIN-code: 6300-8576; e-mail: s_sharkhun@mail.ru

Vera A. Shterenzon, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Ural Federal University (19 Mira St., Ekaterinburg, 620022, Russian Federation), Associate Professor of UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 660374; ORCID: 0000-0001-5265-9489; e-mail: v.a.shterenzon@urfu.ru

Evgeny A. Cherepanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Supervision and Law, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 849208; e-mail: cherepanov_evgen@mail.ru

УДК 614.84

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЙ ПОЖАРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПО ЗАЩИТЕ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ОТ ПОЖАРОВ НИЗКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В РОССИИ И В СТРАНАХ БАЛКАНСКОГО РЕГИОНА

Степанов Олег Игоревич¹, Стахеев Максим Валерьевич²

¹ Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Российская Федерация

² Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Приведены применяемая классификация ландшафтных пожаров и причины возникновения ландшафтных пожаров низкой растительности. Проанализированы статистические данные по ландшафтным пожарам в Российской Федерации. Проведено сравнение условий пожаротушения в России и странах Балканского региона. Рассмотрен порядок действий органов управления и подразделений по тушению ландшафтного пожара. Исследованы особенности технического оснащения пожарных подразделений для тушения природных пожаров в России и странах Балканского региона. Рассмотрены тактические возможности малых мобильных групп по защите населенных пунктов от ландшафтных пожаров низкой растительности. С использованием аппарата сетей Петри исследован общий процесс функционирования малой мобильной группы по тушению ландшафтного пожара. Исходя из тактического потенциала малой мобильной группы тушения ландшафтного пожара, заданы условия ее функционирования. Для оценки тактического потенциала пожарных подразделений при тушении низовых ландшафтных пожаров предложен коэффициент занятости тактических единиц. Приведены технические операции, проводимые воздушными судами при тушении ландшафтных пожаров. Приведено сравнение процесса функционирования различных тактических единиц (групп) с учетом предложенного коэффициента занятости. Сделаны выводы по наиболее эффективным первичным подразделениям на ландшафтном пожаре низкой растительности.

Ключевые слова: природный пожар, пожар низкой растительности, тушение, группа, подразделение, пожарная техника

Для цитирования: Степанов О. И., Стахеев М. В. Анализ эффективности действий пожарных подразделений по защите населенных пунктов от пожаров низкой растительности в России и в странах Балканского региона // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 111–129.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF FIRE DEPARTMENTS IN PROTECTING SETTLEMENTS FROM LOW VEGETATION FIRES IN RUSSIA AND THE COUNTRIES OF THE BALKAN REGION

Oleg I. Stepanov¹, Maxim V. Stakheev²

¹ Yugorsk State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

² UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The article presents the classification of landscape fires and the causes of low vegetation landscape fires. Statistical data on landscape fires in the Russian Federation are analyzed. A comparison of firefighting conditions in Russia and the Balkan countries is provided. The procedure for controlling bodies and units to extinguish a landscape fire is considered. The technical equipment of fire brigades for extinguishing wildfires in Russia and the Balkan countries is studied. The tactical capabilities of small mobile groups for protecting settlements from low vegetation landscape fires are considered. Using the Petri net apparatus, the general functioning of a small mobile group for extinguishing a landscape fire is studied. Based on the tactical potential of a small mobile group for extinguishing a landscape fire, the conditions of its operation are specified. To assess the tactical potential of fire brigades in extinguishing ground landscape fires, an occupancy rate of tactical units is proposed. Technical operations carried out by aircraft when extinguishing landscape fires are presented. A comparison of the functioning of various tactical units (groups) is provided, taking into account the proposed occupancy rate. Conclusions were drawn on the most effective primary units for landscape fires of low vegetation.

Keywords: wildfire, low-vegetation fire, extinguishing, group, unit, fire-fighting equipment

For citation: Stepanov O. I., Stakheev M. V. Analysis of the effectiveness of fire departments in protecting settlements from low vegetation fires in Russia and the countries of the Balkan region // *Technosphere safety*. 2026. No. 2 (51). P. 111–129.

Введение

В последние 30 лет наблюдаются рост количества ландшафтных (природных) пожаров, угрожающих населенным пунктам, и увеличение площадей, пройденных крупными природными пожарами, в т. ч. в северных странах, в арктическом регионе и в горной местности. В 2020 г. впервые наблюдалась следующая тенденция: пламя охватило не только смешанные леса средней полосы России, но и территории за полярным кругом, чего ранее не случалось [1].

Анализ обстановки с ландшафтными пожарами показал, что каждый год в России случаются тысячи ландшафтных пожаров (лесных, травяных и почвенных) (табл. 1). Нередко огонь переходит на деревни, села и даже на участки (районы) крупных населенных пун-

ктов. В ходе пожаров сгорают дома, гибнут люди и животные. Дым и иные продукты горения на дорогах становятся причиной ДТП.

В 2024 г. страны Балканского региона, от Словении и Хорватии на севере до Болгарии и Греции на юге, столкнулись с разрушительными природными пожарами. Для примера, в Черногории пожары вспыхнули в конце июля и затронули столицу Подгорицу, муниципалитеты Цетинье, Никшич, Даниловград, прибрежные курорты Бар, Будву и Сутоморе. В Сутоморе пламя подошло вплотную к домам [2]. Площадь и количество лесных пожаров показаны на рис. 1.

Для повышения эффективности действий пожарных подразделений по защите населенных пунктов от ландшафтных пожаров необходимо проанализировать следующие аспекты:

- действия личного состава пожарно-спасательных подразделений при тушении пожаров низкой растительности;
- особенности снаряжения и техники, применяемой пожарно-спасательными подразделениями при тушении ландшафтных пожаров низкой растительности;
- определение оптимального состава снаряжения и техники для личного состава пожарно-спасательных подразделений, участвующих в тушении ландшафтных пожаров низкой растительности;
- оценка эффективности пожарных подразделений через коэффициент занятости.

Рассмотрим перечисленные аспекты деятельности пожарных формирований на примере различных локаций России и стран Балканского региона.

В качестве объекта исследования приняты ландшафтные пожары низкой растительности как наиболее частые, скоротечные, быстро развивающиеся и являющиеся основой для перехода горения в лесной фонд, на жилые, хозяйственные и промышленные здания, сооружения и транспорт.

Предметом исследования определена деятельность пожарных (лесопожарных) формирований при тушении ландшафтных пожаров низкой растительности.

Таблица 1
Количество и площадь лесных пожаров, возникших на территории Российской Федерации в зонах наземного обнаружения, тушения и лесоавиационных работ, по данным региональных диспетчерских служб лесного хозяйства с 1 января 2024 г. по 29 ноября 2024 г.

Table 1

Number and area of forest fires that occurred on the territory of the Russian Federation in the zones of ground detection, extinguishing and forest aviation operations according to data from regional forestry dispatch services from January 1, 2024, to November 29, 2024

Округ РФ Russian Federation District	Количество пожаров Number of fires	Площадь, пройденная огнем, га Area burned, hectares
Северо-Западный федеральный округ Northwestern Federal District	863	2 587,29
Центральный федеральный округ Central Federal District	433	2 358,00
Южный федеральный округ Southern Federal District	1 032	32 653,20
Северо-Кавказский федеральный округ North Caucasian Federal District	9	289,41
Приволжский федеральный округ Volga Federal District	637	6 572,78
Уральский федеральный округ Ural Federal District	772	14 010,74
Сибирский федеральный округ Siberian Federal District	1 910	333 998,15
Дальневосточный федеральный округ Far Eastern Federal District	4 546	7 418 334,39
Итого за РФ Total	10 202	7 810 803,96

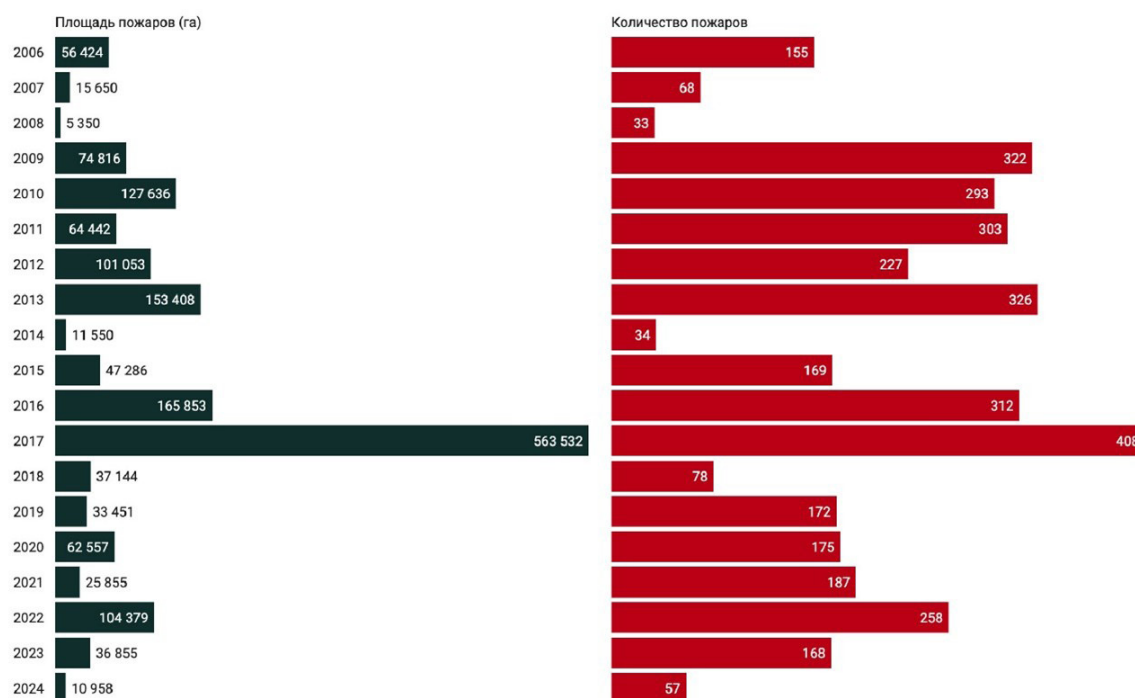


Рис. 1. Площадь и количество лесных пожаров в Черногории за последние 18 лет

Fig. 1. Area and number of forest fires in Montenegro over the past 18 years

Основная часть

Ландшафтный пожар принято понимать как неконтролируемый процесс горения, стихийно возникающий и распространяющийся в природной среде, охватывающий различные компоненты природного ландшафта [3].

Ландшафтные пожары классифицируются по виду ландшафта, по которому распространяется горение. Виды ландшафтных пожаров, которые выделяют различные авторы: травяные (степные) пожары, тростниковые пожары, лесные пожары, подземные пожары [3].

В европейских странах, в т. ч. в странах Балканского региона, принята иная классификация: грунтовые пожары, пожары растительности высотой до 2 м и пожары высотой свыше 2 м (пожары крон).

Несмотря на различия в классификации, пожары низкой растительности в обеих рассматриваемых локациях объединяет тип материалов, сгорающих в огне, осо-

бенности пожара, характер повреждения фитоценоза окружающей среды. Причины возникновения ландшафтных пожаров низкой растительности схожи: преднамеренные поджоги (палы) травы, брошенные непотушенные окурки, плохо затушенные и оставленные без контроля костры, неисправные автомобили (перегретые элементы системы отвода газов от двигателя), пиротехника (петарды, летающие или плавающие фонарики и т. д.), бытовой мусор с остатками жидкости и горючими веществами [2, 3].

Далее в статье мы будем рассматривать пожары растительности высотой до 2 м (группа пожаров, выделяемая в странах Европы) как аналогичные пожарам низкой растительности (категория, принятая в России).

Ландшафтный пожар низкой растительности в России и внешний вид пожароопасной низкой растительности в странах Балканского региона показаны на рис. 2.



Рис. 2. Ландшафтный пожар сухой травы в пойме реки Иртыш (а) и сухая растительность в горной местности Балканского полуострова (б)

Fig. 2. Landscape fire of dry grass in the floodplain of the Irtysh river (a) and dry vegetation in the mountainous area of the Balkan Peninsula (b)

Действия личного состава пожарно-спасательных подразделений при тушении пожаров низкой растительности

Порядок действий органов управления по тушению пожаров низкой растительности в России и в странах Балканского региона не имеет существенных отличий и включает несколько этапов:

- 1) обследование пожара с использованием наземных, авиационных или космических средств в целях уточнения интенсивности пожара, его границ, направления его движения, выявления возможных границ его распространения и локализации, источников противопожарного водоснабжения, подъездов к ним и к месту лесного пожара, а также других особенностей, определяющих тактику тушения;
- 2) доставку людей и средств тушения к месту пожара и обратно;
- 3) локализацию пожара низкой растительности;
- 4) ликвидацию пожара;
- 5) наблюдение за локализованным пожаром и его дотушивание;
- 6) предотвращение возобновления пожара.

Непосредственное руководство тушением осуществляется руководителем туше-

ния лесного пожара (далее — РТЛП) из числа специально подготовленных работников, который управляет на принципах единоначалия подразделениями лесопожарных формирований, а также привлекаемыми силами и средствами пожаротушения, участвующими в тушении лесного пожара [4, 5].

Непосредственно в районе развития пожара создается достаточно сложная структура системы управления, построенная на принципе единоначалия и почти всегда со штабной структурой (рис. 3). Существенная роль в координации разнородных сил и средств как раз и возлагается на штабную структуру.

В странах балканского региона источниками информации о ландшафтном пожаре выступают:

- очевидцы из транспортных средств и туристы;
- операторы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);
- пилоты гражданской и военной авиации;
- непосредственные виновники пожара (когда осознают, что не могут справиться с первоначально контролируемым горением своими силами);
- операторы служб космического мониторинга;
- экипажи морских и речных судов.

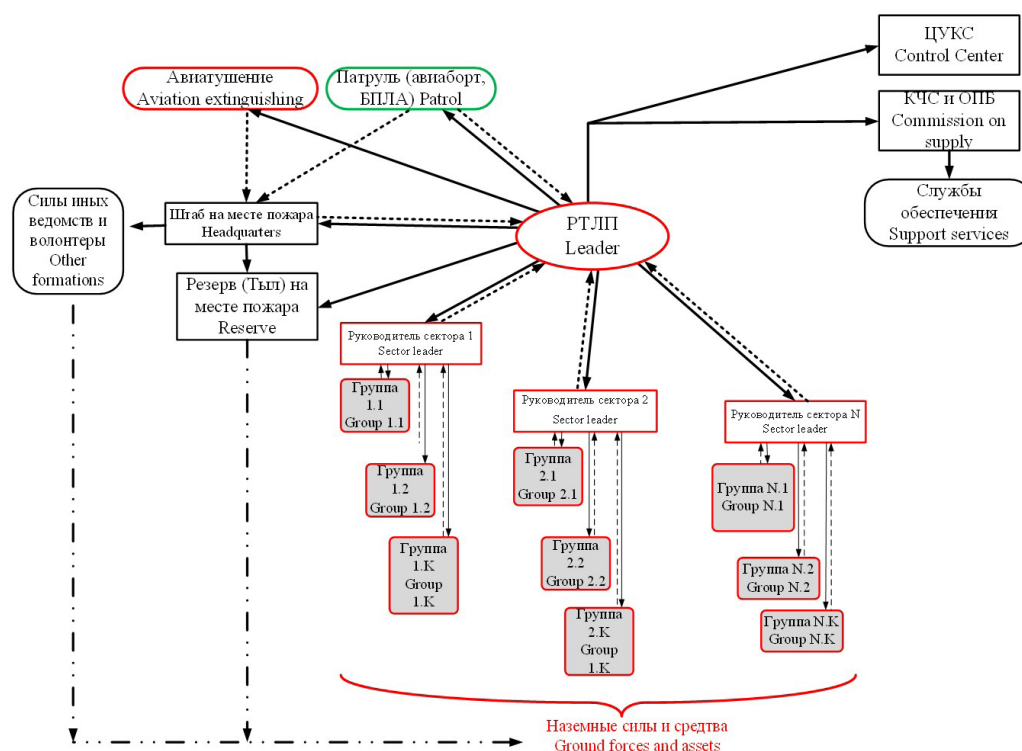


Рис. 3. Общая структурная схема управления при тушении ландшафтных пожаров

Fig. 3. General diagram of the control system for landscape fires

В странах Балкан пожарные службы обычно реагируют на сообщения о развивающемся пожаре низкой растительности высылкой отделения на АЦ или вертолета (самолета) для разведки и последующего тушения (если пожар развивается в труднодоступной местности). При недостаточности сил на месте пожара дополнительно направляются имеющиеся в расчете АЦ и привлекаются расчеты из соседних муниципалитетов. Периодически (1–2 раза в день) практикуется обзорный подъем квадрокоптера с целью обнаружения признаков горения на прилегающей к населенным пунктам местности. Ранние системы обнаружения пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов являются эффективным инструментом для превентивных мер по предотвращению и быстрой локализации пожаров [6].

В России реагирование происходит в зависимости от принадлежности территорий.

Законодательство регламентирует зону ответственности органов исполнительной власти по организации тушения пожаров на подконтрольных территориях с выделением необходимых средств для обеспечения данной деятельности. Так, например, организация и тушение пожаров низкой растительности (вне населенных пунктов) входят в полномочия органа субъекта РФ, осуществляющего деятельность в области лесных отношений (полномочия по охране лесов, в т. ч. тушение лесных пожаров, возложены на органы исполнительной власти субъектов РФ с передачей субвенций из федерального центра и должны реализовываться ими самостоятельно) [7].

Подразделения ФПС МЧС России, согласно полномочиям, осуществляют тушение пожаров в населенных пунктах и городских лесах (осуществление тушения пожаров силами подразделений пожарной охраны, содержащихся за счет средств федерального

бюджета, в населенных пунктах, в т. ч. в городских лесах). Нормативно-правовое разграничение в части полномочий по тушению пожаров на землях определенной категории закрепляет обязанность за конкретным органом осуществлять свои функции с учетом определенных (необходимых) сил и средств, а также выделенного федерального бюджета на эти нужды [8].

Зачастую подразделения ГПС не задействуются как силы первоначального реагирования, т. е. первоначальное тушение возлагается на собственников территорий, а реагирование производится на основании расписаний выездов пожарно-спасательных гарнизонов и планов тушения лесных пожаров.

Пожары низкой растительности, особенно в поймах рек и озер, распространяются зачастую не на территориях лесных хозяйств. Такие земли обычно находятся в зоне ответственности органов местного самоуправления и на начальном этапе развития пожара возникает определенная дезорганизация служб. Такие пожары развиваются обычно возле мест жизнедеятельности человека (вблизи городов и поселков, предприятий, свалок, баз отдыха и пр.). Первыми на них реагируют подразделения муниципальной пожарной охраны, противопожарных служб субъектов РФ, ФПС, а при развитии пожаров возле отдаленных объектов охраняемых предприятий — подразделения частной и ведомственной пожарной охраны.

Хронология пожаров в РФ говорит о том, что переход пожаров низкой растительности на территорию населенных пунктов происходит ежегодно, а привлечение сил и средств ФПС МЧС России на тушение подобных пожаров во многих случаях имеет постоянный характер [8].

Реагирование осуществляется дежурными караулами на АЦ. При соответствующем оснащении подразделений реагируют отделения на АЦ легкого типа или расчеты на АПП.

Особенности снаряжения и техники, применяемой пожарно-спасательными подразделениями при тушении ландшафтных пожаров низкой растительности

Силы, участвующие в тушении крупных ландшафтных пожаров в субъектах России, весьма неоднородны. В основном это личный состав лесоохранных организаций, лесные пожарные авиалесоохраны и заповедников, пожарные парашютисты-десантники, пожарные всех видов пожарной охраны (ФПС, противопожарные службы субъектов, муниципальной, ведомственной, частной и добровольной пожарной охраны), а также волонтеры.

Привлечение различных организаций и служб к защите населенных пунктов от пожаров низкой растительности характеризуется не одинаковым, разноплановым оснащением участников тушения. Наиболее соответствует требованиям безопасности и ситуации оснащение специализированных лесоохранных служб и формирований. Эта характерная черта относится как к средствам индивидуальной защиты, так и к оборудованию и применяемой технике.

Снаряжение подразделений ГПС, ведомственной, частной пожарной охраны, в основном, предназначено для условий техногенных (обычно внутренних) пожаров. Дооснащение этих формирований при тушении пожаров низкой растительности осуществляется либо на месте тушения за счет

муниципальных или региональных резервов, либо не проводится вовсе. Так, например, у личного состава ГПС отсутствуют индивидуальные аптечки для каждого пожарного, легкая защитная одежда, средства защиты органов дыхания (дыхательные аппараты на сжатом воздухе или кислороде при тушении природных пожаров не применяются по тактическим и техническим причинам), персональные радиостанции и средства навигации также для каждого пожарного.

Подобная ситуация наблюдается во многих странах мира, но, в отличие от РФ, городские подразделения противопожарных служб других стран имеют специальные комплекты СИЗ и снаряжения для действий по тушению природных пожаров.

В подразделениях ГПС в последние 15 лет также наблюдается определенное дооснащение оперативных отделений, но это остается пока на уровне энтузиазма руководителей. Зачастую пожарные автомобили в весенний и летний период дополнительно оснащаются ранцевыми лесными огнетушителями (РЛО), самодельными или заводского производства хлопушами.

Для оснащения лесных пожарных разработан следующий перечень снаряжения [3], который в целом идентичен во многих службах Балканского региона: средства связи (сотовый телефон с пополненным балансом и заряженным аккумулятором, носимая радиостанция), костюм лесопожарный (из огнезащитной ткани с противоклещевой защитой), специальная лесопожарная или иная обувь, защищающая от огня (кожаные ботинки с высоким берцем, кожаные или кирзовые сапоги), каска защитная с огнестойким щитком (забралом) и пелериной, щиток защитный из огнестойкого поликарбоната (защитные

очки), фонарь (заряженный) с запасными элементами питания, респиратор противо-дымный, перчатки пожарные или рабочие кожаные (краги с подкладкой), перчатки хлопчатобумажные, головной убор хлопчатобумажный, фляжка для воды (либо питьевая система), GPS-навигатор с запасными элементами питания или компас с картой местности, индивидуальная аптечка, спички, зажигалка (упакованные в водонепроницаемый чехол), нож (мультиинструмент), внешний аккумулятор для подзарядки телефона (power bank), сухой паек (печенье, сахар, сухари, шоколад), накомарник.

В зависимости от вида пожара и задач, пожарные для выполнения работ могут иметь следующую индивидуальную технику и оборудование: немеханизированный инструмент (лопата, мотыга, топор-мотыга, лесопожарные грабли, грабли-мотыга, хлопушка пожарная), ранец противопожарный с гидропультом (РЛО, РП), установка лесопожарная ранцевая (воздуходувка), огнетушитель ранцевый моторизованный, термощуп для торфяных пожаров, зажигательный аппарат.

Наиболее эффективным и распространенным средством тушения пожаров низкой растительности является вода. Она может применяться для прямого и косвенного тушения низовых пожаров.

Для тушения пожаров низкой растительности водой используют насосные установки автоцистерн (АЦ), насосных автомобилей и пожарных поездов, пожарные мотопомпы (переносные, прицепные, малогабаритные), навесные насосы, работающие от двигателей тракторов, а также РЛО, РП. Обеспечение подачи воды и жидких огнетушащих веществ (на основе воды) производится от пожарной и иной водовозной техники. Имеются

случаи применения приспособленной коммунальной техники, оснащенной емкостью для воды и насосом [9].

Особенностью применения основных пожарных автомобилей среднего и тяжелого классов при тушении пожаров низкой растительности в России является их применение с подготовленных дорог и площадок. Пожарные автомобили редко задействуются при пожаротушении на кромке пожара.

Но именно такое применение имеет место и практикуется в различных службах в странах Балканского полуострова для тушения пожаров низкой растительности в условиях равнинной, холмистой и горной местности (рис. 4).

В условиях степи подобная тактика в России все же применяется, например, в Оренбургской области с некоторыми отличиями в самой технике для тушения.



а)



б)

Рис. 4. Прямое тушение кромки пожара с АЦ в движении (а) и занятия по тушению с лафетного ствола пожарного автомобиля в движении (б)

Fig. 4. Direct fire extinguishing from a moving fire truck (a) and fire extinguishing exercises from a fire truck's monitor nozzle (b)

Распространенным в РФ видом лесопожарной техники является лесопожарный автомобиль или малый лесопатрульный комплекс. Такой комплекс зачастую выполняется

на базе автомобилей повышенной проходимости (УАЗ-390945, УАЗ Профи, УАЗ Pickup) или в виде прицепа. Внешний вид лесопожарного автомобиля представлен на рис. 5.



Рис. 5. Малый лесопатрульный комплекс (МЛПК) и мобильный универсальный пожарный модуль МУПМ-300

Fig. 5. Small forest patrol complex and mobile universal fire module

Более производительными представителями лесопожарной техники являются

легкие АЦ, АПП или АЦ для тушения лесных пожаров (рис. 6).



Рис. 6. АПП, АЦ для тушения лесных пожаров

Fig. 6. First aid vehicle, fire engine for extinguishing forest fires

Такая техника наиболее применима для прямого пожаротушения в непосредственной близости к пожару и для оперативного перемещения личного состава формирований, запаса огнетушащих веществ (ОТВ) и оборудования на участках пожаров низкой растительности.

Более тяжелой техникой выступают АЦ среднего и тяжелого типов и специальная техника на базе МТ-ЛБ (оснащена ПН, цистерной для ОТВ, лафетным стволом). Подобная техника достаточно малочисленная и не является общедоступной для большинства формирований, участвующих в тушении пожаров низкой растительности.

Применение авиации для нужд пожаротушения (самолеты-танкеры, гидросамолеты-амфибии, оборудованные специальными емкостями для забора, перевозки и слива воды, а также вертолеты с водосливными устройствами) обычно происходит на пожарах низкой растительности большой площади, при угрозе подобных пожаров населенным пунктам и важным объектам экономики или на пожарах территорий, загрязненных радионуклидами [10].

Одним из основных достоинств использования авиационных систем при тушении пожаров низкой растительности является возможность достаточно быстрого реагирования на возгорание. Специально оснащенные

самолеты и вертолеты могут быстро ориентироваться и достигать места пожара, т. е. начинать борьбу с огнем, минимизируя время, необходимое для мобилизации и передвижения наземных сил [6]. Применение авиации для тушения низовых пожаров травы, тростника обычно считается чрезмерно затратным, но не исключается в ряде случаев.

Пожаротушение с применением авиации актуально для горной и холмистой местности, поросшей травой, средним и высоким кустарником с труднопроходимым рельефом и активно применяется для территорий южных регионов РФ, Дальнего Востока, стран средиземноморского региона.

Таким образом, очевидна целесообразность применения авиации для пожаротушения низкой растительности при угрозе от действующего природного пожара зданиям, сооружениям, территориям населенных пунктов, путепроводам, продуктопроводам и участникам тушения на земле; невозможности своевременной и безопасной доставки наземных сил и средств к кромке пожара (зоне организации отжига); недостатке (отсутствии) наземных сил и средств на отдельных участках пожара; невозможности обеспечить наземные силы и средства необходимыми запасами ОТВ, техники и снаряжения.

Отечественная авиатехника для пожаротушения наиболее часто представлена вертолетами Ми-8 МТВ, Ми-26 с ВСУ-5 и ВСУ-15. За рубежом распространены пожарные вертолеты S-70I FIREHAWK, УН-1Н, СН-53, СН-47, S-64 Skycrane, Eurocopter AS350.

Наиболее распространенными отечественными самолетами-танкерами и пожарными гидросамолетами являются: Ан-2П, БЕ-12П, БЕ-200П, Ил-76ТДП. В лесопожарных службах мира, оказывающим помощь пожарным подразделениям Балканского региона, широко распространены и популярны: Ан-32П, CL-215, CL-415, DHC-415, PZL М-18 Dromader, S-2Т, Air Tractor AT-802F Fire Boss.

Применение тяжелых самолетов-танкеров для тушения пожаров низкой растительности — редкое явление. Ил-76ТДП, Boeing 747 Supertanker, LM-100J FireHerc, AG600M являются фактически штучными образцами, а основная масса работ по сбросам воды возложена на более распространенные и компактные двух- и одномоторные самолеты и вертолеты.

Определение оптимального состава снаряжения и техники для личного состава пожарно-спасательных подразделений, участвующих в тушении ландшафтных пожаров низкой растительности

При защите населенных пунктов от ландшафтных пожаров низкой растительности пожарно-спасательные подразделения как России, так и стран Балканского региона активно начинают применять тактику действий малыми мобильными группами участников пожаротушения (пешими или моторизованными). Перемещение таких групп возможно малогабаритным транс-

портом, таким как АПП, мотовездеходы, багги, квадроциклы, мотоциклы.

Универсальным средством по доставке личного состава, запаса ОТВ и пожарно-технического оборудования является АПП на базе грузового шасси легкого типа.

Применение таких автомобилей (особенно на шасси с колесной формулой 4 × 4) возможно на грунтовых дорогах и на труднопроходимых для обычных автомобилей участках. Но все же использование АПП ограничено из-за самих габаритов транспортного средства. Так, например, на АПП затруднен разворот на узких горных дорогах, где отсутствуют или существенно удалены одна от другой разворотные площадки. Данные автомобили могут передвигаться только вперед и задним ходом, что осложняет маневрирование, создает угрозу группе участников тушения пожаров низкой растительности при смене обстановки (направление ветра, осыпание камней, падение деревьев и т. д.).

Для решения проблемы применения АПП и подобной ей пожарной техники при организации работы малых мобильных групп применяются мотовездеходы, квадроциклы и багги (рис. 7).

Такая техника способна передвигаться не только по грунтовым дорогам, но и по пересеченной местности. Стоит отметить, что грузоподъемность имеющегося кузова является важным параметром техники и должна составлять не менее 300–350 кг для мотовездеходов. Грузоподъемность приведенной техники позволяет мобильной группе перевозить следующее оборудование, снаряжение и технику:

- мотопомпа малогабаритная производительностью до 10 л/с;
- запас рукавов на 60–100 м;
- РЛО (РП);

- бензопила;
- лопаты, грабли, топоры пожарные;
- радиостанции;
- воздуходувка;
- запас горючего;
- запас воды (для РЛО, воздуходувки);
- БПЛА;
- аптечки.



Рис. 7. Мотовездеходы UFORCE 1000 EPS и UFORCE 1000 XL

Fig. 7. UFORCE 1000 EPS and UFORCE 1000 XL ATVs

В условиях бездорожья и труднодоступности мест возникновения и развития пожара малая мобильная группа в составе 2–4 человек на мотовездеходе (квадроцикле, МЛПК) с необходимым оборудованием представляется первичным подразделением на тушение пожара низкой растительности, показывающим высокую эффективность как в России, так и странах Балканского региона.

Развертывание малой мобильной группы пожарных представлена на рис. 8.

Рассматривая тактические возможности малых мобильных групп по защите населенных пунктов от пожаров низкой растительности, мы воспользовались математическим инструментом сетей Петри, для оценки эффективности — коэффициентом занятости (или работы) $K_{п.р.}$.



Рис. 8. Работа малой мобильной группы пожарных

Fig. 8. Work of a small mobile fire brigade

Общая схема развертывания мобильной группы, с учетом базовой АЦ, представлена на рис. 9.

Мобильная группа на АПП способна обработать до 150 м кромки низового, интенсивно распространяющегося пожа-

ра (плотная лесная подстилка толщиной 10–15 см) за одну заправку цистерны АПП водой. При этом АПП действует как стационарный водоисточник для работы СРВД-2 и заправки РЛО (РП-18); заправка ранцев осуществляется однократно.

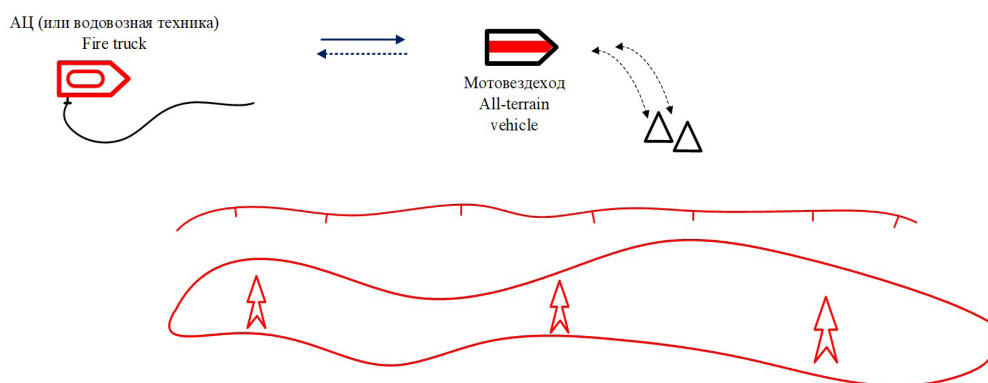


Рис. 9. Схема развертывания малой мобильной группы на мотовездеходе

Fig. 9. Deployment plan for a small mobile group on an all-terrain vehicle

Участники с РЛО (РП-18) действовали как одна группа на одном участке кромки пожара. С оставшимся запасом воды СВВД-2 от АПП при непрерывной работе осуществляет пожаротушение не более 3,2 мин. Фактически же, с учетом передвижения с перекрытым стволом, подача воды осуществлялась не более 6 мин.

Группа из двух пожарных на мотовездеходе (багги, квадроцикле) ограничена запасом воды в 70–90 л. Опираясь на учебно-методические материалы [11, 12] и практику тушения пожаров низкой растительности, установлен следующий параметр: один участник с РЛО (РП) может протушить 20–30 м кромки пожара с одной заправки

емкости, группа из двух человек с РЛО (РП) способна потушить до 60 м кромки пожара низкой растительности с одной заправки ранца, а группа из двух человек с одной воздуходувкой-опрыскивателем и одним РЛО (РП) способна потушить 90–110 м кромки пожара.

Таким образом, мобильная группа с имеющимся запасом воды способна потушить 140–180 м кромки пожара, что сопоставимо с группой (отделением) на АПП.

Общий процесс функционирования малой мобильной группы по тушению пожара низкой растительности, с использованием сетей Петри, имеет следующую структуру (рис. 10).

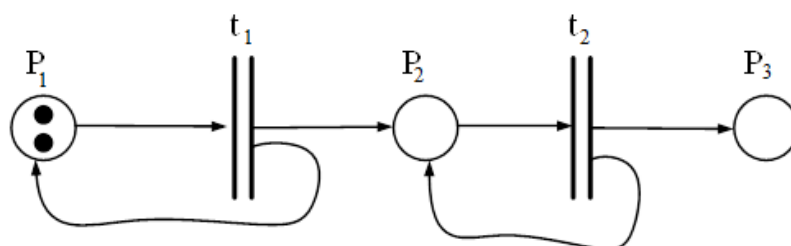


Рис. 10. Сеть, представляющая общий процесс функционирования малой мобильной группы:

P_1 — мобильная группа сформирована в совокупности сил, средств и ресурсов; P_2 — мобильная группа готова к следующему циклу задачи 2; P_3 — мобильная группа реализовала свой тактический потенциал (исчерпав один или несколько видов ресурсов); t_1 — реализация тактических возможностей мобильной группы на 1-м цикле; t_2 — реализация тактических возможностей мобильной группы во 2-м цикле

Fig. 10. Petri net representing the general process of functioning of a small mobile group:

P_1 — mobile group is formed in combination of forces, means and resources; P_2 — mobile team is ready for the next cycle of task 2; P_3 — mobile team has reached its tactical potential (having exhausted one or more types of resources);

t_1 — implementation of tactical capabilities of the mobile group on the 1 cycle; t_2 — implementation of tactical capabilities of the mobile group in the 2 cycle

В структуре под циклами работ понимается условное разделение процесса тушения на сегменты, разделенные действиями по восполнению запаса ОТВ. Маркеры в сети обозначают имеющийся у мобильной группы ресурс. В данном случае ресурс выражен в двух заправках воды.

При исчерпании полного запаса воды, исходя из условий на участке пожара, мобильная группа способна продолжить прямое пожаротушение с применением немеханизированного инструмента либо убыть на восполнение потраченного ресурса. В первом случае может существенно снизиться производительность работ, при этом сохраняется непрерывность пожаротушения на участке. Во втором случае группа восстанавливает тактический потенциал с известными параметрами, но возникает ситуация «провала» на участке тушения пожара, когда наземные силы выведены на восполнение ресурса.

На рис. 11 видим, что после исчерпания ресурса «вода» мобильная группа имеет возможность развития двух вышеописанных сценариев. Переход t_3 — реализация тактических возможностей группой с применением немеханизированного инструмента (вне циклов полных тактических возможностей), позиция P_4 — мобильная группа реализовала свой тактический потенциал и выведена из процесса пожаротушения, переход t_4 — восполнение ресурсов группой, позиция P_5 — мобильная группа восполнила ресурсы, переход t_5 — выдвижение мобильной группы на участок работ.

Оценка эффективности пожарных подразделений через коэффициент занятости

Рассматривая тактический потенциал малой мобильной группы, можно задать следующие условия ее функционирования маркировкой по формуле:

$$\begin{cases} m(P_1) > 0 \\ V_{\text{т.кр.}} \rightarrow \max \\ L_{\text{т.кр.}} \rightarrow \max \end{cases} \quad (1)$$

где:

$V_{\text{т.кр.}}$ — скорость тушения кромки пожара, м/мин;

$L_{\text{т.кр.}}$ — длина тушения кромки пожара, м.

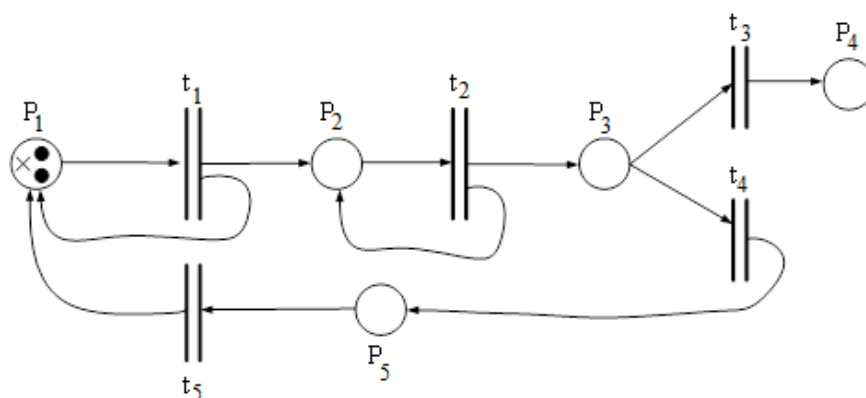


Рис. 11. Расширенная сеть с другими видами ресурсов

Fig. 11. Extended Petri Net with Other Resource

Для удобства оценки тактического потенциала подразделений при тушении низовых ландшафтных пожаров примем коэффициент занятости (или работы) ($K_{п.р.}$). Данный коэффициент выражает за-

висимость времени непосредственного тушения (или работы) мобильной группы ($T_{т.кр.}$) ко времени заправки ОТВ, включая следование ($T_{зап.}$), и рассчитывается по формуле (2):

$$K_{п.р.} = \frac{T_{т.кр.}}{T_{зап.}}. \quad (2)$$

При этом оптимальное значение приведенного коэффициента занятости должно выражаться следующим неравенством:

$$K_{п.р.} > 1. \quad (3)$$

При рассмотрении коэффициента занятости для отделения на АЦ, мобильной группы на МЛПК и пешей группы примем один цикл работы с заправкой. При этом для удобства расчета пренебрегаем временем передвижения к месту заправки и обратно. Для заправки АЦ 6,0-40 потребуется $T_{зап.} = 3$ мин, для МЛПК примем $T_{зап.} = 2$ мин, для пешей группы $T_{зап.} = 4$ мин. Время тушения примем исходя из подачи двух стволов РСКЗ-50 (расход ОТВ 3,7 л/с) от АЦ $T_{т.кр.} = 13$ мин, ручного ствола высокого давления от МЛПК с установкой противопожарной высокого давления (УПВД) «Ермак» $T_{т.кр.} = 25$ мин и производительности РЛО (РП) для пешей группы $T_{т.кр.} = 15$ мин.

Коэффициент занятости для рассматриваемых систем, рассчитанный по формуле (2), составит:

- для отделения на АЦ: $K_{п.р.АЦ} = 4,3$;
- для группы на МЛПК: $K_{п.р.МЛПК} = 12,5$;
- для пешей группы: $K_{п.р.ПГ} = 3,8$.

Таким образом, наиболее эффективной системой по расчету коэффициента занятости будет малая мобильная группа на МЛПК. Пешая группа с РЛО, имея близкий коэффициент занятости с отделением на АЦ, существенно уступает ему по скоростному показателю.

По приведенному алгоритму можно проанализировать эффективность действий по защите населенных пунктов от пожаров низкой растительности с помощью авиации.

Воздушные суда, оборудованные специальными сливными устройствами, могут заправляться по следующим технологическим схемам [13]:

- 1) огнетушащей жидкостью на аэродроме (все ВС);
- 2) водой на водоеме с введением концентрата огнетушащего состава на борту ВС (самолеты-амфибии, вертолеты с ВСУ);
- 3) огнетушащей жидкостью на специально оборудованном пункте у водоема вблизи пожара (вертолеты с МСВУ).

При использовании первой схемы лесопожарное воздушное судно, заправленное на аэродроме, после слива на пожаре возвращается на аэродром для очередной заправки [13].

При этом выполняются следующие технологические операции:

- 1) прогрев двигателей и руление;
- 2) взлет, набор высоты и крейсерской скорости;
- 3) перелет по маршруту аэродром — пожар;

- 4) снижение, полукруг для захода на курс сброса жидкости на пожар; слив жидкости;
- 5) набор высоты и крейсерской скорости;
- 6) перелет пожар — аэродром;
- 7) снижение, полукруг перед посадкой, посадка, руление к месту заправки жидкостью;
- 8) заправка жидкостью и топливом (при необходимости);
- 9) слив отстоя топлива (если была дозаправка);

- 10) повторение операций с 1-й по 9-ю.

Рассмотрим работу воздушного судна вертолета Ми-8 с ВСУ-15, осуществляющего тушение кромки низового пожара. Предположим, что расстояние от водоема до пожара таково, что воздушное судно осуществляет четыре сброса воды в час.

Технические характеристики ВСУ, применяемых на отечественных вертолетах Ми-8, Ми-26, представлены в табл. 2 [13].

Таблица 2
Технические характеристики ВСУ-5 и ВСУ-15

Table 2

Technical characteristics of the water discharge device (WDD-5 and WDD-15)

Наименование параметра Parameter name	ВСУ-5 WDD-5	ВСУ-15 WDD-15
Диаметр (ширина), м Diameter (width), m	2,3	3,1
Полная длина, м Total length, m	7	10
Высота емкости, м Tank height, m	3	3,5
Открытие клапана, с Valve opening, s	8	8
Слив воды, с Water drain, s	6	17
С высоты, м From height, m	30	30
Ширина полосы, м Strip width, m	10–15	20
Длина полосы, м Strip length, m	75	230

Производительность ВС на тушении лесного пожара определяется скоростью прокладки полосы (скоростью тушения). Для вертолетов скорость тушения в этом случае не более 8–10 м/мин. При работе с полевого заправочного пункта (вертолеты)

или с ближайшего к пожару водоема (самолеты-амфибии) скорость тушения с воздуха увеличивается в 2–3 раза.

Коэффициент занятости для Ми-8 с ВСУ при известном значении скорости слива с ВСУ составит:

$$K_{\text{п.р.Ми-8}} = \frac{T_{\text{т.кр.}}}{T_{\text{зап.}}} = \frac{68}{3532} = 0,019,$$

где:

$$T_{\text{т.кр.}} = T_{\text{слива}} \cdot 4 = 17 \cdot 4 = 68 \text{ с};$$

$$T_{\text{зап.}} = 3\,600 - 68 = 3\,532 \text{ с}.$$

Таким образом, скоростной показатель для воздушного судна не существенно превосходит аналогичный для пешей группы. Но потенциальный коэффициент занятости даже при самой быстрой схеме, когда вертолеты с ВСУ заправляются водой непосредственно на водоеме, не позволяет говорить о существенном постоянстве воздействия такой эргатической системы на кромку пожара.

Заключение

Проанализировав эффективность действий пожарных подразделений по защите населенных пунктов от пожаров низкой растительности в России и в странах Балканского региона, можно заключить следующее:

- в рассматриваемых регионах проблемы защиты населенных пунктов от ландшафтных пожаров актуальны, имеют схожие причинно-следственные связи, базирующиеся на культуре эксплуатации

данных территорий и трудностях с транспортировкой огнетушащих веществ. Принципиальное различие наблюдается в природном составе ландшафтов;

- выявленные особенности снаряжения и техники, применяемой пожарно-спасательными подразделениями при тушении ландшафтных пожаров низкой растительности, указывают на невозможность применения стандартных средств защиты и техники, применения привычной тактики действий по тушению пожаров;
- самым эффективным первичным подразделением при тушении пожаров низкой растительности является малая мобильная группа в составе 2–4 человек на мотовездеходе (квадроцикле, МЛПК) с необходимым оборудованием;
- авиация на пожарах низкой растительности выступает существенным, но все же вспомогательным средством руководителя тушения пожара.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лесные пожары 2020 в России и мире // FORESTCOMPLEX.RU : портал о лесозаготовке и деревообработке. URL: <https://clck.ru/erFsE> (дата обращения: 08.10.2025). Дата публикации: 25.01.2021.
2. Идти на огонь // Кедр.медиа : сайт. URL: <https://clck.ru/jtYiW> (дата обращения: 08.10.2025). Дата публикации: 22.08.2024.
3. Справочник добровольного лесного пожарного / А. А. Андреева и др. Изд. 3-е, доп. М., 2017. 152 с.

4. Полевой справочник лесного пожарного. Центральная база авиационной охраны лесов ФБУ «Авиалесоохрана» / Н. С. Фролов и др. 3-е изд. М., 2018. 184 с.
5. Об утверждении Правил тушения лесных пожаров : приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 1 апреля 2022 г. № 244 // Гарант : информационно-правовой портал. URL: <https://clck.ru/raUtC> (дата обращения: 09.10.2025).
6. Терентьева А. П., Кнутов М. С. Анализ применения авиационных систем при тушении ландшафтных пожаров // Актуальные вопросы пожаротушения : сборник материалов III Всероссийского круглого стола / Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. Иваново, 2024. С. 289–292. URL: <https://clck.ru/MFUVc> (дата обращения: 09.10.2025).
7. Лесной кодекс Российской Федерации : принят Государственной Думой 8 ноября 2006 г. : одобрен Советом Федерации 24 ноября 2006 г. // Гарант : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/12150845/> (дата обращения: 09.10.2025).
8. Организационно-правовые аспекты при тушении лесных пожаров / С. Ю. Карпов [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 4 (31). С. 71–84. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58733723> (дата обращения: 09.10.2025).
9. О возможности использования дополнительного навесного оборудования для подачи воды на передней части пожарного автомобиля / М. Н. Курносов [и др.] // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2024. № 4 (16) С. 6–13. URL: <https://clck.ru/YkEqC> (дата обращения: 09.10.2025).
10. Техничко-экономическая оценка эффективности применения воздушных судов при тушении лесных пожаров / В. Д. Пуздриченко [и др.] ; Ленинградский научно-исследовательский институт лесного хозяйства (ЛенНИИЛХ). Ленинград, 1989. 36 с.
11. Щетинский Е. А. Спутник руководителя тушения лесных пожаров. М., 2003. 95 с.
12. Терехнев В. В., Артемьев Н. С. Пожарная тактика. Кн. 12. Пожаротушение торфяников, лесов и лесоскладов. Екатеринбург, 2013. 216 с.
13. Водосливные устройства ВСУ-5, ВСУ-15 // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://clck.ru/OEnPd> (дата обращения: 08.10.2025).

REFERENCES

1. Forest Fires in Russia and Worldwide in 2020 // FORESTCOMPLEX.RU : portal about logging and woodworking. URL: <https://clck.ru/erFsE> (accessed 08.10.2025). Date of publication: 25.01.2021.
2. Go on fire // Kedr.media : website. URL: <https://clck.ru/jtYiW> (accessed 08.10.2025). Date of publication: 22.08.2024.
3. Handbook of the volunteer forest firefighter / A. A. Andreeva et al. 3rd ed., supplement. Moscow, 2017. 152 p.
4. Field guide of a forest firefighter. The Central base of aviation protection of forests of the Federal State Budgetary Institution "Avialesookhrana" / N. S. Frolov et al. 3rd edition. Moscow, 2018. 184 p.
5. On approval of the Rules for Extinguishing Forest Fires : Order No. 244 of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated April 1, 2022 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://clck.ru/raUtC> (accessed 09.10.2025).

6. Terentyeva A. P., Knutov M. S. Analysis of the use of aviation systems in extinguishing landscape fires // Actual issues of firefighting : collection of materials of the III All-Russian round table / Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Ivanovo, 2024. P. 289–292. URL: <https://clck.ru/MFUVc> (accessed 09.10.2025).
7. Forest Code of the Russian Federation : adopted by the State Duma on November 8, 2006 : approved by the Federation Council on November 24, 2006 // Garant : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/12150845/> (accessed 09.10.2025).
8. Organizational and legal aspects in extinguishing forest fires / S. Yu. Karpov et al. // Scientific and Analytical journal Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2023. No. 4 (31). P. 71–84. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58733723> (accessed 09.10.2025).
9. On the possibility of using additional attachments for water supply on the front of a fire truck / M. N. Kurnosov et al. // Current security issues in the technosphere. 2024. No. 4 (16). P. 6–13. URL: <https://clck.ru/YkEqC> (accessed 09.10.2025).
10. Technical and economic assessment of the effectiveness of aircraft use in extinguishing forest fires / V. D. Puzdrichenko et al. ; Leningrad Scientific Research Institute of Forestry. Leningrad, 1989. 36 p.
11. Shchetinsky E. A. Companion of the head of extinguishing forest fires. Moscow, 2003. 95 p.
12. Terebnev V. V., Artemyev N. S. Fire tactics. Book 12. Firefighting of peatlands, forests, and woodlands. Ekaterinburg, 2013. 216 p.
13. Drainage devices APU-5, APU-15 // Ministry of Emergency Situations of Russia : website. URL: <https://clck.ru/OEnPd> (accessed 08.10.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Степанов Олег Игоревич, канд. техн наук, старший преподаватель Института нефти и газа Югорского государственного университета (628012, Российская Федерация, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, д. 16); e-mail: oleg01911@yandex.ru

Стахеев Максим Валерьевич, старший преподаватель кафедры пожарно-прикладной подготовки Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); AuthorID: 846450; e-mail: docent-sport@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg I. Stepanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Institute of Oil and Gas, Yugorsk State University (16 Chekhov St., Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation); e-mail: oleg01911@yandex.ru

Maxim V. Stakheev, Senior Lecturer of the Department of Fire-Applied Training, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); AuthorID: 846450; e-mail: docent-sport@mail.ru

УДК 005.53:614.842

ОЦЕНКА ТАКТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЖАРНЫХ ОТДЕЛЕНИЙ ПРИ КРУПНЫХ ПОЖАРАХ

Григорьев Алексей Николаевич, Денисов Алексей Николаевич, Захаревский Виктор Борисович,
Новиков Александр Михайлович

Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе представлен оценочный критерий, характеризующий степень реализации тактического потенциала подразделений пожарной охраны при ликвидации крупных и затяжных пожаров в зданиях различного функционального назначения. Данный критерий позволяет оценить готовность подразделений успешно решать тактические задачи по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ. Кроме того, проведен анализ внешних ограничивающих факторов, определяющих оперативную обстановку на месте пожара и оказывающих влияние на результативность боевых действий.

В статье представлены результаты комплексного анализа реализации тактического потенциала пожарных подразделений. В его рамках исследована система управления при тушении крупных пожаров в зданиях, выполнен синтез системы управления ресурсами пожарно-спасательного гарнизона в аналогичных условиях, а также выявлены сущностные и специфические характеристики модели управленческой деятельности руководителя тушения пожара. Кроме того, предложена расчетно-аналитическая зависимость, позволяющая обосновать тактический потенциал подразделений при организации и ведении боевых действий по тушению крупных пожаров в зданиях.

Предлагаемый подход, по мнению авторов, позволит обеспечить решение задачи повышения эффективности функционирования подразделений пожарной охраны на основе исследований системных связей и закономерностей ведения боевых действий при тушении крупных пожаров в зданиях.

Ключевые слова: крупный пожар, боевые действия, тактический потенциал, ретроспективный анализ, критерий, эффективность, управление, ресурс

Для цитирования: Оценка тактического потенциала пожарных отделений при крупных пожарах / А. Н. Григорьев [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 130–137.

ASSESSMENT OF THE TACTICAL POTENTIAL OF FIRE DEPARTMENTS IN CASE OF MAJOR FIRES

Alexey N. Grigoriev, Alexey N. Denisov, Viktor B. Zakharevsky, Alexander M. Novicov
SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper presents an evaluation criterion that characterizes the degree of realization of the tactical potential of fire brigades in the elimination of large and protracted fires in buildings of various functional purposes. This criterion allows for the assessment of the readiness of units to successfully solve tactical tasks related to firefighting and emergency rescue operations. Additionally, the paper analyzes the external limiting factors that determine the operational situation at the fire site and influence the effectiveness of combat operations.

The article presents the results of a comprehensive analysis of the tactical potential implementation by fire departments. Within its framework, the system of management during the extinguishing of large fires in buildings is investigated, the synthesis of the system of management of resources of the fire and rescue garrison in similar conditions is performed, and the essential and specific characteristics of the model of managerial activity of the head of fire extinguishing are revealed. In addition, a calculation and analytical dependence is proposed, which allows to substantiate the tactical potential of units in the organization and conduct of combat operations for extinguishing large fires in buildings.

According to the authors, the proposed approach will allow solving the problem of improving the efficiency of fire brigades by studying the systemic relationships and patterns of combat operations during the suppression of large fires in buildings.

Keywords: major fire, combat operations, tactical potential, retrospective analysis, criterion, efficiency, management, resource

For citation: Assessment of the tactical potential of fire departments in case of major fires / A. N. Grigoriev // Technosphere safety. 2026. No. 2 (51). P. 130–137.

Введение

При организации боевых действий по тушению пожаров руководитель тушения пожара опирается на тактический потенциал своих подразделений. Тактический потенциал определяют техническая оснащенность оперативных отделений [1] и профессиональная подготовка личного состава [2]. Внешние факторы, характеризующие оперативную обстановку на конкретном пожаре, оказывают влияние на реализацию тактического потенциала [3].

Теоретические основы

Ликвидация крупных пожаров требует привлечения большого объема сил

и средств [4]. В этих условиях подразделения пожарной охраны вынуждены вести комплекс различных боевых действий [5]. Основой тактики здесь выступает отделение на основном пожарном автомобиле, действующее как первичное тактическое подразделение. Оно способно самостоятельно решать отдельные боевые задачи по тушению пожаров на части территории, на которой осуществляются боевые действия (боевая позиция). Боевая позиция на пожаре определяет место, вид и тактические приемы ведения боевых действий [6].

Для оценки степени реализации тактического потенциала отделений при создании боевых позиций формализовано отношение (1):

$$\Pi_B = \frac{\sum_{l=1}^{l=n} N_{\text{БП}}^l}{\sum_{l=2}^{l=n} N_{\text{отд.}}^l}, \quad (1)$$

где:

$N_{\text{БП}}$ — количество созданных боевых позиций на пожаре;

$N_{\text{отд.}}$ — количество отделений, привлеченных на тушение пожара.

Для сравнения показателей, характеризующих реализацию тактического потенциала на пожарах разного масштаба, можно использовать отношение (2):

$$\Pi_B = \frac{\sum_{l=1}^{l=n} N_{\text{БП}}^l}{\sum_{l=2}^{l=n} N_{\text{отд.}}^l} \cdot \frac{S_{\text{п}}}{100}, \quad (2)$$

где:

$S_{\text{п}}$ — площадь пожара, м^2 (из условия задачи авторы отбирали пожары $S_{\text{п}} > 100 \text{ м}^2$);

деление на 100 — это база масштабирования, определяющая нижнюю границу выборки (100 м^2).

Реализация тактического потенциала не является величиной постоянной, а во многом зависит от конкретных условий обстановки на пожаре и своевременности принятия решений руководителем тушения пожара [7].

Результаты и их обсуждение

Для исследования влияния различных факторов оперативной обстановки на реализацию тактического потенциала подразделений пожарной охраны использовали материал описаний крупных пожаров в зданиях за период с 2005 по 2020 г. База данных пожаров создавалась по описаниям крупных пожаров на основе действующих на тот момент нормативных документов — «Методические рекомендации по изучению пожаров» 2005-, 2007-, 2013-го годов. В исследуемый массив были отобраны пожары, площадь которых более 100 м^2 . Всего было изучено 517 описаний.

Анализ влияния пространственно-временных характеристик пожара на реализацию тактического потенциала отделений

показал, что данные параметры оказывают разнонаправленное действие. Увеличение площади горения сопровождается положительной динамикой реализации тактического потенциала (рис. 1). В то же время увеличение времени, затраченного на тушение, приводит к снижению этого показателя (рис. 2).

Значительная площадь горения закономерно осложняет оперативную обстановку. Подразделения, задействованные в ликвидации возгорания, часто действуют в условиях нехватки личного состава и техники. В такой ситуации руководитель тушения пожара вынужден определять способы наиболее полной реализации тактических возможностей имеющихся сил на решающем направлении. Снижение тактического потенциала при затяжных пожарах может объясняться как неоптимальным управлением подразделениями, так и объективной необходимостью их периодической замены в процессе тушения [8].

Выбор способов действий подразделений при тушении пожара в значительной степени зависит от функционального назначения объекта и сложившейся оперативной обста-

новки [9]. В рамках изучения этого вопроса общая выборка данных из описаний пожаров была структурирована на три группы:

- а) пожары в гражданских сооружениях;
- б) пожары в складских и торговых зданиях;
- с) пожары на промышленных объектах.

Для оценки влияния различных параметров оперативной обстановки на реализацию тактического потенциала применялись методы регрессионного анализа [10]. Анализ

показал, что количество пожарных машин, подающих воду на тушение, является значимым фактором, влияющим на величину тактического потенциала. При этом степень значимости отдельных параметров варьируется в зависимости от типа объекта. В частности, для промышленных предприятий ключевым фактором выступает скорость распространения пожара, тогда как для гражданских зданий — численность личного состава, привлекаемого к спасательным работам [11].

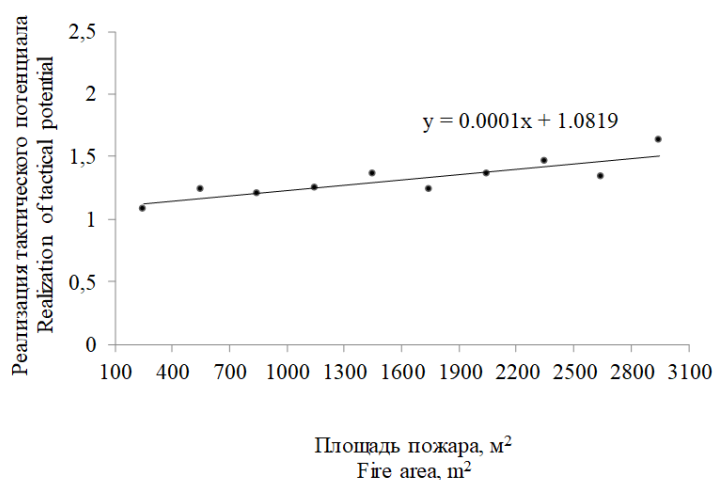


Рис. 1. Распределение средних значений критерия тактического потенциала и линии тренда по градациям площади пожара

Fig. 1. Distribution of the average values of the tactical potential criterion and the trend line by fire area gradation

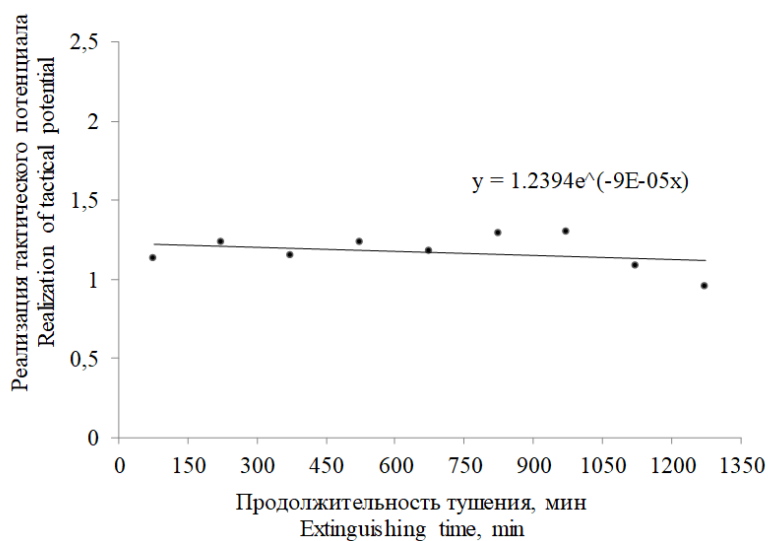


Рис. 2. Распределение средних значений критерия тактического потенциала и линии тренда по градациям длительности тушения

Fig. 2. Distribution of the average values of the tactical potential criterion and the trend line by the duration of fire suppression

Заключение

Авторы отмечают, что полученные в исследовании результаты соответствуют сложившейся практике тушения пожаров. Очевидно, что при ликвидации пожаров в гражданских зданиях решающим направлением ведения боевых действий является спасение людей, поэтому основные силы и средства сосредотачиваются на местах проведения спасательных работ, что объективно снижает возможность подразделений по созданию боевых позиций по подаче огнетушащих веществ на ограничение распространения пожара в здании. В то же время в зданиях промышленного назначения, которые характеризуются большими

площадями застройки и большой горючей нагрузкой, к моменту прибытия основных сил и средств пожарно-спасательного гарнизона пожары распространяются на значительные площади. Чтобы остановить распространение пожара, руководитель тушения пожара обязан максимально полно реализовать тактический потенциал прибывших на тушение пожара подразделений, создавая достаточное количество боевых позиций по подаче огнетушащих веществ с большим расходом. А расстановка требуемого числа пожарных машин на гидранты и открытые водоисточники создает оптимальные условия для решения основной боевой задачи на пожаре [12], что позволяет в итоге полностью реализовать тактический потенциал подразделений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Factors that determine the tactical potential of departments of fire-rescue garrison in conditions of extremely low temperatures / M. V. Aleshkov et al. // *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*. 2016. Vol. 25. No. 12. P. 61–68. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.61-68
2. Анализ нормативных заданий для управления профессиональной подготовкой пожарных на примере зарубежных стран / Р. М. Шипилов [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2020. № 4 (37). С. 43–55.
3. Влияние природно-климатических и географических особенностей субъектов Российской Федерации на деятельность подразделений пожарной охраны / О. В. Стрельцов [и др.] // *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024. Т. 8, № 1. С. 20–29. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-1-20-29
4. Чан М. Х. Х., Тараканов Д. В. Модель для разработки рационального порядка сосредоточения ресурсов пожарной охраны при тушении крупного пожара // *Технологии техносферной безопасности*. 2024. № 3 (105). С. 41–54. DOI: 10.25257/TTS.2024.3.105.41-54
5. Алгоритм ранжирования действий при выборе решающего направления тушения пожара в подземных сооружениях / С. Н. Аникин [и др.] // *Технологии техносферной безопасности*. 2024. № 1 (103). С. 42–61. DOI: 10.25257/TTS.2024.1.103.42-61
6. Математическое моделирование сравнительного анализа двух тактических приемов по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ подразделениями МЧС

России / Н. В. Каменецкая [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. № 10. URL: <https://clcl.i/owAVt> (дата обращения: 07.03.2026).

7. Щербakov А. В., Денисов А. Н. Тактический потенциал подразделений добровольной пожарной охраны в системе обеспечения пожарной безопасности // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 1 (95). С. 141–153. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.141-153

8. Шалявин Д. Н. Оценка реализации тактических задач пожарных подразделений в процессе выполнения повторных работ при тушении крупных пожаров // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 101–107.

9. Гущин В. А., Григорьев А. Н. Оценка тактического потенциала сил и средств Рыбинского местного пожарно-спасательного гарнизона при тушении пожаров на объектах энергетики (на примере Рыбинской гидроэлектростанции) // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : мат. IX Международной научно-практической конференции. М., 2024. С. 35–39.

10. Малютин О. С., Морозов В. В., Мироненко Р. В. Анализ параметров функционирования пожарно-спасательных подразделений в крупных городах России // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2024. № 4. С. 120–132. DOI: 10.25257/FE.2024.4.120-132

11. Воронов М. А. Управление пожарно-спасательными подразделениями при спасении людей из общественных зданий звеньями газодымозащитной службы // Инженерный вестник Дона. 2025. № 9 (129). С. 338–348.

12. Аксенов С. Г., Фаритова Л. Р. Оценка достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности: современные модели и методы // Наука и Образование. 2025. Т. 8, № 1. URL: <https://clcl.i/JAXgy> (дата обращения: 07.03.2026).

REFERENCES

1. Factors that determine the tactical potential of departments of fire-rescue garrison in conditions of extremely low temperatures / M. V. Aleshkov et al. // Pozharovzryvobezопасnost — Fire and Explosion Safety. 2016. Vol. 25. No. 12. P. 61–68. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.61-68

2. Analysis of Regulatory Tasks for Managing Firefighter Training: A Case Study of Foreign Countries / R. M. Shipilov et al. // Modern Problems of Civil Protection. 2020. No. 4 (37). P. 43–55.

3. The Influence of Natural and Climatic Features of the Russian Federation's Regions on the Activities of Fire Department Units / O. V. Streltsov et al. // Safety of Man-Made and Natural Systems. 2024. Vol. 8. No. 1. P. 20–29. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-1-20-29

4. Chan M. H. H., Tarakanov D. V. A model for developing a rational order for concentrating fire protection resources during the suppression of a large fire // Technologies of Technosphere Safety. 2024. No. 3 (105). P. 41–54. DOI: 10.25257/TTS.2024.3.105.41-54

5. Algorithm for ranking actions when choosing the decisive direction of fire extinguishing in underground structures / S. N. Anikin et al. // Technosphere safety technologies. 2024. No. 1 (103). P. 42–61. DOI: 10.25257/TTS.2024.1.103.42-61

7. Shcherbakov A. V., Denisov A. N. Tactical Potential of Volunteer Fire Department Units in the Fire Safety System // Technologies of Technosphere Safety. 2022. No. 1 (95). P. 141–153. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.141-153

8. Shalyavin D. N. Evaluation of the implementation of tactical tasks by fire departments in the process of performing repeated work in extinguishing large fires // Modern Problems of Civil Protection. 2024. No. 2 (51). P. 101–107.

9. Gushchin V. A., Grigoriev A. N. Assessment of the Tactical Potential of the Forces and Means of the Rybinsk Local Fire and Rescue Garrison in the Fight Against Fires at Energy Facilities (on the Example of the Rybinsk Hydroelectric Power Plant) // Fire Fighting: Problems, Technologies, Innovations : Materials of the IX International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2024. P. 35–39.

10. Malyutin O. S., Morozov V. V., Mironenko R. V. Analysis of the Parameters of the Functioning of Fire and Rescue Units in Large Russian Cities // Fires and Emergencies: Prevention and Elimination. 2024. No. 4. P. 120–132. DOI: 10.25257/FE.2024.4.120-132

11. Voronov V. A. Management of Fire and Rescue Units in the Rescue of People from Public Buildings by Gas and Smoke Protection Units // Engineering Bulletin of the Don. 2025. No. 9 (129). P. 338–348.

12. Aksenov S. G., Faritova L. R. Assessment of Water Supply Sufficiency in Extinguishing Major Fires at Petrochemical Industry Enterprises: Modern Models and Methods // Science and Education. 2025. Vol. 8. No. 1. URL: <https://clcl.i/JAXgy> (accessed 07.03.2026).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной тактики и службы УНК пожаротушения Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); ORCID: 0009-0005-2199-1434; SPIN-код: 1467-6690; e-mail: lcurina@mail.ru

Денисов Алексей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной тактики и службы УНК пожаротушения Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); РИНЦ ID: 231119; Scopus AuthorID: 57221203824; ResearcherID: AAA-7038-2021; ORCID: 0000-0003-2594-9389; e-mail: dan_aleks@mail.ru

Захаревский Виктор Борисович, старший преподаватель кафедры пожарной тактики и службы УНК пожаротушения Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); ORCID: 0009-0007-2393-557X; SPIN-код: 8036-6712; e-mail: zvb_ptis_agps@mail.ru

Новиков Александр Михайлович, канд. пед. наук, доцент кафедры пожарной тактики и службы УНК пожаротушения Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); SPIN-код: 2784-0758; AuthorID: 1123859; e-mail: A.Novikov@academygps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey N. Grigoriev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire Tactics and Service of the Fire Fighting Training and Research Complex of Fire Safety in Construction SFA

of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); ORCID: 0009-0005-2199-1434; SPIN-code: 1467-6690; e-mail: lcurina@mail.ru

Alexey N. Denisov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Tactics and Service of the Fire Fighting Training and Research Complex of Fire Safety in Construction SFA of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); ID RSCI: 231119; Scopus AuthorID: 57221203824; ResearcherID: AAA-7038-2021; ORCID: 0000-0003-2594-9389; e-mail: dan_aleks@mail.ru

Viktor B. Zakharevsky, Senior Lecturer of the Department of Fire Tactics and Service of the Fire Fighting Training and Research Complex of Fire Safety in Construction SFA of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); ORCID: 0009-0007-2393-557X; SPIN-code: 8036-6712; e-mail: zvb_ptis_agps@mail.ru

Alexander M. Novikov, Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor of the Department of Fire Tactics and Service of the Fire Fighting Training and Research Complex of Fire Safety in Construction SFA of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); SPIN-code: 2784-0758; AuthorID: 1123859; e-mail: A.Novikov@academygps.ru

УДК 005.334

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННАЯ КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Гарелина Светлана Александровна, Скрынников Алексей Юрьевич
Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема предотвращения техногенных чрезвычайных ситуаций на промышленных объектах в условиях ограниченных ресурсов и нормативно заданных требований. Предложена риск-ориентированная концепция системы предотвращения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, в рамках которой их предотвращение трактуется как задача управления целостной системой, включающей технический, организационный, ресурсный и нормативный компоненты. Введено системное представление структуры и функций системы предотвращения чрезвычайных ситуаций, а также сформулированы базовые принципы риск-ориентированной концепции, определяющие подходы к ее формированию и управлению. В качестве интегрального критерия эффективности функционирования системы используется техногенный риск, учитывающий вероятность возникновения аварийных событий как источников чрезвычайных ситуаций, время реагирования и тяжесть последствий. Разработана модель системы предотвращения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, формализующая выбор согласованных конфигураций технических и организационных решений при заданных ресурсных и нормативных ограничениях. Представленные результаты носят концептуальный характер и предназначены для использования в качестве методологической основы при дальнейшем развитии и реализации риск-ориентированных подходов к управлению системами предотвращения чрезвычайных ситуаций техногенного характера на промышленных объектах.

Ключевые слова: техногенные чрезвычайные ситуации, промышленные объекты, риск-ориентированная концепция, предотвращение чрезвычайных ситуаций, нормативные ограничения, организационные решения, силы и средства ликвидации чрезвычайных ситуаций, техногенный риск

Для цитирования: Гарелина С. А., Скрынников А. Ю. Риск-ориентированная концепция системы предотвращения чрезвычайных ситуаций техногенного характера на промышленных объектах // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 138–148.

RISK-ORIENTED CONCEPT OF THE SYSTEM FOR PREVENTING MAN-MADE EMERGENCIES AT INDUSTRIAL FACILITIES

Svetlana A. Garelina, Alexey Yu. Skrynnikov
Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article discusses the problem of preventing man-made emergencies at industrial facilities in conditions of limited resources and normatively specified requirements. A risk-oriented concept of the system for preventing man-made emergencies is proposed, within the framework of which their prevention is interpreted as the task of managing an integral system, including technical, organizational, resource and regulatory components. A systematic presentation of the structure and functions of the emergency prevention system has been introduced, as well as the basic principles of the risk-based concept have been formulated, which determine approaches to its formation and management. As an integral criterion for the effectiveness of the system's functioning, man-made risk is used, taking into account the probability of accidents as sources of emergencies, response time and severity of consequences. A model of the system for preventing man-made emergencies has been developed, which formalizes the choice of agreed configurations of technical and organizational solutions under the given resource and regulatory constraints. The presented results are conceptual in nature and are intended to be used as a methodological basis for the further development and implementation of risk-oriented approaches to the management of man-made emergency prevention systems at industrial facilities.

Keywords: man-made emergencies, industrial facilities, risk-oriented concept, prevention of emergency situations, regulatory constraints, organizational decisions, forces and means of emergency response, technogenic risk

For citation: Garelina S. A., Skrynnikov A. Yu. Risk-oriented concept of the system for preventing man-made emergencies at industrial facilities // *Technosphere safety*. 2026. No. 2 (51). P. 138–148.

Введение

Предотвращение чрезвычайных ситуаций (далее — ЧС) в инженерно-техническом аспекте традиционно соотносят с двумя взаимосвязанными направлениями. Первое направление основано на применении технических средств (далее — ТС), предназначенных для снижения вероятности возникновения аварий как источников ЧС и ограничения тяжести их последствий. Второе направление включает организационные мероприятия: планирование, распределение ресурсов, пространственно-временное размещение сил и средств ликвидации ЧС, маршрутизацию их доставки, а также регламентацию действий при угрозе или возникновении аварий и ЧС.

Такое разделение охватывает широкий спектр решений: от мониторинга и прогнозирования до реагирования и выполнения аварийно-спасательных работ (далее — АСР). Однако на практике развитие ТС и совершенствование организационных решений осуществляется в условиях ограниченности ресурсов. Это означает, что невозможно одновременно и равномерно усиливать все элементы обеспечения безопасности: наращивать парк ТС, расширять охват, повышать готовность сил ликвидации ЧС, совершенствовать логистику, развивать подготовку персонала промышленных объектов и поддерживать устойчивую работоспособность всей совокупности мер. В одних ситуациях наибольший эффект достигается за счет модернизации ТС и оснащения

ими сил ликвидации ЧС, в других — за счет изменения организационной схемы их применения, включая размещение, маршрутизацию, приоритезацию и регламентацию взаимодействия.

Практика эксплуатации промышленных объектов показывает, что изолированные решения, направленные на отдельные элементы инженерно-технического и организационного обеспечения безопасности, не приводят к устойчивому снижению техногенного риска. Техническое усиление без выстроенной организации размещения и применения ТС реализует свой потенциал лишь частично, тогда как организационное совершенствование при недостаточной оснащенности упирается в объективные функциональные ограничения. Это особенно наглядно проявляется при ликвидации крупных разливов нефти и нефтепродуктов (далее — ННП). Так, анализ аварии на буровой платформе Deerpwater Horizon в Мексиканском заливе показал, что, несмотря на привлечение масштабных сил и применение широкого спектра ТС локализации и очистки, значительная часть нефти продолжала распространяться, а экологический и экономический ущерб приобрел долгосрочный характер. Не менее серьезные последствия сопровождают и аварии с разливом ННП на промышленных и транспортных объектах, например, авария на нефтепроводе Keystone в США (более 14 000 баррелей сырой нефти) [1], неконтролируемый выброс нефти на месторождении «Башнефть-Полюс» (2 200 тонн сырой нефти) [2].

При ряде крупных разливов ННП на промышленных и транспортных объектах России суммарные утечки составляли тысячи тонн, а несвоевременное развертывание средств, их удаленное размещение и слож-

ность координации действий сил ликвидации ЧС не позволяли обеспечить достижение нормативных сроков локализации, что приводило к существенному росту ущерба и серьезным последствиям [2].

Таким образом, наращивание численности сил ликвидации ЧС и количества ТС само по себе не гарантирует снижения ущерба от ЧС техногенного характера.

В условиях наращивания численности сил ликвидации ЧС и количества ТС уменьшение последствий достигается не за счет экстенсивного увеличения ресурсов, а за счет либо внедрения более эффективных технических решений, либо изменения организационной логики системы, в частности, оптимизации размещения сил и ТС, оснащения непосредственно промышленных объектов ТС локализации и обеспечения их готовности к применению в нормативно установленные сроки.

Однако реализация таких мер неизбежно требует дополнительных финансовых, кадровых и логистических ресурсов, объем которых в реальных условиях строго ограничен. При этом все мероприятия по предотвращению и ликвидации ЧС техногенного характера осуществляются в рамках действующей нормативно-правовой базы, устанавливающей жесткие требования к срокам реагирования, составу сил и ТС, порядку их применения и взаимодействия. В результате возникает принципиальный вопрос: каким образом при ограниченных ресурсах и нормативно заданных условиях обеспечить максимальное снижение техногенного риска и минимизацию ущерба без экстенсивного наращивания сил и ТС ликвидации ЧС?

Следовательно, возникает необходимость в риск-ориентированной концепции предотвращения ЧС, которая рассматривает

технические и организационные решения не изолированно, а как взаимодополняющие элементы единой задачи — снижения техногенного риска на промышленных объектах при заданных ресурсных и нормативных ограничениях [3].

Понятие и структура системы предотвращения техногенных ЧС на промышленных объектах

В рамках настоящего исследования предотвращение техногенных ЧС на промышленных объектах рассматривается не как совокупность разрозненных мер, а как целостная управляемая система, функционирующая в условиях ограниченных ресурсов и нормативных требований.

Система предотвращения техногенных ЧС представляет собой управляемую совокупность взаимосвязанных компонентов, согласованное функционирование которых направлено на снижение техногенного риска и минимизацию последствий аварийных событий. Основной особенностью данной системы является наличие устойчивых связей между ее компонентами, обеспечивающих совместную реализацию технических и организационных решений в рамках единой задачи обеспечения безопасности.

В структуре системы предотвращения ЧС выделяются четыре взаимосвязанных компонента: технический, организационный, ресурсный и нормативный.

Технический компонент системы охватывает совокупность ТС предупреждения и ликвидации ЧС, включая системы наблюдения и контроля, средства мониторинга и диагностики, средства локализации аварий, а также специальные сооружения и установки. Технический компонент формирует

материальную основу системы и определяет потенциальный уровень охвата объектов и сценариев аварий.

При этом различные виды ТС по-разному интегрируются в организационный компонент. Для средств, требующих распределения в пространстве и времени (например, датчиков мониторинга, мобильных комплексов локализации аварий, подвижных лабораторий), организационные мероприятия имеют решающее значение, поскольку именно они обеспечивают необходимый охват территории, выбор мест размещения и маршрутизацию доставки к месту аварии или в зону ЧС. Для ТС, применяемых непосредственно при аварии (стационарные ТС локализации, оснащение аварийно-спасательных формирований), интеграция в организационный компонент в большей степени определяется регламентами применения и взаимодействия, без необходимости пространственного перераспределения.

Организационный компонент системы включает мероприятия по планированию, приоритезации, маршрутизации, координации сил и ТС, а также регламентации действий при угрозе или возникновении аварии как источника ЧС. Его основная функция заключается в обеспечении своевременного и согласованного применения ТС в пространстве и времени, что во многом определяет фактическую эффективность системы предотвращения ЧС.

Ресурсный компонент системы отражает доступный объем финансовых, кадровых, материальных и логистических возможностей, определяющих масштаб функционирования системы и устойчивость ее работы. Ограниченность ресурсов обуславливает необходимость выбора приоритетов и баланса между развитием технического

оснащения и совершенствованием организационных решений.

Нормативный компонент системы задает внешние и внутренние условия функционирования системы, включая требования законодательства, ведомственные регламенты, приказы, инструкции и методики. Он формирует обязательные ограничения по срокам реагирования, составу сил и ТС, порядку их применения и взаимодействия, в рамках которых осуществляется функционирование и развитие системы предотвращения ЧС.

Совместное и согласованное функционирование указанных компонентов формирует систему предотвращения техногенных ЧС как целостный объект управления и позволяет рассматривать задачу обеспечения безопасности не как набор отдельных мероприятий, а как задачу рационального распределения ограниченных ресурсов в условиях нормативных ограничений. Именно такая постановка задачи создает основу для формирования риск-ориентированной концепции системы предотвращения техногенных ЧС.

Базовые принципы риск-ориентированной концепции системы предотвращения техногенных ЧС

Риск-ориентированная концепция системы предотвращения техногенных ЧС направлена на формирование и управление системой предотвращения ЧС как целостным объектом управления, функционирующим в условиях ограниченных ресурсов и нормативных требований. В отличие от фрагментарных подходов, ориентированных на развитие отдельных ТС или организационных элементов, данная концепция рассматривает систему предотвращения ЧС как совокупность взаимосвязанных компонентов,

согласованное функционирование которых обеспечивает снижение техногенного риска.

1-й принцип «Техногенный риск как интегральный критерий эффективности системы»

В рамках риск-ориентированной концепции техногенный риск выступает в качестве основного критерия оценки эффективности функционирования системы предотвращения техногенных ЧС. Техногенный риск интегрирует вероятность возникновения аварийных событий и тяжесть их возможных последствий, что позволяет сопоставлять между собой различные конфигурации ТС и организационных решений в рамках единой системы.

Применение техногенного риска в качестве целевого показателя позволяет перейти от формальной оценки обеспеченности ТС или выполнения регламентов к оценке реального результата, достигаемого системой предотвращения ЧС, выраженного в снижении уровня риска.

2-й принцип «Временной фактор как системный параметр снижения последствий ЧС»

Для системы предотвращения техногенных ЧС основным параметром, определяющим эффективность ее функционирования, является время реагирования. Задержки на этапах обнаружения аварии, принятия решения и развертывания сил и ТС приводят к существенному росту последствий и снижению эффективности системы в целом.

Риск-ориентированная концепция рассматривает временной фактор как системную характеристику, зависящую не только от технического оснащения, но и от организационных решений, включая схемы размещения, маршрутизации, приоритезации и регламентации взаимодействия компонентов системы предотвращения техногенных ЧС.

3-й принцип «Ограниченность ресурсов как базовое условие управления системой»

Риск-ориентированная концепция исходит из признания ограниченности финансовых, кадровых, материальных и логистических ресурсов как объективного условия функционирования системы. В этих условиях управление системой предотвращения ЧС не может строиться на экстенсивном наращивании ресурсов.

Целью управления становится формирование такой конфигурации системы, которая обеспечивает максимальное снижение техногенного риска при заданных ресурсных ограничениях, что принципиально отличает риск-ориентированный подход от традиционных экстенсивных стратегий.

4-й принцип «Эффект насыщения и необходимость системного баланса решений»

В системе предотвращения техногенных ЧС зависимость между уровнем технической оснащенности и снижением техногенного риска носит нелинейный характер. По мере насыщения системы ТС дальнейшее увеличение их количества приводит к снижению предельной эффективности.

Риск-ориентированная концепция предполагает поиск системного баланса между развитием технического компонента и совершенствованием организационных решений. В определенный момент повышение эффективности системы предотвращения техногенных ЧС достигается преимущественно за счет оптимизации структуры и логики функционирования системы, а не за счет количественного увеличения ее элементов.

5-й принцип «Приоритезация элементов системы по уровню техногенного риска»

В условиях ограниченных ресурсов риск-ориентированная концепция предусматривает приоритезацию зон, объектов и элементов

промышленной инфраструктуры по уровню техногенного риска. Невозможность обеспечить одинаковый уровень защиты для всех контролируемых системой объектов и участков промышленной инфраструктуры требует концентрации ресурсов на наиболее опасных направлениях.

Приоритезация рассматривается как системный механизм управления, обеспечивающий целенаправленное распределение сил и ТС и повышение эффективности функционирования системы предотвращения ЧС в целом.

6-й принцип «Нормативные требования как системные ограничения»

Нормативно-правовые требования в рамках риск-ориентированной концепции рассматриваются как совокупность системных ограничений, определяющих допустимые рамки функционирования и развития системы предотвращения техногенных ЧС. Требования к срокам реагирования, составу сил и ТС, порядку их применения и взаимодействия формируют условия, внутри которых осуществляется управление системой предотвращения техногенных ЧС.

Таким образом, базовые принципы риск-ориентированной концепции системы предотвращения техногенных ЧС формируют методологическую основу управления данной системой как целостным объектом.

Взаимодействие компонентов системы предотвращения техногенных ЧС

В рамках риск-ориентированной концепции снижение техногенного риска достигается не за счет изолированного развития отдельных компонентов системы предотвращения техногенных ЧС, а за счет их

согласованного функционирования. Именно характер взаимодействия технического, организационного, ресурсного и нормативного компонентов определяет фактическую эффективность системы в условиях ограниченных ресурсов и нормативно заданных требований.

Технический компонент системы формирует потенциальные возможности по предупреждению и локализации аварийных событий, однако степень реализации этого потенциала определяется решениями организационного компонента, обеспечивающими пространственно-временную координацию их применения. В свою очередь, выбор и реализация организационных решений ограничиваются доступными ресурсами и нормативными требованиями, задающими допустимые рамки функционирования системы предотвращения техногенных ЧС.

Ресурсный компонент системы выполняет функцию согласования и балансировки, определяя допустимые конфигурации системы предотвращения техногенных ЧС и предотвращая неэффективное перераспределение сил и ТС.

Нормативный компонент системы, в свою очередь, формирует обязательные условия взаимодействия компонентов, обеспечивая правомерность, воспроизводимость и сопоставимость принимаемых управленческих решений.

Таким образом, система предотвращения техногенных ЧС в рамках риск-ориентированной концепции функционирует как единый управляемый объект, в котором снижение техногенного риска обеспечивается за счет согласования технических, организационных, ресурсных и нормативных решений, а не их автономного развития.

Модель системы предотвращения техногенных ЧС, реализующая риск-ориентированную концепцию

Модель отражает системный характер предотвращения техногенных ЧС и позволяет описывать взаимосвязь между конфигурацией технического и организационного компонентов системы, временем реагирования, вероятностью развития аварийных событий и величиной возможного ущерба.

Постановка задачи

Имеется:

Z_T — множество возможных конфигураций технического компонента системы;

Z_O — множество допустимых конфигураций организационного компонента системы;

σ — совокупность нормативных требований и регламентов, определяющих допустимое множество конфигураций системы, определяющих допустимое множество решений $\Omega(\sigma) \subseteq Z_T \cdot Z_O$;

B — доступный объем ресурсов системы (финансовых, кадровых, материальных и логистических);

$G_T(Z_T)$ и $G_O(Z_O)$ — функции ресурсопотребления, характеризующие затраты на реализацию соответствующих конфигураций технического и организационного компонентов.

Требуется определить такие конфигурации $z_T \in Z_T$ — конкретную конфигурацию ТС;

$z_O \in Z_O$, при которых согласованное функционирование системы предотвращения техногенных ЧС обеспечивает минимальный уровень техногенного риска.

Целевая функция модели

В качестве критерия эффективности функционирования системы предотвращения техногенных ЧС используется техногенный риск, определяемый выражением

$$R(z_r, z_o) = P(z_r, z_o; \sigma) U(t(z_r, z_o; \sigma)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где:

$P(z_r, z_o; \sigma)$ — вероятность возникновения и развития техногенной ЧС при заданной конфигурации системы;

$t = t(z_r, z_o; \sigma)$ — время реагирования системы предотвращения ЧС, определяемое согласованной работой ее технического и организационного компонентов;

$U(t)$ — функция ущерба от развития последствий ЧС, зависящая от времени реагирования. В простейшем виде она может быть представлена в экспоненциальной форме

$$U(t) = U_o e^{kt}, \quad (2)$$

где:

U_o — исходный уровень потерь;

k — коэффициент интенсивности развития процесса.

Ограничения модели

$$G_r(z_r) + G_o(z_o) \leq B, (z_r, z_o) \in \Omega(\sigma), \quad (3)$$

где нормативный компонент σ задает обязательные рамки функционирования системы предотвращения техногенных ЧС.

Представленная модель реализует положения риск-ориентированной концепции и позволяет рассматривать систему предотвращения техногенных ЧС как управляемый объект, для которого выбор конфигурации технических и организационных решений осуществляется на основе критерия минимизации техногенного риска.

Модель задает общую формализованную постановку задачи управления системой предотвращения техногенных ЧС и служит основой для последующей разработки прикладных методик оценки параметров техногенного риска, алгоритмов распределения ресурсов и процедур принятия управленческих решений в условиях нормативных ограничений и неопределенности.

Научная новизна риск-ориентированной концепции заключается во введении системного подхода к предотвращению ЧС, при котором объектом управления является целостная система, а не отдельные технические или организационные мероприятия.

В отличие от существующих подходов, ориентированных на развитие отдельных элементов системы предотвращения ЧС либо на формальное выполнение нормативных требований [3], данная риск-ориентированная концепция вводит техногенный риск в качестве основного критерия эффективности функционирования системы предотвращения ЧС и обеспечивает согласование технических, организационных, ресурсных и нормативных решений в рамках единой управленческой задачи. Это позволяет перейти от экстенсивных стратегий наращивания сил и ТС [4] к обоснованному выбору конфигураций системы предотвращения ЧС, обеспечивающих максимальное снижение техногенного риска при заданных ресурсных и нормативных ограничениях.

Теоретическая значимость риск-ориентированной концепции состоит в развитии системного и риск-ориентированного подходов к исследованию и управлению безопасностью на промышленных объектах. Разработанная в рамках концепции модель создает теоретическую основу для дальнейших исследований в области анализа

эффективности и оптимизации параметров систем предотвращения ЧС.

Практическая значимость риск-ориентированной концепции заключается в возможности ее использования при обосновании управленческих решений в сфере предотвращения техногенных ЧС на промышленных объектах. Концепция позволяет формировать приоритеты развития систем предотвращения ЧС, обосновывать размещение и применение ТС, а также разрабатывать организационные схемы реагирования на ЧС с учетом ограниченных ресурсов и нормативно заданных сроков.

Полученные результаты могут служить методологической основой для разработки прикладных методик и алгоритмов реализации риск-ориентированного управления системами предотвращения ЧС.

Выводы

Показано, что существующие подходы к предотвращению техногенных ЧС на промышленных объектах, основанные на разрозненном развитии ТС либо организационных мероприятий, не обеспечивают устойчивого снижения техногенного риска в условиях ограниченных ресурсов и жестких нормативных требований.

Предотвращение техногенных ЧС обосновано как задача управления целостной системой, включающей технический, организационный, ресурсный и нормативный компоненты, функционально взаимосвязанные и ориентированные на достижение общего результата — снижение техногенного риска.

Сформирована риск-ориентированная концепция системы предотвращения техно-

генных ЧС, в рамках которой техногенный риск введен в качестве интегрального критерия эффективности функционирования системы, позволяющего сопоставлять различные конфигурации ТС и организационных решений.

Обосновано, что эффективность системы предотвращения техногенных ЧС в решающей степени определяется не объемом задействованных сил и ТС, а согласованностью их применения во времени и пространстве, что подчеркивает системную роль организационных решений при ограниченных ресурсах.

Выделены и сформулированы базовые принципы риск-ориентированной концепции системы предотвращения техногенных ЧС, включая учет временного фактора, эффект насыщения ТС, приоритезацию объектов и зон по уровню техногенного риска, а также рассмотрение нормативных требований как системных ограничений управления.

Разработана модель системы предотвращения техногенных ЧС, реализующая положения риск-ориентированной концепции и формализующая задачу выбора конфигурации технического и организационного компонентов на основе критерия минимизации техногенного риска при ресурсных и нормативных ограничениях.

Показано, что предложенная риск-ориентированная концепция и модель создают методологическую основу для перехода от экстенсивных стратегий развития систем предотвращения ЧС к обоснованному управлению их параметрами, обеспечивающему повышение эффективности использования ограниченных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Keystone pipeline shut after spilling 9,000 barrels of oil in North Dakota. URL: <https://clck.ru/3SKtJv> (дата обращения: 11.02.2026).
2. Хронология крупнейших случаев разлива нефти и нефтепродуктов в России // ТАСС : информационное агентство. URL: <https://clck.ru/3SKtP4> (дата обращения: 11.02.2026). Дата публикации: 03.06.2020.
3. Фалеев М. И. Управление рисками техногенных катастроф и стихийных бедствий (пособие для руководителей организаций) : монография. М., 2016. 270 с.
4. Матвеев В. Н., Бокарев А. И., Смирнов В. Д. Организация и ведение аварийно-спасательных работ : учеб. пособие. Омск, 2015. 184 с.

REFERENCES

1. Keystone pipeline shut after spilling 9,000 barrels of oil in North Dakota. URL: <https://clck.ru/3SKtJv> (accessed 11.02.2026).
2. Chronology of the largest cases of oil and oil products spills in Russia // TASS : Russian news agency. URL: <https://clck.ru/3SKtP4> (accessed 11.02.2026). Date of publication: 03.06.2020.
3. Faleev M. I. Risk Management of Technogenic Disasters and Natural Disasters (Manual for Leaders of Organizations) : monograph. Moscow, 2016. 270 p.
4. Matveev V. N., Bokarev A. I., Smirnov V. D. Organization and conduct of emergency rescue operations. Omsk, 2015. 184 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарелина Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 8591-0495; AuthorID: 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Скрынников Алексей Юрьевич, старший преподаватель учебно-методического отдела Института развития МЧС России Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 7465-2434; AuthorID: 865332; e-mail: skrynnikov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana A. Garelina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 8591-0495; AuthorID 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Alexey Yu. Skrynnikov, Senior Lecturer of the Educational and Methodological Department of the Institute of Development, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 7465-2434; AuthorID: 865332; e-mail: skrynnikov@yandex.ru

УДК 004.94:355.244

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОРЯДКА ЭВАКУАЦИИ ИЗ ЗОНЫ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

Горлов Виталий Викторович, Меньших Валерий Владимирович, Никитенко Виталий Алексеевич
Воронежский институт МВД России, г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлена математическая модель генетического алгоритма, предназначенного для решения задачи оптимизации порядка эвакуации объектов из зоны чрезвычайной ситуации. Разработанный алгоритм позволяет минимизировать общее время эвакуации, которое складывается из трех ключевых составляющих: времени движения объектов к пунктам специальной обработки, времени ожидания в очередях перед этими пунктами, а также времени проведения самой специальной обработки. Предложенная модель формализует рассматриваемую задачу как многостадийную проблему составления расписаний, что относит ее к классу NP-трудных задач, для которых не существует эффективного точного решения за полиномиальное время. Для решения поставленной задачи разработан генетический алгоритм, включающий модифицированные операторы скрещивания и мутации. Эти операторы гарантируют генерацию только допустимых решений, исключая дублирование объектов в хромосомах и обеспечивая соблюдение всех ограничений модели. В работе также приведено подробное описание основной структуры генетического алгоритма, включая принципы кодирования решений, функцию приспособленности, стратегии отбора и критерии остановки. Предложенный подход может быть использован при планировании эвакуационных мероприятий в условиях ограниченных ресурсов и неопределенности внешней среды.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, задача оптимизации, пункт специальной обработки, эвакуация, генетический алгоритм

Для цитирования: Горлов В. В., Меньших В. В., Никитенко В. А. Модель и алгоритм принятия решений по определению порядка эвакуации из зоны чрезвычайной ситуации // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 149–159.

MODEL AND ALGORITHM FOR DECISION-MAKING IN DETERMINING THE EVACUATION ORDER FROM AN EMERGENCY ZONE

Vitaly V. Gorlov, Valery V. Menshikh, Vitaly A. Nikitenko
Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Voronezh, Russian Federation

Abstract. The article discusses the problem of preventing man-made emergencies at industrial facilities in conditions of limited resources and normatively specified requirements. A risk-

oriented concept of the system for preventing man-made emergencies is proposed, within the framework of which their prevention is interpreted as the task of managing an integral system, including technical, organizational, resource and regulatory components. A systematic presentation of the structure and functions of the emergency prevention system has been introduced, as well as the basic principles of the risk-based concept have been formulated, which determine approaches to its formation and management. As an integral criterion for the effectiveness of the system's functioning, man-made risk is used, taking into account the probability of accidents as sources of emergencies, response time and severity of consequences. A model of the system for preventing man-made emergencies has been developed, which formalizes the choice of agreed configurations of technical and organizational solutions under the given resource and regulatory constraints. The presented results are conceptual in nature and are intended to be used as a methodological basis for the further development and implementation of risk-oriented approaches to the management of man-made emergency prevention systems at industrial facilities.

Keywords: emergency situation, optimization problem, special decontamination station, evacuation, genetic algorithm

For citation: Gorlov V. V., Menshikh V. V., Nikitenko V. A. Model and algorithm for decision-making in determining the evacuation order from an emergency zone // Technosphere safety. 2026. No. 2 (51). P. 149–159.

Введение

Оперативная и эффективная эвакуация населения и материальных ценностей (далее — объекты эвакуации) из зоны чрезвычайной ситуации является критически важной задачей гражданской обороны и защиты населения [1, 2]. Один из ключевых элементов этого процесса — организация специальной обработки объектов эвакуации. В условиях дефицита времени и ресурсов оптимальная организация порядка эвакуации, в т. ч. маршрутов движения объектов эвакуации к пунктам специальной обработки (далее — ПуСО), минимизирующая общее время эвакуации, позволяет существенно уменьшить количество пострадавших и размер материального ущерба [3].

Задачу определения порядка эвакуации можно представить как задачу составления расписания движения объектов эвакуации.

Данная задача относится к классу сложных многостадийных задач оптимизации, требующих применения адекватных и эффективных математических методов.

Существует множество работ, связанных с эвакуацией из зоны ЧС [4–11], однако в данных работах не определяется порядок эвакуации тех или иных объектов. В связи с этим необходимо разработать модель и алгоритм, которые позволят определять порядок эвакуации объектов, в т. ч. распределение их по ПуСО.

Классические подходы теории расписаний, такие как точные методы (ветвей и границ, динамическое программирование и др.) [12–14], для задач подобного типа часто оказываются неприменимыми на практике из-за экспоненциального роста вычислительной сложности в связи с увеличением размерности задачи. Поэтому в последнее время активно развивается применение метаэвристических алгоритмов, демонстрирующих хорошее

соотношение качества решения и вычислительных затрат [15–21]. Среди них генетические алгоритмы заняли прочные позиции благодаря своей универсальности и способности находить близкие к оптимальным решения в сложных многоэкстремальных пространствах поиска. Эффективность генетических алгоритмов для решения задач теории расписаний и распределения ресурсов подтверждена в ряде работ [14, 19]. Однако прямое применение стандартных схем генетических алгоритмов для специфической задачи эвакуации в условиях ЧС, характеризующейся необходимостью учета времени движения, ожидания в очередях и проведения специальной обработки, требует разработки специализированной модели и модификации генетических операторов.

Таким образом, целью данной работы является разработка математической модели и эффективного численного метода на основе генетических алгоритмов для решения задачи составления порядка эвакуации из зоны ЧС, обеспечивающего минимизацию общего времени эвакуации при заданных ограничениях.

Новизна исследования заключается в разработке операторов скрещивания и мутации, которые учитывают специфику задачи и гарантируют формирование допустимых решений-потомков, исключая дублирование объектов в хромосоме.

Постановка задачи определения порядка эвакуации

При возникновении ЧС необходимо за отведенное время провести эвакуацию

материальных ценностей, людей из зоны ЧС и провести их специальную обработку. Для оптимального распределения объектов эвакуации по ПуСО можно использовать расписание, согласно которому они будут выдвигаться в установленные ПуСО.

Данная задача является задачей оптимизации функционирования многостадийных систем и может решаться с помощью известных методов теории расписаний [12]. Однако данный метод имеет экспоненциальную временную сложность.

Поэтому предлагается использовать генетический алгоритм, который для задач оптимизации имеет полиномиальную временную сложность.

Введем следующие обозначения:

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_{|O|}\}$ — множество предметов эвакуации;

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_{|M|}\}$ — множество ПуСО;

$\tau_{i,j}$ — время обработки o_i на m_j ПуСО;

$t_{i,j}$ — время движения o_i до m_j ПуСО;

$$x_{i,j,k} = \begin{cases} 1, & \text{если } o_i \text{ назначен на } m_j \text{ ПуСО} \\ & \text{и находится на } k\text{-й позиции} \\ & \text{в очереди;} \\ 0, & \text{если иначе;} \end{cases}$$

$X = \{x_{i,j,k} | i=1, |O|, j=1, |M|, k=1, |O|\}$ — распределение объектов по ПуСО и позициям в очереди;

$d_i(X)$ — время эвакуации объекта o_i при распределении X ;

$T_{total}(X)$ — минимальное время полной эвакуации всех объектов при распределении X .

В данных обозначениях задача оптимизации порядка эвакуации имеет вид:

$$T_{total} = \min_X T_{total}(X). \quad (1)$$

При этом должны быть выполнены следующие ограничения:

- каждый объект должен быть назначен ровно на один ПуСО и иметь одну позицию в очереди;

$$\forall i \sum_{k=1}^{|O|} x_{i,j,k} = 1; \quad (2)$$

– на каждой позиции k каждого ПуСО j может находиться не более одного объекта:

$$\forall j, k \sum_{i=1}^{|O|} x_{i,j,k} \leq 1. \quad (3)$$

Описание генетического алгоритма решения задачи

Все реализации генетических алгоритмов отличаются [17–19]:

- описанием генов, хромосом и особей;
- правилом формирования начальной популяции;
- заданием функции приспособленности особей;
- операцией селекции;
- описанием способа скрещивания особей (кроссовера);
- способом мутации особей;
- правилом остановки алгоритма.

Опишем данные особенного разработанного генетического алгоритма.

Ген — параметр $x_{i,j,k}$.

Хромосома представляет собой $\{x_{i_{o,j},k}\}$ для фиксированного объекта o_{ij} .

Особь — вариант распределения X .

Начальная популяция $X_1, \dots, X_N$ формируется случайным образом.

Функция приспособленности $F(X) = T_{total}(X)$, где $T_{total}(X)$ вычисляется следующим образом: для каждого распределения объектов эвакуации o_i по m_j ПуСО и постановки на k -ю позиции в очереди находится минимальное время эвакуации o_i объекта d_i (например, используя диаграммы Ганта [19]). Далее вычисляется

$$T_{total}(X) = \max_{i \in O} d_i(X).$$

Скрещивание происходит между всеми парами популяции по следующему закону

$$X_a \otimes X_b = (x_{i,j,k}^a \otimes x_{i,j,k}^b),$$

$$\text{где } x_{i,j,k}^a \otimes x_{i,j,k}^b = \begin{cases} x_{i,j,k}^a, & \text{если } x_{i,j,k}^a = x_{i,j,k}^b; \\ x_{i,j,k}^a \vee x_{i,j,k}^b, & \text{если } x_{i,j,k}^a \neq x_{i,j,k}^b \end{cases}$$

(операция $\vee$ — равновероятный выбор $x_{i,j,k}^a$ или $x_{i,j,k}^b$).

Обозначим полученную популяцию $Y = \{X_1, \dots, X_N, X_1 \otimes X_2, \dots, X_{N-1} \otimes X_N\}$, $|Y| = N + C_N^2$, где C_N^1 — число сочетаний без повторений.

Мутация представляет собой случайное изменение генов в хромосоме.

Отбор N особей, имеющих минимальное значение $T_{total}(X)$, а также удовлетворяющих условиям (2)–(3).

Остановка алгоритма осуществляется, если лучшее решение в популяции остается

неизменным в течение заданного числа поколений.

Численный пример

При аварии на радиационно-опасном объекте необходимо разработать порядок экстренной эвакуации из предполагаемой зоны ЧС. В зоне ЧС находятся 20 объектов эвакуации. Для организации их специальной обработки может быть развернуто три ПуСО. Время движения объекта до ПуСО и время проведения специальной обработки объекта на ПуСО приведены в таблице.

Таблица
Исходные данные задачи
Table
Problem data

Объекты o_i	ПуСО		
	1	2	3
	t_{ij}/τ_{ij}		
1	4,37/4,33	9,56/3,63	7,59/6,97
2	6,39/4,14	2,40/3,69	2,40/5,26
3	1,52/2,85	8,80/6,81	6,41/2,45
4	7,37/7,92	1,19/6,63	9,73/3,19
5	8,49/2,03	2,91/6,89	2,64/6,24
6	2,65/6,37	3,74/6,63	5,72/2,44
7	4,89/4,15	3,62/2,70	6,51/7,18
8	2,26/5,74	3,63/3,99	4,30/2,38
9	5,10/3,87	8,07/3,95	2,80/6,38
10	5,63/5,83	6,33/7,32	1,42/4,83
11	6,47/2,72	2,53/6,28	1,59/6,56
12	9,54/5,37	9,96/6,63	8,28/4,96
13	3,74/5,14	1,88/4,57	7,16/2,15
14	4,96/2,65	2,10/2,19	5,46/5,82
15	1,31/3,89	9,18/5,05	3,33/7,45
16	6,96/3,50	3,81/4,46	5,68/6,53
17	5,92/3,37	2,66/2,46	9,73/3,74
18	7,98/2,97	9,46/7,58	9,05/6,85
19	6,38/5,80	9,30/7,23	1,80/6,82
20	2,76/3,12	1,41/7,36	3,93/5,24

Результаты решения оптимизационной задачи (1)–(3) приведены на рис. 1–4.

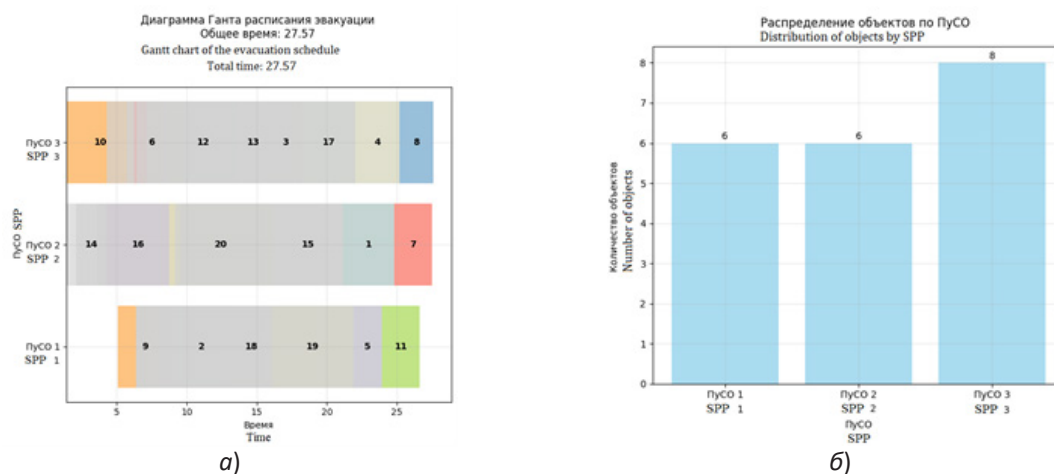


Рис. 1. Результаты решения оптимизационной задачи:

а — диаграмма Ганта расписания эвакуации; б — распределение объектов по ПуСО

Fig. 1. Results of solving the optimization problem:

а — Gantt chart of the evacuation schedule; б — distribution of objects by special processing points (SPP)

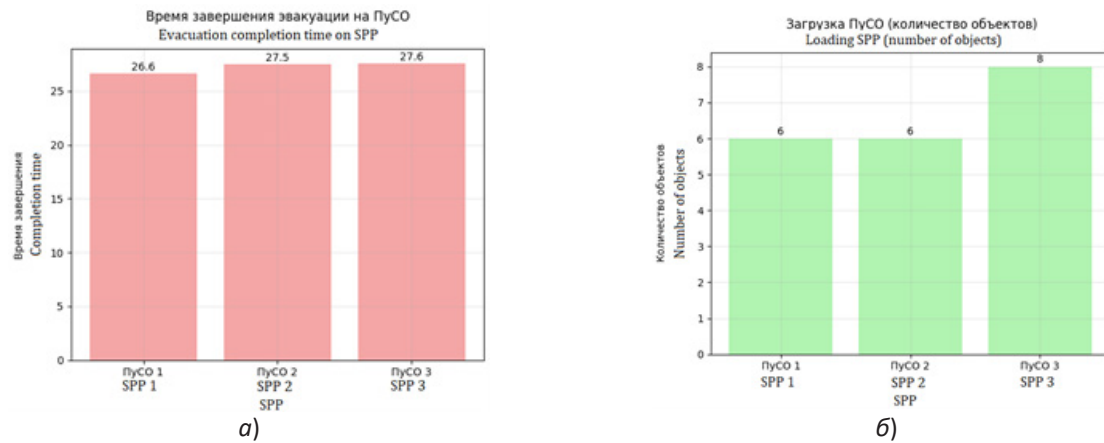


Рис. 2. Результаты решения оптимизационной задачи:

а — время завершения эвакуации; б — загрузка ПуСО

Fig. 2. Results of solving the optimization problem:

а — evacuation completion time; б — utilization of special processing points

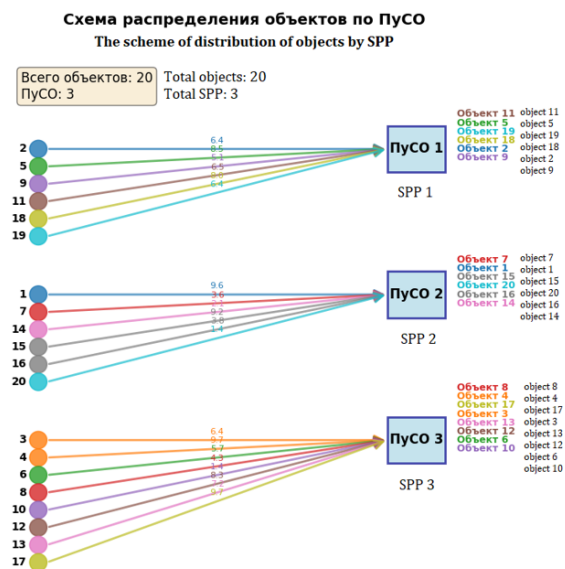


Рис. 3. Распределение объектов по ПуСО

Fig. 3. Distribution of objects by SPP

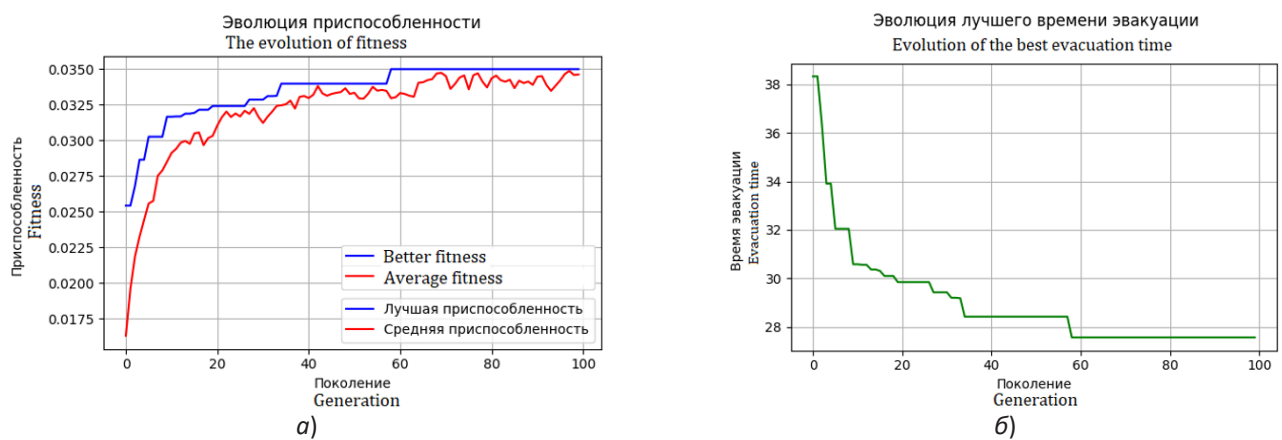


Рис. 4. Сходимость генетического алгоритма:

а — эволюция приспособленности; б — лучшее время эвакуации

Fig. 4. Convergence of the genetic algorithm:

а — evolution of adaptability; б — the best evacuation time

Анализ решения

Проведенный численный эксперимент для задачи с 20 объектами и 3 ПуСО показал высокую эффективность разработанного генетического алгоритма. Время эвакуации начального решения составило 38,32 у. е., а лучшее решение 27,57 у. е. (улучшение на 28 %).

Визуальный анализ диаграммы Ганта (рис. 1) позволяет сделать вывод о сбалансированном распределении объектов по ПуСО. Алгоритм распределил объекты не на случайные пункты, а сформировал очереди, которые минимизируют простои и общее время эвакуации.

График загрузки ПуСО (рис. 2) подтверждает этот вывод. Несмотря на разное количество объектов, назначенных на каждый пункт (рис. 3), общее время работы всех трех ПуСО оказалось сопоставимым.

На рис. 4 представлена динамика изменения функции приспособленности популяции и лучшего найденного значения в процессе эволюции. График демонстрирует характерное для генетического алгоритма поведение: быстрое улучшение решения на начальных этапах (примерно до 50-го поколения) с последующей стабилизацией и выходом на плато.

Таким образом, анализ результатов подтверждает, что предложенная модель и генетический алгоритм успешно справляются с поставленной оптимизационной задачей определения порядка эвакуации объектов за минимальное время с учетом всех установленных ограничений.

Выводы

В работе была разработана математическая модель и численный метод для решения задачи определения порядка эвакуации объектов из зоны ЧС. Модель формализует ключевые параметры процесса: время движения до ПуСО, время ожидания в очереди и время специальной обработки, с целевой функцией в виде минимизации общего времени эвакуации.

Для решения сформулированной NP-трудной оптимизационной задачи был предложен генетический алгоритм со специализированными операторами кроссовера и мутации, обеспечивающими генерацию допустимых решений.

Проведенный численный эксперимент с реалистичными данными показал, что разработанный алгоритм обладает высокой эффективностью и быстрой сходимостью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьян А. А., Рыбаков А. В. О результатах анализа проблемной ситуации в области защиты населения в чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте // Техносферная безопасность. 2025. № 2 (47). С. 146–153.
2. Зотов Е. И. Проблемы и возможные направления их решения в области защиты населения при чрезвычайных ситуациях, вызванных авариями на объектах электроэнергетики // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 106–114. EDN IIEBUK.

3. Ямалов И. У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. М., 2007. 288 с.
4. Асламова В. С., Темникова Е. А., Гозбенко В. Е. Автоматизация расчета кратчайшего пути эвакуации населения на транспортной сети с циклом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4 (56). С. 138–144. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).138-144
5. Воропаев Н. П., Савчук О. Н., Коротеев Д. Р. Модель определения рациональных маршрутов эвакуации населения, материальных и культурных ценностей при возникновении чрезвычайных ситуаций // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2020. № 1. С. 51–59.
6. Горлов В. В., Меньших В. В., Никитенко В. А. Модель и алгоритм оптимизации решений по эвакуации при чрезвычайных ситуациях // Техносферная безопасность. 2025. № 2 (47). С. 136–145.
7. Горлов В. В. Описательная модель оптимизации системы оповещения о чрезвычайных ситуациях в Российской Федерации на основе методов математического моделирования // Моделирование систем критического применения. 2025. № 1. С. 47–55.
8. Добрякова Е. И. Обоснование целесообразности применения навигационных систем при вынужденной эвакуации // Научный вестник НИИ «Респиратор». 2025. № 2 (62). С. 84–93.
9. Меньших В. В., Подольских А. В. Модель и алгоритм оптимизации процесса организации подготовки групп специалистов к действиям в кризисных ситуациях // Моделирование систем критического применения. 2025. № 1. С. 22–32.
10. Меньших В. В., Суворин Е. В., Никитенко В. А. Структурно-параметрическая модель мониторинга контролируемых объектов // Вестник Воронежского института МВД России. 2023. № 3. С. 88–95.
11. Петергерин К. С., Шейко Е. А. Алгоритм расчета путей эвакуации населения при ЧС // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2021. № 2 (9). С. 273–279.
12. Танаев В. С., Сотсков Ю. Н., Струсевиц В. А. Теория расписаний. Многостадийные системы. М., 1989. 327 с.
13. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой : учебное пособие. М., 2017. 446 с.
14. Меньших В. В., Никулина Е. Ю. Оптимизация временных характеристик информационных систем : монография. Воронеж, 2011. 127 с.
15. Оценка практической эффективности обслуживания потока заявок в стандартных и экстренных ситуациях при помощи генетического алгоритма / Г. Н. Лебедев [и др.] // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 36. С. 48–59.
16. Оптимизация распределения ограниченных водных ресурсов методами эволюционно-генетического программирования / Л. В. Кирейчева [и др.] // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 2 (398). С. 233–238.
17. Меньших В. В., Лихобаба А. В. Моделирование процессов оптимизации выбора программ подготовки и переподготовки специалистов с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. № 1 (23). С. 42–48.

18. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы. М., 2010. 368 с.
19. Menshikh V. V., Podolskikh A. V. A Model and a Numerical Method for Optimizing the Choice of a Training Trajectory for Heterogeneous Groups of Specialists // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 32–41.
20. Никитенко А. Н. Компьютерное моделирование «мягкого» управления в мультиагентных системах // Моделирование систем критического применения. 2025. № 2. С. 27–34.
21. Управление проектами : учебное пособие / И. И. Мазур [и др.]. М., 2010. 960 с.

REFERENCES

1. Grigoryan A. A., Rybakov A. V. On the results of analyzing the problem situation in the field of public protection in emergencies at railway transport // Technosphere Safety. 2025. No. 2 (47). P. 146–153.
2. Zotov E. I. Problems and possible solutions in the field of public protection during emergencies caused by accidents at electric power facilities // Technosphere Safety. 2024. No. 4 (45). P. 106–114. EDN IIEBUK.
3. Yamalov I. U. Modeling of management and decision-making processes in emergency situations. Moscow, 2007. 288 p.
4. Aslamova V. S., Temnikova E. A., Gozbenko V. E. Automation of calculating the shortest evacuation route for the population on a transport network with a cycle // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2017. No. 4 (56). P. 138–144. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).138-144
5. Voropaev N. P., Savchuk O. N., Koroteev D. R. A model for determining rational evacuation routes for the population, material and cultural assets in emergency situations // Bulletin of the Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2020. No. 1. P. 51–59.
6. Gorlov V. V., Menshikh V. V., Nikitenko V. A. A model and algorithm for optimizing evacuation decisions during emergency situations // Technosphere Safety. 2025. No. 2 (47). P. 136–145.
7. Gorlov V. V. A descriptive model for optimizing the emergency warning system in the Russian Federation based on mathematical modeling methods // Modeling of Critical Application Systems. 2025. No. 1. P. 47–55.
8. Dobryakova E. I. Justification of the feasibility of using navigation systems during forced evacuation // Scientific Bulletin of the Research Institute "Respirator". 2025. No. 2 (62). P. 84–93.
9. Menshikh V. V., Podolskikh A. V. A model and algorithm for optimizing the process of organizing the training of specialist groups for actions in crisis situations // Modeling of Critical Application Systems. 2025. No. 1. P. 22–32.
10. Menshikh V. V., Suvorin E. V., Nikitenko V. A. A structural-parametric model for monitoring controlled objects // Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2023. No. 3. P. 88–95.
11. Petergerin K. S., Sheiko E. A. Algorithm for calculating population evacuation routes during emergencies // Fire and Technosphere Safety: Problems and Ways of Improvement. 2021. No. 2 (9). P. 273–279.

12. Tanaev V. S., Sotskov Yu. N., Strusevich V. A. Scheduling Theory. Multi-stage Systems. Moscow, 1989. 327 p.
13. Karpenko A. P. Modern Search Optimization Algorithms. Nature-Inspired Algorithms : A Textbook. Moscow, 2017. 446 p.
14. Menshikh V. V., Nikulina E. Yu. Optimization of Time Characteristics of Information Systems : A Monograph. Voronezh, 2011. 127 p.
15. Assessment of the practical efficiency of servicing a flow of requests in standard and emergency situations using a genetic algorithm / G. N. Lebedev et al. // Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation. 2021. No. 36. P. 48–59.
16. Optimization of the distribution of limited water resources using evolutionary genetic programming / L. V. Kireicheva et al. // International Agricultural Journal. 2024. No. 2 (398). P. 233–238.
17. Menshikh V. V., Likhobabina A. V. Modeling of optimization processes for selecting training and retraining programs for specialists using a genetic algorithm // Automation and Modeling in Design and Management. 2024. No. 1 (23). P. 42–48.
18. Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. Genetic Algorithms. Moscow, 2010. 368 p.
19. Menshikh V. V., Podolskikh A. V. A Model and a Numerical Method for Optimizing the Choice of a Training Trajectory for Heterogeneous Groups of Specialists // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 32–41.
20. Nikitenko A. N. Computer modeling of "soft" control in multi-agent systems // Modeling of Critical Application Systems. 2025. No. 2. P. 27–34.
21. Project Management : A Textbook / I. I. Mazur et al. Moscow, 2010. 960 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горлов Виталий Викторович, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры тактико-специальной подготовки Воронежского института МВД России (394065, Российская Федерация, г. Воронеж, просп. Патриотов, д. 53); РИНЦ ID: 554810; ORCID: 0009-0002-7926-1651; e-mail: gorlovvv@mail.ru

Меньших Валерий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры математики и моделирования систем Воронежского института МВД России (394065, Российская Федерация, г. Воронеж, просп. Патриотов, д. 53); РИНЦ ID: 382426; Scopus AuthorID: 6603470623; ResearcherID: AAZ-6806-2021; ORCID: 0000-0001-9235-4997; e-mail: menshikh@list.ru

Никитенко Виталий Алексеевич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры математики и моделирования систем Воронежского института МВД России (394065, Российская Федерация, г. Воронеж, просп. Патриотов, д. 53); РИНЦ ID: 1129459; ORCID: 0009-0006-1948-3817; e-mail: vitalijnikitenko82043@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitaly V. Gorlov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Department of Tactical and Special Training, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov Avenue,

Voronezh, 394065, Russian Federation); ID RSCI: 554810; ORCID: 0009-0002-7926-1651; e-mail: gorlovvv@mail.ru

Valery V. Menshikh, Dr. Sci. (Phys.& Math.), Professor, Professor of the Department of Mathematics and Systems Modeling, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov Avenue, Voronezh, 394065, Russian Federation); ID RSCI: 382426; Scopus AuthorID: 6603470623; ResearcherID: AAZ-6806-2021; ORCID: 0000-0001-9235-4997; e-mail: menshikh@list.ru

Vitaly A. Nikitenko, Cand. Sci. (Eng.), Assistant at the Department of Mathematics and Systems Modeling, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov Avenue, Voronezh, 394065, Russian Federation); ID RSCI: 1129459; ORCID: 0009-0006-1948-3817; e-mail: vitalijnikitenko82043@gmail.com

УДК 614.841.2

ИЗМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА НАД КАМЧАТСКИМ РЕГИОНОМ В 2016–2025 ГГ. И ПРОИСХОДИВШИЕ ЗДЕСЬ В 2016–2025 ГГ. ОПАСНЫЕ ЭНДОГЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Хлопцев Александр Вадимович¹, Шубкин Роман Геннадьевич¹, Батуро Алексей Николаевич¹,
Уколов Алексей Валерьевич²

¹ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Российская Федерация

² Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Актуальной проблемой аэрологии, геофизики и безопасности при чрезвычайных ситуациях является выявление связей между изменениями среднесуточных значений общего содержания озона (ОСО) над Камчатским регионом, а также происходящими в нем опасными эндогенными геологическими явлениями (извержениями вулканов и землетрясениями). Такие связи могут носить причинный характер, поскольку при упомянутых явлениях происходит существенная активизация дегазации земных недр, которая приводит к увеличению потока поступающего в стратосферу водорода. Так как водород является одним из катализаторов реакций разрушения озона, рассматриваемое явление может приводить к снижению над соответствующим районом ОСО. Выдвинута гипотеза о том, что при рассматриваемых явлениях существенное снижение ОСО над некоторыми пунктами Камчатского региона происходит чаще, чем в промежутках между ними. Целью работы является ее проверка для периода 2016–2025 гг., в котором указанные явления в регионе происходили почти ежегодно. Установлено, что существенное снижение ОСО над многими пунктами региона при всех рассматриваемых явлениях наблюдалось с запаздыванием по отношению к датам их начала на несколько суток. Частоты, с которыми происходит это снижение, в периоды вулканических извержений и землетрясений значительно больше, чем в промежутках между ними. Значения этих частот повышены над районами, близкими к эпицентрам упомянутых катаклизмов. Существенные снижения ОСО над регионом в рассматриваемый период возникали и до начала изучаемых явлений.

Ключевые слова: Камчатский регион, общее содержание озона, опасные эндогенные геологические явления, водородная дегазация, отклик, частота

Для цитирования: Изменения распределения общего содержания озона над Камчатским регионом в 2016–2025 гг. и происходившие здесь в 2016–2025 гг. опасные эндогенные геологические явления / А. В. Хлопцев [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 160–179.

CHANGES IN THE DISTRIBUTION OF TOTAL OZONE CONTENT OVER THE KAMCHATKA REGION IN 2016–2025 AND DANGEROUS ENDOGENOUS GEOLOGICAL PHENOMENA THAT OCCURRED HERE IN 2016–2025

Alexander V. Khloptsev¹, Roman G. Shubkin¹, Alexey N. Baturo¹, Alexey V. Ukolov²

¹ Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation

² UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. A pressing issue in aerology, geophysics, and emergency safety is identifying the links between changes in average daily total ozone (hereinafter, TO) levels over the Kamchatka region and hazardous endogenous geological events (volcanic eruptions and earthquakes) occurring there. Such links may be of a causal nature, since the mentioned phenomena cause a significant activation of the degassing of the earth's interior, which leads to an increase in the flow of hydrogen entering the stratosphere. Since hydrogen is one of the catalysts for ozone destruction reactions, the phenomenon under consideration can lead to a decrease in the OCC over the corresponding area. It is hypothesized that during the phenomena under consideration, a significant decrease in the OCC over certain locations in the Kamchatka region occurs more frequently than in the intervals between them. The purpose of this work is to test this hypothesis for the period of 2016–2025, in this region, these phenomena occurred almost every year. It was found that a significant decrease in the OSO over many locations in the region was observed several days after the onset of the phenomena. The frequency of this decrease was significantly higher during periods of volcanic eruptions and earthquakes than during the intervals between them. The values of these frequencies were higher over areas close to the epicenters of the mentioned disasters. Significant reductions in the OCC over the region occurred before the onset of the phenomena under study.

Keywords: Kamchatka region, total ozone content, hazardous endogenous geological phenomena, hydrogen degassing, response, frequency

For citation: Changes in the distribution of total ozone content over the Kamchatka region in 2016–2025 and dangerous endogenous geological phenomena that occurred here in 2016–2025 / A. V. Khloptsev et al. // Technosphere safety. 2026. No. 2 (51). P. 160–179.

Введение

Изменения состояния озонового слоя над любым регионом мира существенно влияют на вариации потока биологически активной ультрафиолетовой радиации, воздействующей на его население и живую природу [1–3]. Даже при частичном его разрушении первичная заболеваемость населения любого региона смертельно опасными формами

онкологических заболеваний значительно повышается [4, 5]. Изменяются также продолжительности циклов накопления на его территории горючего материала и ее термический режим [6], что влияет на динамику пожароопасности [7]. Поэтому выявление особенностей влияния различных природных факторов на изменения состояния озонового слоя является актуальной проблемой безопасности при чрезвычайных ситуациях.

Решение указанной проблемы представляет наибольший интерес для регионов, в атмосфере над которыми частота возникновения отрицательных озоновых аномалий повышена. В России одним из них является Камчатский регион, в качестве условных границ которого могут рассматриваться меридианы 155° в. д. и 163° в. д., а также параллели 49° с. ш. и 62° с. ш.

Особенность Камчатского региона — наличие в нем 28 действующих вулканов. Среди них наиболее активным является Ключевская сопка (4 750 м) с координатами $56^{\circ}04'$ с. ш. и $160^{\circ}38'$ в. д. [8, 9]. Извержения этого вулкана лишь за последнее десятилетие происходили шесть раз:

- с 3 апреля по 6 ноября 2016 г.;
- с 1 ноября 2019 г. по 3 июля 2020 г.;
- с 18 февраля по 20 марта 2021 г.;
- в ноябре 2022 г.;
- с 23 июня 2023 г.;
- с 30 июля 2025 г.

Особенностью Камчатского региона также является повышенная повторяемость мощных землетрясений [10]. Упомянутые явления неоднократно регистрировались и за последнее десятилетие. К числу наиболее сильных могут быть отнесены два землетрясения.

Первое с магнитудой 6,9 произошло 5 июня 2023 г. Его эпицентр находился на дне Авачинского залива в 64 км от Петропавловска-Камчатского. Наиболее мощным землетрясением явилось второе, имевшее магнитуду 8,8. Оно случилось 30 июля 2025 г. Эпицентр находился на дне Тихого океана, в пункте с координатами $52^{\circ}30'36''$ с. ш. и $160^{\circ}15'40''$ в. д. В те же сутки началось извержение вулкана Ключевская сопка, а 3 августа 2025 г. начал извергаться вулкан Крашенинникова.

Как следует из изложенного, все опасные эндогенные геологические явления (далее — ОГЯ), зарегистрированные в регионе за 2016–2025 гг., происходили в секторе, границами которого являются меридианы $160^{\circ}00'$ в. д. и $161^{\circ}19'$ в. д. Многие из них сопровождались выделением значительной энергии и различных веществ, которые способны влиять на образование над регионом отрицательных озоновых аномалий.

Согласно существующим представлениям о причинах разрушения озонового слоя, одной из них является протекание в атмосфере реакций ликвидации озона, в которых как катализатор участвует водород либо гидроксил ОН [6, 7, 11–13]. Чем больше реакционные потоки таких катализаторов, тем при прочих равных условиях более интенсивно ликвидируется озон, что приводит к снижению его общего содержания (далее — ОСО).

Учитывая это, В. Л. Сывороткиным установлено, что одним из последствий активизации водородной дегазации земных недр является образование над районами, в которых она происходит, локальных отрицательных озоновых аномалий [8, 14–16]. Им неоднократно отмечалось возникновение таких аномалий над регионами, где происходили извержения вулканов, а также мощные землетрясения, в т. ч. и над Камчатским регионом. При этом установлено, что такие озоновые аномалии могут возникать в атмосфере и по другим причинам.

Вместе с тем вероятность, с которой отрицательные озоновые аномалии образуются при ОГЯ в Камчатском регионе, а также в другие периоды времени, ранее не оценивалась. Это не позволяет адекватно учитывать такие последствия ОГЯ при разработке мероприятий по защите от них населения.

Выявление рассматриваемых озоновых аномалий усложнено тем, что при ОГЯ водород из земных недр в основном выделяется не в стратосферу, где в основном расположен озон, а в тропосферу. Непосредственно в стратосферу он может поступать лишь при выбросах достаточно высоких столбов пепла. В тропосфере на подъем выделившегося в нее водорода, а также его миграцию в стратосферу существенно влияют циркуляционные процессы, многие составляющие которых изменяются случайным образом. В результате этого участки земной поверхности, над которыми после ОГЯ наблюдается снижение ОСО, не всегда соответствуют пунктам, где эти ОГЯ происходили.

Существенное влияние на подъем в стратосферу над Камчатским регионом выделившегося с его поверхности водорода оказывают циклоны, муссоны, а также Тихоокеанское струйное течение, северная периферия которого располагается над его южными районами. Так как скорость этого течения может достигать 25 м/с и более, его влияние может приводить к снижению ОСО над участками земной поверхности, удаленными на сотни километров от пункта, где произошла дегазация. Следовательно, в результате извержений вулканов возможно образование двух минимумов ОСО, различающихся между собой по времени. После мощного землетрясения более вероятно образование одного минимума ОСО, запаздывающего по отношению к нему на большую величину.

Направления и скорости воздушных потоков в тропосфере и стратосфере весьма изменчивы, как и реакционные потоков веществ, участвующих в разрушении стратосферного озона. С течением времени может непредсказуемо меняться и интенсивность водородной дегазации. Вследствие этого

изменения ОСО над тем или иным участком земной поверхности целесообразно рассматривать как случайную величину, характеристики которой зависят от координат, месяца, а также года.

Как следует из изложенного, допустимо предположить, что в периоды возникновения в Камчатском регионе ОГЯ значения указанной характеристики над некоторыми его участками в среднем значительно больше, чем в промежутках между ними.

Выдвинутая гипотеза тривиальной не является, т. к. причинами снижения ОСО, как уже отмечалось выше, могут служить и иные процессы. Их примером могут служить ландшафтные пожары, при которых существенно повышается температура подстилающей поверхности. Вследствие последнего активизируется термическая конвекция, выносящая пирогенные вещества в верхние слои тропосферы, откуда они, в результате действия тех или иных механизмов воздухообмена [1, 13], могут проникать в стратосферу и участвовать в разрушении стратосферного озона.

Тем не менее справедливость выдвинутой гипотезы ранее не проверялась.

Поэтому цель данной работы — проверка выдвинутой гипотезы на примере изменений ОСО, происходивших над Камчатским регионом в период 2016–2025 гг.

Для ее достижения были решены следующие задачи:

- оценка времен запаздывания дат возникновения ближайшего и главного минимумов ОСО над различными участками территории Камчатского региона по отношению к дате начала ОГЯ;
- определение частот, с которыми в некотором месяце, относящемся к изучаемому периоду времени, среднесуточные ОСО над тем или иным

пунктом региона снижались ниже соответствующих уровней.

Фактический материал и методика исследований

Для достижения указанной цели как источник информации об изменениях ОСО над Камчатским регионом использована информация [17], полученная с помощью инструмента OMI (искусственный спутник Земли AURA) за период с 1 января 2016 г. по 31 августа 2025 г. для всех пунктов региона, соответствующих узлам координатной сетки с шагом 1° .

OMI (Ozone Monitoring Instrument) разработан совместно Голландским аэрокосмическим агентством, Финским метеорологическим институтом, NASA. С его применением с 2004 г. осуществляется ежесуточный мониторинг ОСО над всеми участками земной поверхности размерами $0,25 \times 0,25^\circ$. Инструмент OMI осуществляет измерение и сравнение спектральных характеристик солнечного света, рассеянного в атмосфере, а также отраженного от поверхности Земли в диапазоне длин волн 270–500 nm, со спектральным разрешением 0,5 nm и с пространственным разрешением 13×24 км на 1 пиксель. Сравнение этих спектров позволяет получить информацию о распределении в атмосфере концентрации

озона, который поглощает и рассеивает солнечную радиацию с соответствующими длинами волны. По этой информации вычисляется и значение ОСО, выраженное в единицах Добсона (Du).

Одна единица Добсона равна 0,01 мм толщины слоя, который образовал бы весь озон, содержащийся в столбе воздуха над изучаемым участком земной поверхности площадью 1 м^2 , при условии, что он был бы сжат до давления 1 015 гПа и имел температуру 0°C . При $\text{ОСО} = 1 \text{ Du}$ в атмосфере над участком площадью 1 м^2 содержится $2,69 \times 10^{20}$ молекул озона.

Допустимость применения указанной информации в качестве фактического материала подтверждена путем ее тестирования, с использованием сведений о значениях ОСО, измеренных в стандартные сроки, на озонометрической станции Петропавловск-Камчатский.

Анализ фактического материала показал, что информация о среднесуточных значениях ОСО над теми или иными пунктами региона в указанном источнике для многих дат отсутствует. Как пример, сведения о количестве пропусков такой информации в указанном фактическом материале для того или иного месяца 2020 г., а также некоторых пунктов региона представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1
Количество пропусков информации об ОСО для некоторых месяцев 2020 г. и пунктов региона, расположенных на меридиане 155° в. д.

Table 1
Number of omissions in information on the TO for some months of 2020 and points in the region located on the meridian 155° E

Месяц Month	Широта ($^\circ$ с. ш.) Latitude ($^\circ$ s. w.)							На всех широтах At all latitudes
	62	60	58	56	54	52	50	
Январь January	13	3	2	4	4	7	6	78

Окончание таблицы 1

Месяц Month	Широта (° с. ш.) Latitude (° s. w.)							На всех широтах At all latitudes
	62	60	58	56	54	52	50	
Февраль February	0	0	0	2	4	4	5	30
Март March	0	0	0	2	4	6	6	36
Апрель April	0	1	1	4	5	5	7	46
Май May	0	0	0	2	4	4	6	32
Июнь June	0	0	0	2	3	4	6	30
Июль July	0	0	0	2	5	5	6	36
Август August	1	0	1	2	4	5	6	38
Сентябрь September	0	0	0	2	4	4	6	32
Октябрь October	0	0	0	2	4	4	6	32
Ноябрь November	5	9	6	2	5	4	6	74
Декабрь December	28	4	7	6	7	6	6	128
Всего in total	47	17	17	32	53	58	72	—

Таблица 2
Количество пропусков информации об ОСО для некоторых месяцев 2020 г.
и пунктов региона, расположенных на меридиане 161° в. д.

Table 2
 Number of omissions in information on the TO for some months of 2020
 and points in the region located on the meridian 161 E

Месяц Month	Широта (° с. ш.) Latitude (° s. w.)							На всех широтах At all latitudes
	62	60	58	56	54	52	50	
Январь January	11	3	0	2	7	7	8	76
Февраль February	0	0	0	2	3	6	8	38
Март March	0	0	0	2	3	4	8	34
Апрель April	0	1	1	2	5	4	6	38
Май May	0	0	0	2	3	4	8	34
Июнь June	0	0	0	2	4	4	7	34

Окончание таблицы 2

Месяц Month	Широта (° с. ш.) Latitude (° s. w.)							На всех широтах At all latitudes
	62	60	58	56	54	52	50	
Июль July	1	0	0	2	5	4	6	36
Август August	1	0	0	2	5	4	6	38
Сентябрь September	0	0	0	2	3	3	7	30
Октябрь October	0	0	0	2	4	5	7	36
Ноябрь November	2	5	4	5	5	4	7	64
Декабрь December	28	2	2	4	8	9	10	126
Всего in total	43	11	8	28	54	58	90	—

Как видим из табл. 1, 2, для декабря и января количество пропусков в рассматриваемой информации значительно больше, чем для прочих месяцев. Повышено количество пропусков также в пунктах, расположенных вблизи северной и южной границ региона.

В другие годы распределению в пределах изучаемого региона пропусков присущи аналогичные особенности. Поэтому фактический материал может быть признан вполне достоверным для месяцев с февраля по ноябрь и для широт от 55° с. ш. до 61° с. ш.

Учитывая указанные особенности фактического материала, значение частоты изучаемого события для того или иного месяца вычислялось как отношение количества суток, в течение которых оно за этот месяц было выявлено, к общему количеству суток этого месяца, для которых в [17] представлена информация о значениях ОСО.

При решении первой задачи рассматривались зависимости от времени среднесуточных значений ОСО за весь изучаемый период, соответствующие всем учитываемым пунктам Камчатского региона. Для каждого участка

определялись промежутки времени между датой возникновения того или иного ОГЯ и датами, в которые происходило ближайшее (б) и наибольшее (г) снижение над ним ОСО.

Решение второй задачи осуществлялось в два этапа.

На первом этапе определялись пороговые уровни, применявшиеся далее для оценки изучаемых частот.

Если бы изменения в каком-либо месяце среднесуточных ОСО над различными пунктами региона являлись выборками нормального случайного процесса, то основными их статистическими характеристиками являлись бы среднее значение (m) и среднеквадратическое отклонение (σ). При этом как пороговые могли бы рассматриваться уровни: $X_1 = m - \sigma$; а также $X_2 = m - 2\sigma$, вероятность снижения ниже которых среднесуточных ОСО составляла бы 0,07 и 0,028.

Предполагалось, что в 2024 г., в котором ОГЯ на территории Камчатского региона не происходило, для любого месяца статистические свойства изменений ОСО близки к свойствам нормального случайного процесса.

В соответствии с критерием Пирсона такое предположение может быть признано справедливым, если частоты, с которыми ОСО для соответствующего пункта Камчатского региона и месяца 2024 г. (в котором ОГЯ не зафиксировано) окажутся близки к указанным значениям. Если в действительности фактические значения рассматриваемых частот окажутся существенно иными, то предположение о нормальности изучаемого процесса неверно, что, однако, не мешает использовать выбранные уровни X_1 и X_2 при решении второй задачи.

На втором этапе решения второй задачи для каждого месяца и каждого пункта вычислялась частота, с которой среднесуточное ОСО было ниже уровней X_1 и X_2 . При этом значения частоты снижения ОСО для месяцев, следующих за началом того или иного ОГЯ, происходящего над участками поверхности региона, близкими к его эпицентру, сопоставлялись с аналогичными показателями для других участков и месяцев.

Оценивалась вероятность того, что пунктам и месяцам, в которые происходили ОГЯ, соответствуют максимумы частоты возникновения указанных событий.

Нетрудно видеть, что изложенная методика позволяет для каждого участка изучаемого региона, а также месяца оценить частоту, с которой для них выдвинутая гипотеза в период 2016–2025 гг. являлась справедливой, поэтому она позволяет достичь цели данной работы.

Следует отметить, что получаемые с ее применением оценки изучаемых частот являются неточными, так как сведения о значениях ОСО, которые использованы для их вычисления, соответствуют не любым датам из изучаемого периода, а количество их пропусков для того или иного месяца в разные

годы различно. Поэтому выводы, которые данная методика позволяет получить, целесообразно рассматривать как носящие качественный характер.

Результаты исследования и их анализ

С применением изложенной методики для каждого периода ОГЯ и каждого пункта Камчатского региона определены сдвиги по времени между датой начала соответствующего процесса, а также датами, в которые среднесуточные значения ОСО над ним достигали минимумов: ближайшего к дате ОГЯ (б) и главного (г).

Как пример, рассмотрим зависимости от времени среднесуточных значений ОСО среднесуточных значений ОСО (Du) в период до и после Камчатского землетрясения 30 июля 2025 г., над пунктами Камчатского региона, расположенными на меридианах 155° в. д., 160° в. д. и 163° в. д., а также параллелях от 49° с. ш. и до 62° с. ш. с шагом 1° .

Рассматриваемый временной интервал выбран потому, что на нем в регионе произошло мощнейшее землетрясение (30 июля 2025 г.) и начались извержения двух вулканов: Ключевская Сопка (30 июля 2025 г.) и Крашенинникова (2 августа 2025 г.). Вследствие этого указанные ОГЯ оказывали на озоновый слой над Камчатским регионом суммарное воздействие, отклик на которое мог оказаться заметным.

Рассматриваемые меридианы 155° в. д. и 163° в. д. соответствуют западной и восточной границам Камчатского региона, а меридиан 160° в. д. находится вблизи эпицентра упомянутого землетрясения и кратеров обоих извергающихся вулканов.

Зависимости от времени среднесуточных значений ОСО (Du) в период до и после

Камчатского землетрясения 2025 г. над пунктами Камчатского региона, расположенными

ми на указанных меридианах и параллелях, представлены на рис. 1.

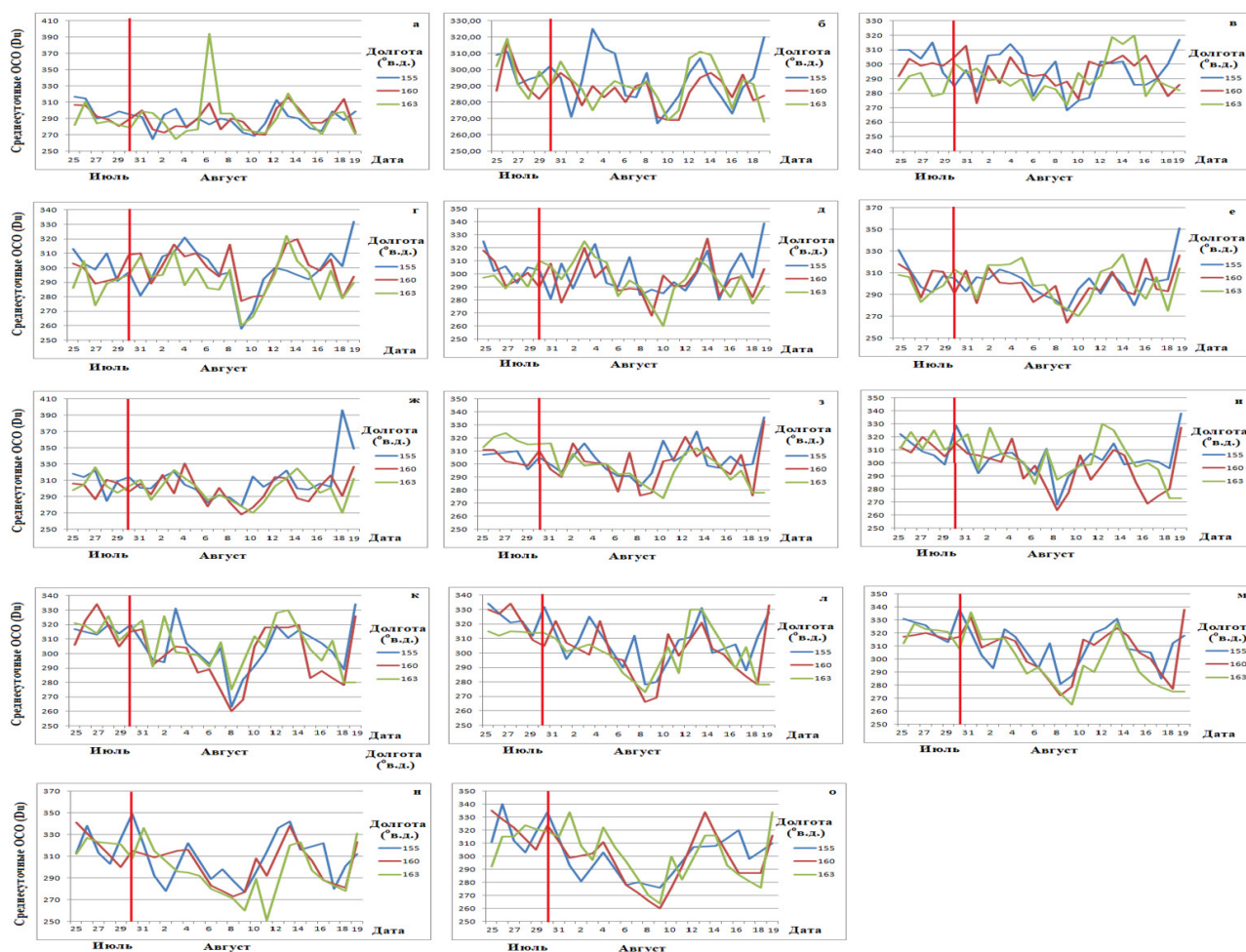


Рис. 1. Зависимости от времени среднесуточных значений ОСО (D_u) в период до и после Камчатского землетрясения 2025 г. над пунктами Камчатского региона, расположенными на некоторых меридианах, а также параллелях: а — 62° с. ш.; б — 61° с. ш.; в — 60° с. ш.; г — 59° с. ш.; д — 58° с. ш.; е — 57° с. ш.; ж — 56° с. ш.; з — 55° с. ш.; и — 54° с. ш.; к — 53° с. ш.; л — 52° с. ш.; м — 51° с. ш.; н — 50° с. ш.; о — 49° с. ш.

Вертикальной красной чертой обозначена дата — 30 июля 2025 г.

Fig. 1. Time dependence of the average daily values of the OSO (D_u) before and after the 2025 Kamchatka earthquake over the points of the Kamchatka region located on some meridians and parallels. The vertical red line indicates the date of July 30, 2025

Как видно из данных рис. 1, зависимости от времени среднесуточных значений ОСО (D_u) в период до и после Камчатского землетрясения 2025 г. над всеми рассматриваемыми пунктами Камчатского региона носят характер сложных колебаний. Непосредственно 30 июля минимумы ОСО выявлены в некоторых районах, расположенных вблизи пунктов, где произошли указанные ОГЯ (см. рис. 1д, 1е). При этом аналогичные

экстремумы в различных пунктах региона выявлены как до, так и после этой даты.

Очевидно, что откликом на любое ОГЯ могут являться минимумы ОСО, возникшие лишь после его начала. Вопрос о том, могут ли минимумы ОСО, предшествующие началу ОГЯ, служить его предвестником нуждается в дополнительном изучении.

Непосредственно после 30 июля 2025 г. то или иное снижение ОСО над всеми пунктами

региона наблюдалось в даты, запаздывающие по отношению к указанной на 2–3 суток. В такие даты минимумы ОСО выявлены в пунктах, расположенных на параллелях 56–61° с. ш. и 53° с. ш. Рис. 16–10 свидетельствуют о том, что наименьшие значения ОСО в регионе за рассматриваемый период для большинства его пунктов соответствуют 8–10 августа 2025 г. Подобная отрицательная озоновая аномалия возникает с запаздыванием по отношению к дате начала ОГЯ на 9–11 суток. Нетрудно увидеть, что чем ближе некоторый пункт расположен к эпицентру землетрясения или упомянутому вулкану, тем запаздывание даты, соответствующее такому минимуму ОСО, по отношению к 30 июля 2025 г. меньше, а абсолютная величина такого снижения ОСО больше. Это позволяет рассматривать выявленные аномалии как последствия происходивших ОГЯ.

Образование обоих минимумов ОСО с указанными запаздываниями по отношению к моменту начала ОГЯ возможны, так как выделявшийся при этих процессах водород может поступить в озоновый слой (на высоты 23–28 км) лишь спустя некоторое время.

Как отмечалось выше, извержение вулкана Ключевская сопка 30 июля 2025 г. началось с выброса столба пепла и вулканических газов на высоту 5–6 км над его вершиной (высота которой 4 750 м). Очевидно, что при этом событии часть водорода, входящего в состав упомянутых газов, проникла непосредственно в стратосферу. Этот водород, по-видимому, достиг озонового слоя над регионом за 2–3 суток, что привело к образованию ближайшего минимума ОСО. Значительная часть поступившего в тропосферу при этом извержении водорода могла

в ней частично перемешаться с воздухом. Поэтому она могла преодолеть тропопаузу лишь с некоторым запаздыванием.

Водород, выделявшийся в атмосферу при землетрясении, а также в процессе дальнейшего извержения того же вулкана, столь мощной и консолидированной струи, по-видимому, не образовывал, а в стратосферу поступал в результате действия иных, менее быстрых механизмов воздухообмена [1, 13]. Вероятно, именно поэтому наиболее существенное снижение ОСО над регионом могло произойти позже (8–10 августа).

На подъем в стратосферу водорода, выделившегося с земной поверхности, наверняка оказывала влияние динамика тропосферы, существенный вклад в которую, как известно, вносит разномасштабная турбулентность. В разные моменты времени воздушные течения, существовавшие в тропосфере над регионом, относили выделяющийся с его поверхности водород в различных направлениях. Последнее, по-видимому, привело к образованию в озоновом слое практически над всем Камчатским регионом указанных откликов на рассматриваемые ОГЯ.

При решении второй задачи для каждого пункта Камчатского региона и каждого месяца, относящегося к 2024 г. (в котором ОГЯ зарегистрировано не было), определены средние значения и среднеквадратические отклонения среднесуточных ОСО, которые использованы для определения пороговых уровней ОСО X_1 и X_2 . Примеры значений указанных уровней, соответствующих тем или иным месяцам для пунктов региона, расположенных на меридиане 161° в. д. (вблизи которого происходили ОГЯ) и на различных широтах, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Примеры значений X_1 и X_2 для различных месяцев и для пунктов региона, расположенных на меридиане 161° в. д., а также на некоторых параллелях

Table 3

Examples of X_1 and X_2 values for different months and for points in the region located on the meridian 161° o. d., as well as on some parallels

Месяц Month	Значения уровня X_1 (Du) Values of the X_1 (Du) level						Значения уровня X_2 (Du) Values of the X_2 (Du) level					
	Широта (° с. ш.) Latitude (° s. w.)											
	62	57	56	55	52	49	62	57	56	55	52	49
Январь January	429,3	416,4	408,5	409,1	411,2	408,0	392,4	374,5	363,7	365,8	374,4	379,6
Февраль February	468,9	459,8	453,5	455,3	453,9	426,3	434,8	416,2	407,1	405,5	408,4	381,4
Март March	419,1	431,7	436,6	439,5	435,1	441,8	388,1	402,6	410,9	413,4	402,7	410,4
Апрель April	415,3	401,1	392,9	388,8	391,5	385,7	382,2	365,3	355,1	349,5	351,9	346,1
Май May	389,7	385,9	380,7	378,9	366,3	359,7	363,4	353,3	345,1	342,1	321,1	316,9
Июнь June	364,7	373,0	373,3	372,9	367,4	363,3	340,5	355,5	355,3	353,7	344,3	336,4
Июль July	322,4	319,1	322,4	321,0	329,5	311,8	299,1	295,6	300,9	297,6	304,4	278,3
Август August	312,9	304,0	301,3	301,4	289,0	274,5	293,5	284,9	281,9	283,2	269,7	252,2
Сентябрь September	302,1	305,2	306,7	306,6	300,2	292,4	276,2	276,7	278,1	275,5	270,9	263,6
Октябрь October	325,6	310,9	303,6	298,8	279,7	264,8	299,7	283,2	276,4	271,3	247,7	232,4
Ноябрь November	350,3	352,4	353,6	354,4	349,5	339,3	310,2	323,9	327,8	329,2	323,5	313,8
Декабрь December	395,4	400,1	397,7	400,1	389,6	386,6	366,6	372,3	367,9	370,7	356,5	358,8

Установлено, что для месяцев 2024 г. частоты снижения среднесуточного ОСО ниже уровней X_1 и X_2 для всех рассматриваемых пунктов Камчатского региона существенно выше, чем 0,07 и 0,028. Следовательно, в действительности распределение вероятностей ОСО для таких пунктов и месяцев существенно отличается от Гауссового.

Также для каждого месяца, относящегося к периоду январь 2016 г. — август 2025 г.,

и каждого пункта Камчатского региона определена частота события, при котором среднесуточное значение ОСО снижалось ниже уровней X_1 или X_2 .

Как пример, на рис. 2 показаны зависимости от времени частоты события, при котором среднесуточное значение ОСО над пунктами, расположенными на параллелях 56° с. ш. и 49° с. ш., а также на меридиане 161° в. д., снижалось ниже уровней X_1 .

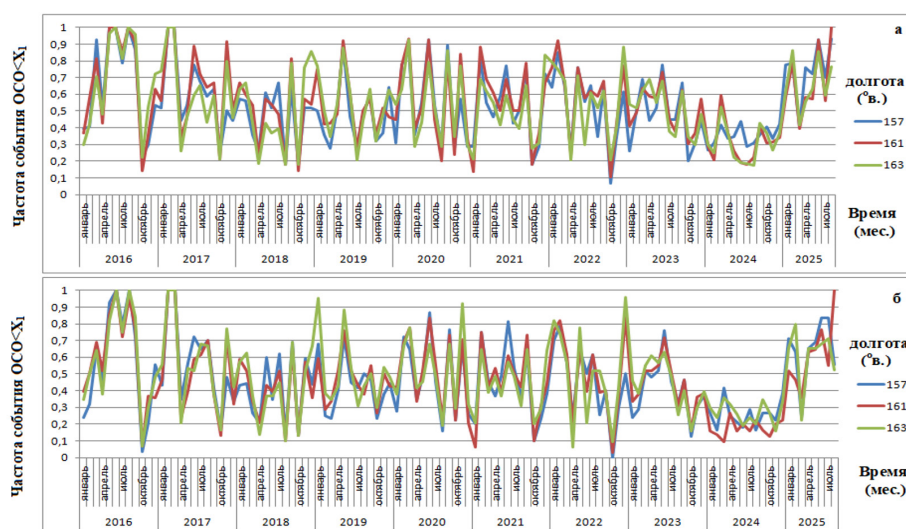


Рис. 2. Зависимости от времени частот снижений среднесуточных значений ОСО ниже уровней X_1 , происходивших за период с января 2016 г. по август 2025 г., для пунктов Камчатского региона, расположенных на указанных меридианах и на параллелях: а — 56° с. ш.; б — 57° с. ш.

Fig. 2. Time-dependent frequencies of reductions in the average daily values of OSO below the X_1 levels, which occurred between January 2016 and August 2025 for the locations of the Kamchatka region

Из данных рис. 2 следует, что зависимости частот рассматриваемого события от времени для пунктов Камчатского региона, расположенных на параллелях 56° с. ш. и 57° с. ш., а также на меридианах 157° в. д., 161° в. д. и 163° в. д. обладают существенным подобием. Из них видно, что каждому извержению вулкана и каждому землетрясению, произошедшему в регионе за рассматриваемый период, в рассматриваемых зависимостях соответствует максимум частоты, для которого значение последней составляет не менее 0,7. Вместе с тем многие максимумы началам каких-либо ОГЯ не соответствуют.

Даже не учитывая максимумы, приходящиеся на декабрь и январь каждого года (значения которых вычислены по существенно меньшему количеству учитываемых значений ОСО), из рис. 2 следует, что максимумы, не соответствующие началам каких-либо ОГЯ, составляют до 75 % от их общего количества. «До» потому, что активная водородная дегазация земных недр с той или иной интенсивностью происходила не только в месяцы, на которые приходилось начало проис-

ходивших извержений, что также могло привести к образованию некоторых максимумов.

Вместе с тем на графиках, представленных на рис. 2, присутствуют максимумы, приходящиеся на периоды, когда предыдущее ОГЯ, по имеющимся данным, завершилось, а следующее ОГЯ еще не началось. Так, например, в 2025 г. максимумы рассматриваемого показателя приходились не только на август (непосредственно сразу после Камчатского землетрясения 30 июля и начала извержения вулканов Ключевая сопка и Крашенинникова), но и на январь и июнь.

Если максимум, соответствующий январю, может рассматриваться как следствие значительного количества пропусков в исходных данных (которых было 11), то максимум, приходящийся на июнь, существует вполне реально. Поэтому такие события нуждаются в объяснении. Тем более, что анализ аналогичных зависимостей, соответствующих всем 126 рассматриваемым пунктам Камчатского региона, позволил выявить такие «опережающие» максимумы для всех выявленных в нем за 2016–2025 гг. мощных землетрясений.

Из данных рис. 2 понятно также, что абсолютное большинство максимумов и минимумов рассматриваемых зависимостей, соответствующих пунктам, находящимся на разных параллелях и меридианах, совпадают по времени. Такие же совпадения выявлены и для прочих пунктов региона. Из этого следует, что изменения ОСО над всеми пунктами Камчатского региона обусловлены действием одних и тех же факторов.

Одним из таких факторов, вероятно, являются вариации характеристик атмосферной циркуляции, обусловленные сменой времен года, но могут существовать и другие. К последним могут относиться происходящие в Камчатском регионе изменения

интенсивности водородной дегазации земных недр.

Для подтверждения наличия связи выявленных «опережающих» максимумов с ОГЯ сопоставлены зависимости от времени значений частоты, с которой среднесуточные ОСО над всеми пунктами Камчатского региона, для месяцев, соответствующих началам каких-либо ОГЯ, и для месяцев, опережающих их на два месяца, снижались ниже уровней X_1 .

Как пример, на рис. 3 показаны зависимости от долготы значений частоты, с которой среднесуточные ОСО для августа и июня 2025 г. над пунктами Камчатского региона, расположенных на некоторых параллелях, снижались ниже уровней X_1 .

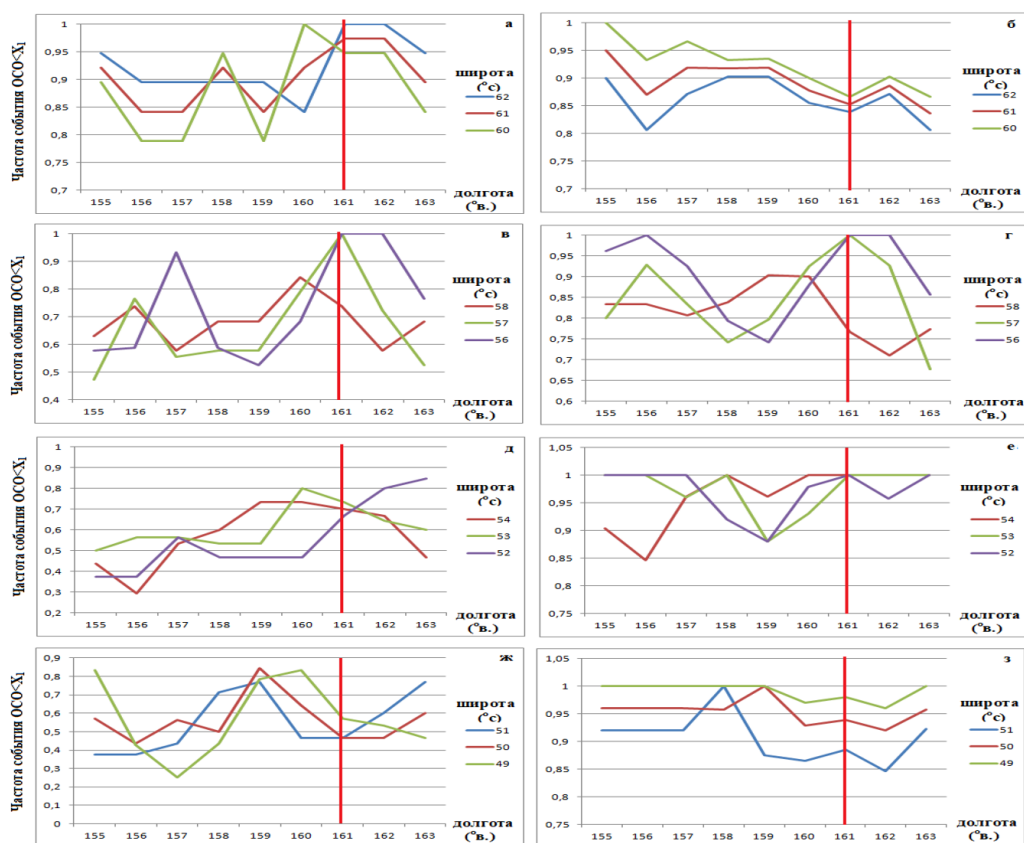


Рис. 3. Зависимости от долготы значений частоты, с которой среднесуточные ОСО снижались ниже уровней X_1 для пунктов Камчатского региона, расположенных на параллелях для августа 2025 г.: а — 60° с. ш., 61° с. ш., 62° с. ш.; в — 56° с. ш., 57° с. ш., 58° с. ш.; д — 52° с. ш., 53° с. ш., 54° с. ш.; ж — 49° с. ш., 50° с. ш., 51° с. ш.; для июня 2025 г.: б — 60° с. ш., 61° с. ш., 62° с. ш.; г — 56° с. ш., 57° с. ш., 58° с. ш.; е — 52° с. ш., 53° с. ш., 54° с. ш.; з — 49° с. ш., 50° с. ш., 51° с. ш. Красной линией выделен меридиан 161° в. д., у которого происходили все ОГЯ

Fig. 3. Dependence of the frequency of the average daily OSOs falling below the X_1 levels on longitude, for the Kamchatka region's locations on the parallels (for August 2025, for June 2025)

Таким образом, из рис. 3 очевидно, что во всем Камчатском регионе и в июне, и в августе 2025 г. среднесуточные ОСО снижались ниже уровней X_1 наиболее часто в пунктах, расположенных на меридианах близких к 161° в. д. (вблизи которого находятся кратеры обоих проснувшихся вулканов и эпицентр землетрясения).

На рис. 4 показаны зависимости частоты, с которой среднесуточные ОСО для июня и августа 2025 г. над пунктами Камчатского региона, расположенных на некоторых ме-

ридианах, снижались ниже уровней X_1 или X_2 . На всех рассматриваемых меридианах наибольшие значения частоты изучаемых событий для августа соответствуют параллелям $55\text{--}57^\circ$ с. ш., также меридиану 161° в. д., вблизи которых расположены вулканы Ключевская сопка и Крашенинникова. Для июня максимумы частоты тех же событий соответствуют параллели 52° с. ш., вблизи которой расположен эпицентр Камчатского землетрясения (до начала которого еще больше месяца).

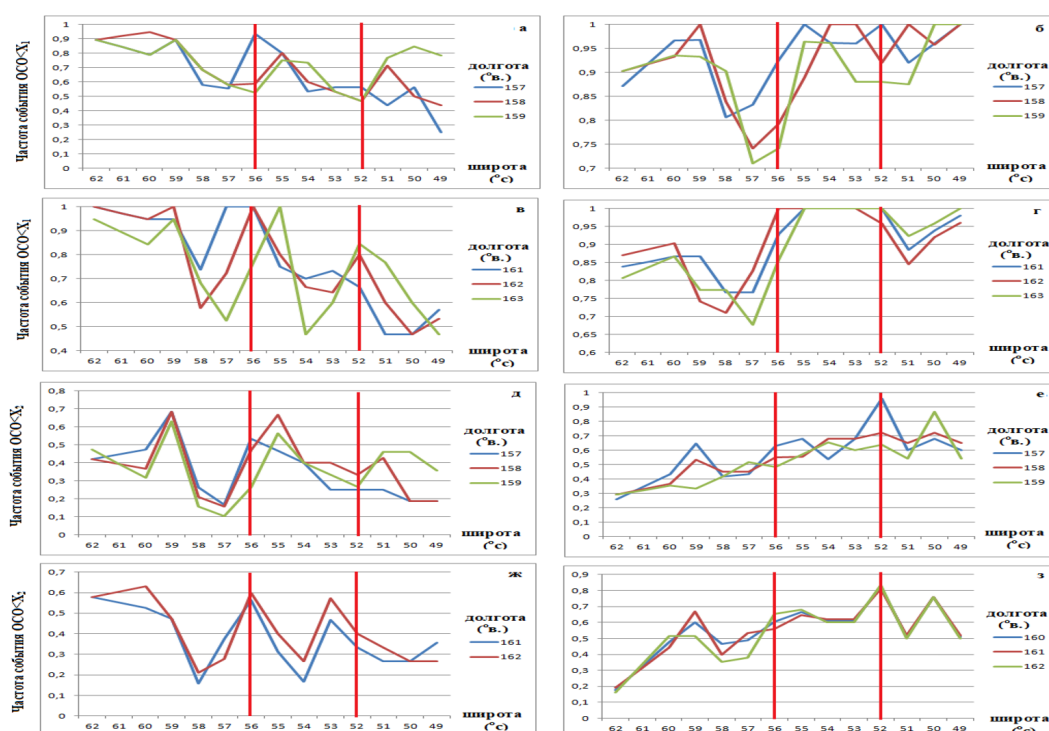


Рис. 4. Зависимости от широты частоты, с которой среднесуточные ОСО для августа и июня 2025 г. над пунктами Камчатского региона, расположенных на некоторых меридианах, снижались ниже уровней. Август 2025 г.: а, в — X_1 ; д, ж — X_2 . Июнь 2025 г.: б, в — X_1 ; е, з — X_2 . Красными линиями показаны параллели, вблизи которых расположены извергающиеся вулканы и эпицентр землетрясения

Fig. 4. Dependences on latitude of the frequency with which the average daily TO for August and June 2025, over points in the Kamchatka region located on some meridians, decreased below the levels. August 2025: а, в — X_1 ; д, ж — X_2 . June 2025: б, в — X_1 ; е, з — X_2 . Красными линиями показаны параллели, вблизи которых расположены извергающиеся вулканы и эпицентр землетрясения

Из данных рис. 3 и 4 можно сделать вывод о том, что выявленный максимум частоты снижения ОСО, соответствующих августу, ниже уровня X_1 и X_2 для пунктов Камчатского региона, расположенных на меридианах и параллелях, близких к координатам кратеров вулканов Ключевская сопка и Крашенинникова,

соответствует существующим представлениям о влиянии происходившей в них активной водородной дегазации на разрушение стратосферного озона [8, 14–16]. Вместе с тем установленный аналогичный максимум для июня, соответствующий пунктам, расположенным вблизи эпицентра Камчатского

землетрясения, — факт неожиданный. Как показал анализ аналогичных зависимостей, соответствующих предыдущим годам, выявленные закономерности проявляются и для июньского землетрясения 2023 г.

Это подтверждает рис. 5, на котором показаны зависимости от времени частоты снижения ниже уровней X_1 среднесуточных ОСО над пунктами, расположенными на различных параллелях и на мери-

дианах 155° в. д., 160° в. д. и 161° в. д., для периода январь 2023 г. — август 2025 г.

Как видно из рис. 5, для всех пунктов Камчатского региона, расположенных на рассматриваемых меридианах и параллелях и для любого месяца 2024 г. частоты снижения среднесуточного ОСО ниже уровня X_1 значительно меньше, чем для месяцев 2023 г. и 2025 г., в которые происходили рассматриваемые ОГЯ.

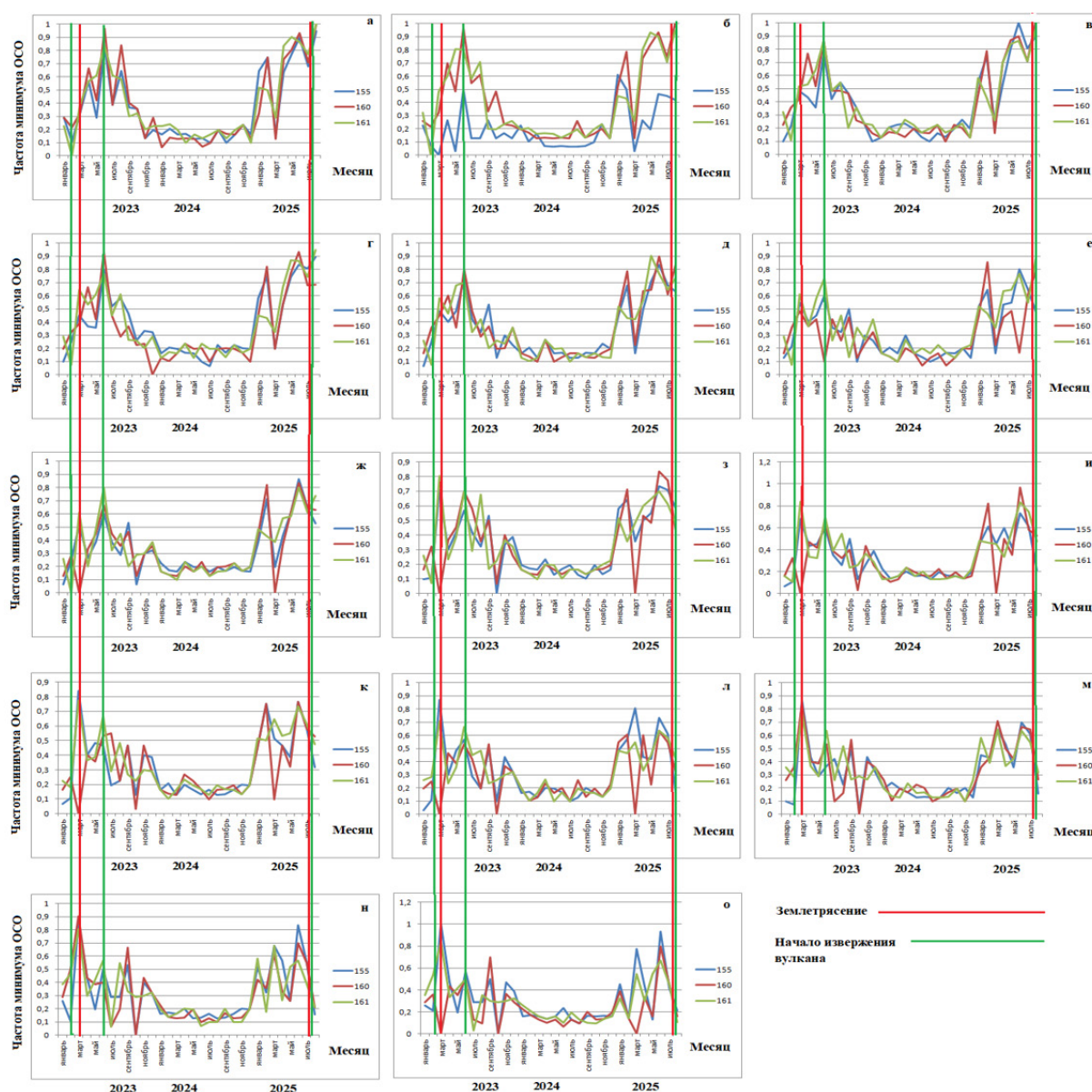


Рис. 5. Зависимости от времени частоты снижения ниже уровня X_1 среднесуточных ОСО над пунктами Камчатского региона, расположенными на широтах:

a — 62° с. ш.; b — 61° с. ш.; $в$ — 60° с. ш.; $г$ — 59° с. ш.; $д$ — 58° с. ш.; $е$ — 57° с. ш.; $ж$ — 56° с. ш.; $з$ — 55° с. ш.; $и$ — 54° с. ш.; $к$ — 53° с. ш.; $л$ — 52° с. ш.; $м$ — 51° с. ш.; $н$ — 50° с. ш.; $о$ — 49° с. ш.

Fig. 5. Time-dependent frequency of drops below the X_1 level of average daily OSOs over the Kamchatka region

На всех рассматриваемых параллелях, расположенных к югу от 57° с. ш. в изучаемых зависимостях присутствуют максимумы, совпадающие по времени с месяцами, для которых в Камчатском регионе происходили землетрясения (2023 г., 2025 г.). Выявлены также максимумы, соответствующие апрельскому извержению вулкана Шивелуч (2023 г.) и июльским извержениям вулканов Ключевская сопка и Крашенинникова (2025 г.).

Максимумы, опережающие Камчатское землетрясение (2025 г.) на два месяца, обнаружены на параллелях, расположенных к югу от 55° с. ш., на семь месяцев (январь) — на всех параллелях.

Максимумы, опережающие землетрясение 2023 г. на два месяца, обнаружены также на параллелях $55\text{--}57^{\circ}$ с. ш. Достоверность этого вывода понижена, так как в информации об ОСО для января имело место много пропусков. Аналогичные максимумы, опережающие его на семь месяцев, выявлены для всех параллелей. Максимумы, опережающие по времени начала извержений вулканов, не обнаружены.

Таким образом, справедливость выдвинутой гипотезы подтверждена, а цель исследования достигнута.

Обсуждение полученных результатов

Из полученных результатов следует, что в целом они подтверждают справедливость выводов [8, 14–16] о роли водородной дегазации земных недр в происходящих изменениях состояния озонового слоя. Вместе с тем некоторые из установленных фактов обладают научной новизной. К ним относятся:

1. Оценки сдвигов по времени между датами, в которые в Камчатском регионе

происходили ОГЯ, а также датами образования над ним отрицательной озоновой аномалии.

2. Оценки частот, с которыми над различными участками поверхности Камчатского региона снижение среднесуточных значений ОСО ниже выбранных уровней происходило в те или иные месяцы 2016–2025 гг., подтверждающие представления о том, что в год, когда ОГЯ здесь не происходило, упомянутые события возникают реже.

3. Расположения участков Камчатского региона, над которыми при возникновении в нем рассматриваемых ОГЯ существенно увеличиваются частоты снижения среднесуточных значений ОСО ниже выбранных уровней.

4. Наряду с максимумами упомянутых частот, для месяцев, на которые приходятся начала учитываемых ОГЯ, которые допускают интерпретацию как отклики озонового слоя на процесс водородной дегазации земных недр региона, существуют также их максимумы, опережающие происходящие здесь землетрясения на два, а возможно и на семь месяцев. В такие месяцы наибольшие значения рассматриваемых частот выявлены для тех же участков региона, где аналогичные максимумы имеют место непосредственно после происшедших в нем землетрясений.

Причины существования «опережающих» максимумов нуждаются в дополнительном изучении, тем не менее установленные факты позволяют предположить, что возникновение над регионом отрицательной озоновой аномалии может служить предвестником возникновения на соответствующем участке его поверхности мощного землетрясения.

Актуальной проблемой безопасности при чрезвычайных ситуациях является создание и запуск отечественного искусственного спутника Земли, оснащенного инструментом, аналогичным ОМІ, что позволило бы осуществлять оперативный мониторинг изменений общего содержания озона над всей территорией России.

Выводы

Таким образом, получены экспериментальные подтверждения справедливости представлений о том, что одной из причин возникновения отрицательной озоновой аномалии над Камчатским регионом является повышенная интенсивность происходящей в нем водородной дегазации земных недр, происходящей при случающихся здесь вулканических извержениях и мощных землетрясениях.

1. Установлено, что откликом озонового слоя на указанные события в Камчатском регионе является происходящее с высокой вероятностью существенное уве-

личение частоты, которая вызывает снижение среднесуточных значений общего содержания озона не только над их эпицентрами, но и над многими другими его районами.

2. При вулканических извержениях и землетрясениях в регионе, происходящих в летние месяцы, над большинством участков его поверхности возникают две «волны» разрушения стратосферного озона. Первая запаздывает по отношению к дате указанного события на 2–4 суток, а вторая — на 8–30 суток. В зимние месяцы при тех же явлениях, как правило, возникает только одна такая «волна».

Изменения распределения общего содержания озона над Камчатским регионом, происходящие до начала в нем мощных землетрясений, обладают статистическими свойствами, позволяющими рассматривать их как предвестников таких событий, опережающих их начало на известное время и указывающих район, в котором они могут произойти.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Холопцев А. В., Никифорова М. П., Больших А. В. Мировой океан и озоносфера. Saarbrucken, Deutschland, 2014. 522 с.
2. Effects of stratospheric ozone depletion on the environment and agriculture / S. M. Ali et al. // International Journal of Advancements in Research & Technology. 2012. Vol. 1. No. 4. P. 31–36.
3. Interactive effects of ozone depletion and climate change on biogeochemical cycles / R. G. Zepp, T. V. Callaghan, D. J. Erickson // Photochem. Photobiol. Sci. 2003. No. 2. P. 51–61.
4. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2010 assesment. Nairobi, 2010. 328 p.
5. Stratospheric ozone depletion, ultraviolet radiation and health / A. J. McMichael et al. // Climate change and human health. 2010. P. 159–180.

6. Muller R. Stratospheric ozone depletion and climate change. RSC Publishing, 2012. 346 p.
7. Сывороткин В. Л. О природе природных пожаров // Пространство и Время. 2016. Т. 11, № 1. С. 22–44.
8. Сывороткин В. Л. Извержения вулканов // Пространство и Время. 2017. № 1 (27). С. 196–213.
9. Сывороткин В. Л. Землетрясения // Пространство и Время. 2011. № 2 (4). С. 124–137.
10. Newman P. A. Stratospheric Ozone. NASA, 2003. 480 p.
11. Хргиан А. Х. Физика атмосферного озона. Л., 1973. 292 с.
12. Dessler A. The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone. Academic Press, 2000. 520 p.
13. Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. М., 2011. 451 с.
14. Сывороткин В. Л. Дегазационная концепция глобальных катастроф // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 4. С. 2–11.
15. Сывороткин В. Л. Дегазационная концепция глобальных катастроф: основные положения, новые результаты // Вопросы географии. 2019. № 149. С. 35–51.
16. Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация Земли и вулканы — откуда берутся страшные извержения? // ИА Регнум. 2022. № 1.05 С. 32–43.
17. Временные ряды ОЗО, основанные на информации, полученной инструментом ОМИ. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/neubrew/SatO3DataTimeSeries.jsp> (дата обращения: 13.03.2026).

REFERENCES

1. Kholoptsev A. V., Nikiforova M. P., Bolshikh A. V. The World Ocean and the Ozone Layer. Saarbrücken, Deutschland, 2014. 522 p.
2. Effects of stratospheric ozone depletion on the environment and agriculture / S. M. Ali et al. // International Journal of Advancements in Research & Technology. 2012. Vol. 1. No. 4. P. 31–36.
3. Interactive effects of ozone depletion and climate change on biogeochemical cycles / R. G. Zepp, T. V. Callaghan, D. J. Erickson // Photochem. Photobiol. Sci. 2003. No. 2. P. 51–61.
4. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2010 assesment. Nairobi, 2010. 328 p.
5. Stratospheric ozone depletion, ultraviolet radiation and health / A. J. McMichael et al. // Climate change and human health. 2010. P. 159–180.
6. Muller R. Stratospheric ozone depletion and climate change. RSC Publishing, 2012. 346 p.
7. Syvorotkin V. L. On the nature of natural fires // Space and Time. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 22–44.
8. Syvorotkin V. L. Volcanic Eruptions // Space and Time. 2017. No. 1 (27). P. 196–213.
9. Syvorotkin V. L. Earthquakes // Space and Time. 2011. No. 2 (4). P. 124–137.
10. Newman P. A. Stratospheric Ozone. NASA, 2003. 480 p.
11. Hrgian A. H. Physics of atmospheric ozone. Leningrad, 1973. 292 p.
12. Dessler A. The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone. Academic Press, 2000. 520 p.
13. Mohanakumar K. Interaction of the Stratosphere and the Troposphere. Moscow, 2011. 451 p.
14. Syvorotkin V. L. Degassing Concept of Global Catastrophes // Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies. 2024. No. 4. P. 2–11.

15. Syvorotkin V. L. Degassing Concept of Global Catastrophes: Basic Provisions, New Results // Voprosy Geografii. 2019. No. 149. P. 35–51.
16. Syvorotkin V. L. Deep Earth Degassing and Volcanoes — Where Do Terrible Eruptions Come From? // IA Regnum. 2022. No. 1.05. P. 32–43
17. Time series of ODS based on information obtained by the OMI tool. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/neubrew/SatO3DataTimeSeries.jsp> (accessed 13.03.2026).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Холопцев Александр Вадимович, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры контрольно-надзорной деятельности Сибирской академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, д. 1); РИНЦ ID: 467295; ORCID : 0000-0002-8293-0062; e-mail: kholoptsev@mail.ru

Шубкин Роман Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры контрольно-надзорной деятельности Сибирской академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, д. 1); РИНЦ ID: 933202; Scopus AuthorID: 57219485391; SPIN-код: 9283-8798; ORCID: 0000-0002-7661-5162; e-mail: rshubkin@yandex.ru

Батуро Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры контрольно-надзорной деятельности Сибирской академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, д. 1); РИНЦ ID: 814934; Scopus AuthorID: 58045318600; SPIN-код: 6887-7568; ORCID: 0000-0002-0446-2814.

Уколов Алексей Валерьевич, канд. пед. наук, доцент, доцент кафедры физической культуры и спорта Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 739043; SPIN-код: 6041-2608; ORCID: 0009-0002-6906-4566; e-mail: ukolovav@uigps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Kholoptsev, Dr. (Geogr.), Professor, Professor of the Department of Control and Supervisory Activities, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation (1 Severnaya Street, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972, Russian Federation); RSCI ID: 467295; ORCID: 0000-0002-8293-0062; e-mail: kholoptsev@mail.ru

Roman G. Shubkin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Control and Supervisory Activities, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation (1 Severnaya Street, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972, Russian Federation); RSCI ID: 933202; Scopus AuthorID: 57219485391; SPIN-code: 9283-8798; ORCID: 0000-0002-7661-5162; e-mail: rshubkin@yandex.ru

Alexey N. Baturo, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Control and Supervisory Activities, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation (1 Severnaya Street, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972,

Russian Federation); RSCI ID: 814934; Scopus AuthorID: 58045318600; SPIN-code: 6887-7568; ORCID: 0000-0002-0446-2814

Aleksey V. Ukolov, Cand. Sci. (Pedag.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physical Education and Sports, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); RSCI ID: 739043; SPIN-code: 6041-2608; ORCID: 0009-0002-6906-4566; e-mail: ukolovav@iugps.ru

УДК 556.043+614.8.084

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА Р. ОРЕДЕЖ В РАЙОНЕ Д. ЧИКИНО ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПО ВОДОТРАНСПОРТНЫМ СИСТЕМАМ МЕСТНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Волкова Надежда Александровна^{1, 2}, Шарков Григорий Алексеевич²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Целью исследования являлся анализ изменчивости стока р. Оредеж на основе многолетних данных гидрологических наблюдений (1953–2023 гг.) для оценки безопасности движения по местным водотранспортным системам. В работе использованы статистические методы, включая критерии Стьюдента и Фишера для проверки трендов и однородности данных, а также построение кривых обеспеченности Крицкого — Менкеля. Результаты показали значимый тренд роста среднегодового стока с 3,38 до 4,86 м³/с, что свидетельствует об изменении гидрологического режима реки, вероятно, связанного с климатическими факторами. При этом ряд максимальных расходов оставался статистически стационарным, что указывает на устойчивость экстремальных гидрологических событий. Выявлены два квазистационарных периода (1953–1981 гг. и 1984–1998 гг.), характеризующихся разными нормами стока и сезонным распределением. Для практического применения построена кривая расходов $Q = f(H)$, позволяющая прогнозировать уровни воды в диапазоне от 45 до 181 см. Полученные данные подчеркивают необходимость регулярного обновления гидрологических моделей в условиях меняющегося климата. Результаты исследования могут быть использованы для планирования судоходных маршрутов, оценки рисков подтопления и разработки мер по обеспечению безопасности водного транспорта на р. Оредеж. Работа также демонстрирует важность учета долгосрочных изменений стока при управлении водными ресурсами в регионе.

Ключевые слова: внутренние водные пути, безопасность, сток реки, водный режим, река Оредеж

Для цитирования: Волкова Н. А., Шарков Г. А. Анализ изменчивости стока р. Оредеж в районе д. Чикино для обеспечения безопасности движения по водотранспортным системам местного значения // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 180–194.

ANALYSIS OF RUNOFF VARIABILITY OREDEZH NEAR THE VILLAGE OF CHIKINO TO ENSURE TRAFFIC SAFETY ON LOCAL WATER TRANSPORT SYSTEMS

Nadezhda A. Volkova^{1, 2}, Grigory A. Sharkov²

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The aim of the study was to analyze the variability of the Oredezh River runoff based on long-term hydrological observations (1953–2023) to assess the safety of traffic on local water transport systems. The paper employs statistical methods, including Student's and Fisher's tests for testing trends and data homogeneity, and the construction of Kritsky – Menkel probability curves. The results show a significant upward trend in average annual runoff from 3.38 to 4.86 m³/s, indicating a change in the river's hydrological regime, probably related to climatic factors. At the same time, a number of maximum discharges remained statistically stationary, indicating the stability of extreme hydrological events. Two quasi-stationary periods (1953–1981 and 1984–1998) characterized by different discharge rates and seasonal distributions are identified. For practical use, a discharge curve $Q = f(H)$ is constructed, allowing water levels to be predicted in the range from 45 to 181 cm. The data obtained emphasize the need for regular updating of hydrological models in the face of a changing climate. The results of the study can be used to plan shipping routes, assess flood risks, and develop measures to ensure the safety of water transport on the Oredezh River. The work also demonstrates the importance of taking into account long-term changes in runoff when managing water resources in the region.

Keywords: inland waterways, safety, river runoff, water regime, Oredezh River

For citation: Volkova N. A., Sharkov G. A. Analysis of runoff variability Oredezh near the village of Chikino to ensure traffic safety on local water transport systems // Technosphere safety. 2026. No. 2 (51). P. 180–194.

Введение

Река Оредеж, протекающая в Ленинградской области, играет важную роль в местной экосистеме и потенциально может использоваться для водного транспорта и туризма. Однако в последние десятилетия ее гидрологический режим подвергается изменениям, вызванным как природными факторами (изменение климата, колебания осадков), так и антропогенным воздействием (регулирование стока неработающими ГЭС, загрязнение). В связи с этим актуальной задачей становится анализ изменчивости стока для оценки безопасности судоходства и прогнозирования возможных рисков, таких как обмеление или паводковые явления [1, 2].

В настоящее время водные пути местного значения, включая Оредеж, остаются

недостаточно изученными с точки зрения долгосрочных гидрологических изменений. Прекращение регулярных путевых работ, отсутствие систематического мониторинга и устаревшие данные затрудняют принятие решений по управлению водными ресурсами. Особое значение приобретает исследование динамики стока, включая средние и экстремальные расходы воды, а также их сезонную изменчивость [3].

Целью данной работы является анализ многолетних данных (1953–2023 гг.) по стоку р. Оредеж в районе гидрологического поста д. Чикино с использованием статистических методов и построения кривых обеспеченности. Результаты исследования позволят уточнить гидрологические характеристики реки, оценить влияние климатических изменений на ее режим

и предложить рекомендации по обеспечению безопасности водного транспорта. Полученные данные могут быть использованы при планировании речных перевозок, разработке мер по предотвращению паводков и обновлении нормативной базы для малых водных путей региона.

Физико-географическое описание реки

Оредеж — средняя по площади своего водосбора река, протекающая по территории Ленинградской области через Волосовский, Гатчинский и Лужский районы. Истоком реки является Кюрлевский карьер с площадью зеркала 0,7 км² возле д. Село (Волосовский р-н), а впадает она в реку Луга по правому берегу возле пос. Плоское (Лужский р-н).

Длина реки — 192 км, площадь водосборного бассейна — 3 220 км². Разница в высотных отметках Балтийской системы между истоком и впадением в Лугу составляет примерно 75 м, что дает уклон в 0,00039 ‰. Средние глубины колеблются в интервале 0,5–2 м, а скорость течения — 0,1–0,6 м/с.

Бассейн реки представляет собой слабоволнистую равнину с грядами песчаных холмов. Долина реки здесь — это сглаженная трапеция местами с широкой поймой. Склоны долины местами обрывистые, обнажается слоистая структура песков и песчаников среднего девона, в них встречаются окаменевшие останки фауны — палеозойских рыб. Песчаники имеют многоярусную слоистость потокового и руслового типа, они слабо сцементированы и имеют тонкие прослойки красных и бурых глин.

Берега Оредежа покрывают луга и рощи, растут смешанные леса (сосна, береза,

осина, ель, ольха, орешник, рябина и черемуха). У воды и на поймах — заросли тростника и камыша, на поверхности воды есть кувшинки и кубышки.

По химическому составу вода в Оредеже слабощелочная, гидрокарбонатный класс (группа кальция), минерализация 180–280 мг/л, радиоактивна. В среднем прозрачность до двух метров. Загрязняется за счет сточных вод вдоль всего русла. Река непригодна для питья и приготовления пищи из-за превышенных норм ПДК и наличия вредоносных бактерий, количество которых возрастает по мере движения вниз по течению.

В верхнем течении ширина колеблется от 15 до 20 м, а в среднем и нижнем — повышается до 30–40 м. В нижнем течении русло реки проходит по древней речной долине, где образовались проточные русловые озера Антоново, Дорогань и Хвойлово (Хвойное). Антоново имеет площадь 2,4 км², Дорогань — 0,6 км², а Хвойное — 2,4 км² [4–6].

Гидрологический режим Оредежа обуславливается зарегулированностью каскадом из семи неработающих ГЭС, равнинным типом и смешанным питанием реки с преобладанием подземного и снежного. В верховьях существенную долю питания оказывают карстовые воды.

Ледостав начинается в конце ноября — начале января, вскрывается в апреле. Во время теплых зим река может не замерзать. Дно Оредежа песчаное с тонким слоем ила в верхнем течении, а также встречаются редкие камни или каменистые гряды [5].

Данные за многолетний период о режиме Оредежа получены из наблюдений на гидрологическом посту «д. Чикино» (ранее «Даймищенская ГЭС») в д. Чикино. (рис. 1, 2).



Рис. 1. Участок реки Оредеж с указанием створа д. Чикино, рисунок авторский на основе карт [7]

Fig. 1. Section of the Oredezh River with the village of Chikino indicated, authors' drawing based on maps [7]

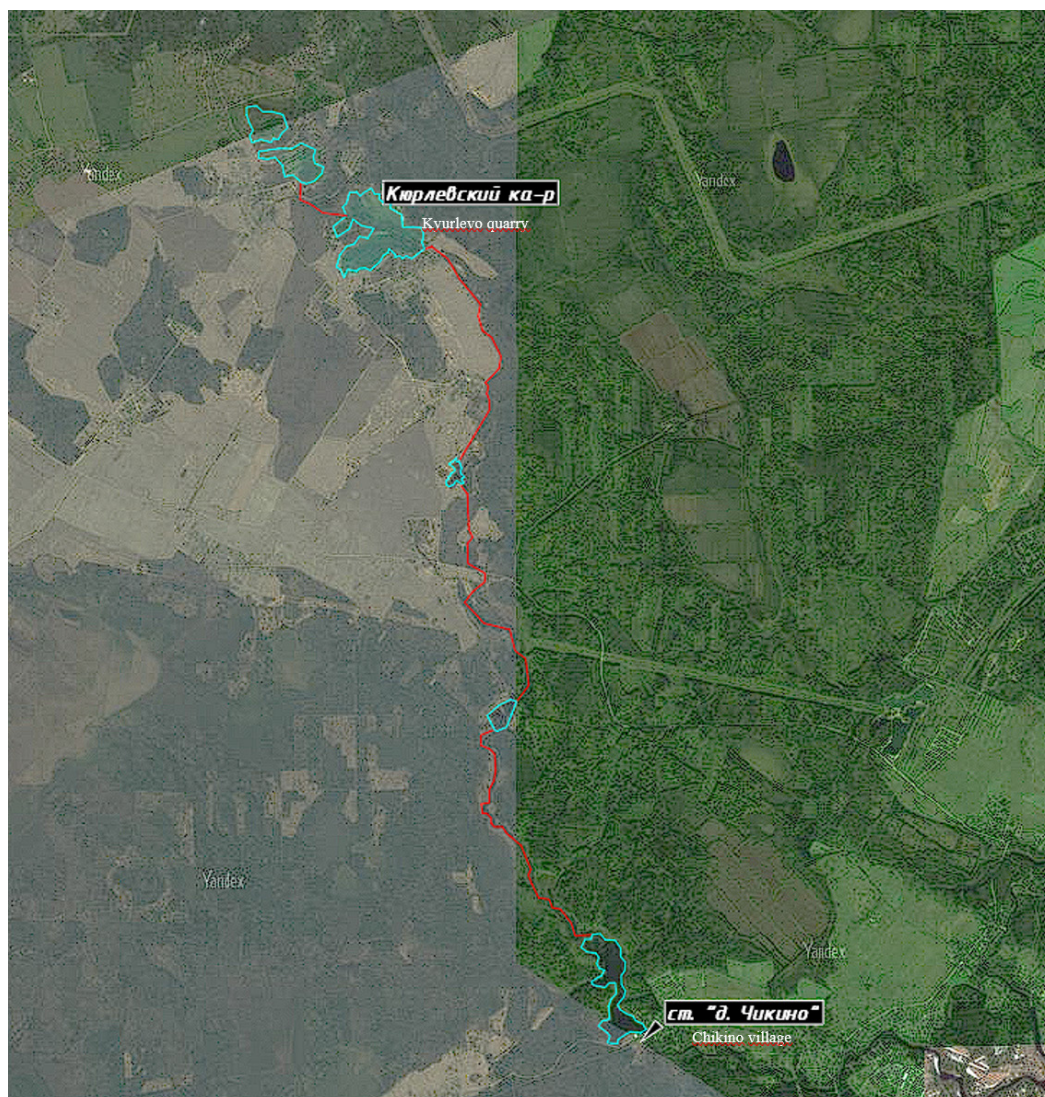


Рис. 2. Часть реки Оредеж до створа д. Чикино с изображением истока — Кюрлевского карьера, рисунок авторский на основе карт [7]

Fig. 2. Part of the Oredezh River up to the village of Chikino with an image of the source — the Kyurlevsky quarry, authors' drawing based on maps [7]

Пост располагается в нижнем бьефе Чикинской ГЭС в 30 м от водопропускного шлюза, в 177 км от места впадения в Лугу и работает с 1 апреля 1952 г. по сей день [4, 8]. Код поста 72585. Площадь водосбора в исследуемом створе — 453 км². Отметка нуля поста — 91,11 м Балтийской системы высот (БС) [9, 10]. Объект принадлежит Северо-Западному управлению по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Река довольно извилистая, присутствуют участки с характерными признаками практически всех типов русловых процессов. Ее общий коэффициент извилистости — 2,78. На участке расположения створа (нижний бьеф Чикинской ГЭС) есть русловая много рукавность.

Методика исследования и фактический материал

В основу исследования легли многолетние данные гидрологических наблюдений на посту д. Чикино:

- 1) ежедневные данные уровней и расходов воды за 1953–2023 гг.;

- 2) среднегодовые и максимальные расходы воды по данным [11, 12];

- 3) картографические материалы (топокарты, спутниковые снимки).

Методы исследования:

1. Статистический анализ временных рядов: проверка однородности рядов (критерии Стьюдента и Фишера), выявление трендов, расчет основных статистических характеристик (средние значения, коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s).
2. Гидрологические расчеты: построение кривых обеспеченности Крицкого — Менкеля, разделение на квазистационарные периоды, анализ внутригодового распределения стока.
3. Графические методы: построение гидрографов и кривых расходов $Q = f(H)$.

Результаты исследований

Для анализа рядов среднегодовых и максимальных расходов воды собраны данные из гидрологических ежегодников [11, 12] за период 1953–2023 гг. На графике среднегодовых расходов воды (рис. 3) виден положительный тренд.

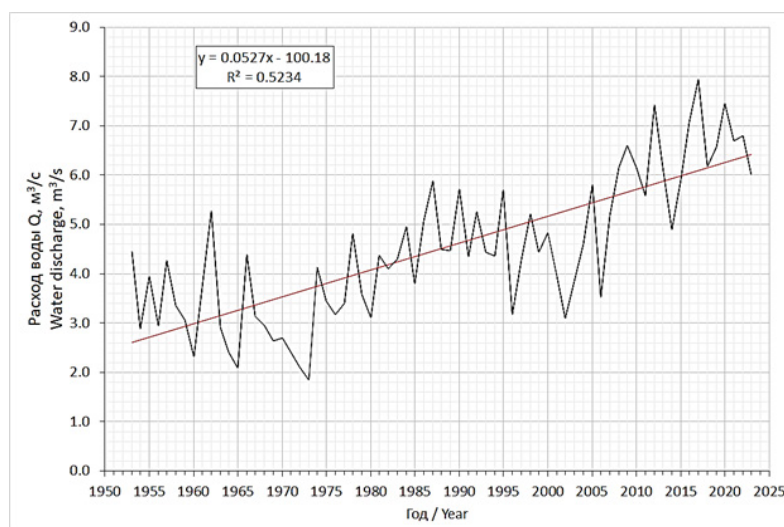


Рис. 3. График среднегодовых расходов воды р. Оредеж — д. Чикино (1953–2023 гг.)

Fig. 3. Graph of average annual water flow rates of the Oredezh River — Chikino village (1953–2023)

Анализ временного ряда среднемесячных расходов воды за период с 1953 г. по 2023 г. выявил наличие статистически значимой неоднородности. Критерий Петтитта (рис. 4) показал, что в 1986 г. произошла точка изменения режима стока ($p\text{-value} < 0,05$).

На рис. 4а представлен хронологический график хода среднегодовых расходов с точкой перелома (1986 г.) и со средними значениями до и после 1986 г. На рис. 4б и 4в представлено сравнение распределений до и после 1986 г.

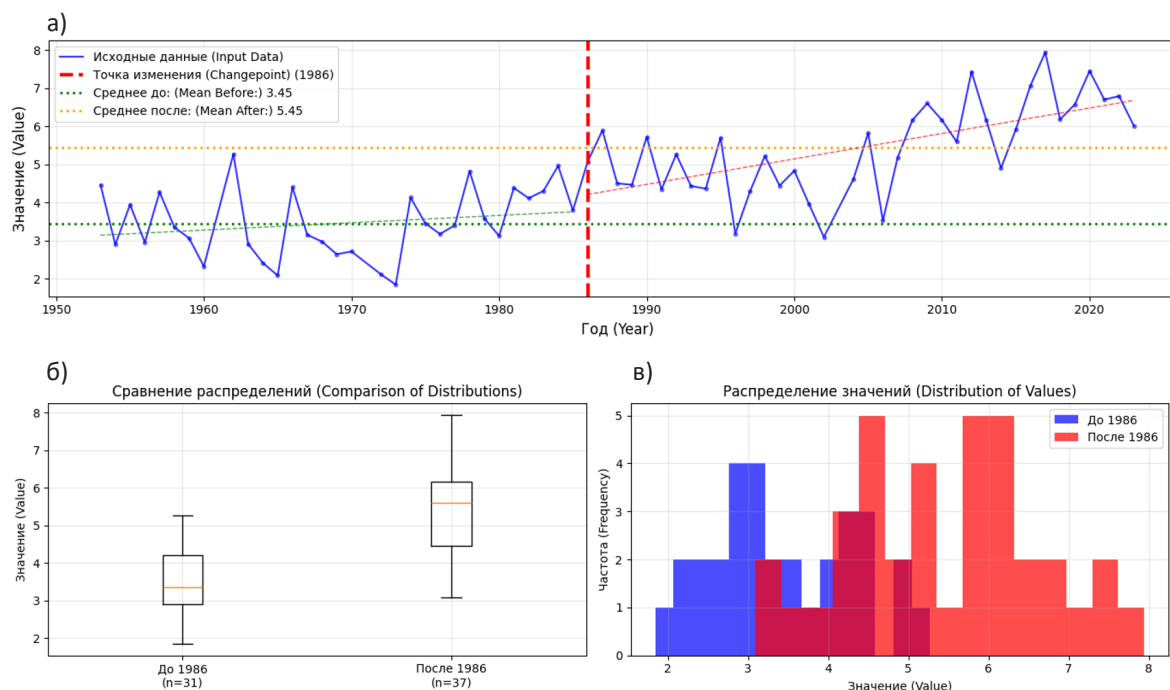


Рис. 4. Результаты использования критерия Петтитта для среднегодовых расходов воды р. Оредеж — д. Чикино (1953–2023 гг.)

Fig. 4. Results of using the Pettitt criterion for average annual water flow rates of the Oredezh River — Chikino village (1953–2023)

Расчет средних значений стока для выявленных периодов демонстрирует существенный рост водности р. Оредеж после 1986 г. (рис. 4б). Так, средний расход воды в период с 1953 г. по 1985 г. составлял $3,45 \text{ м}^3/\text{с}$, тогда как в последующий период, с 1987 г. по 2023 г., этот показатель увеличился до $5,45 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, абсолютный прирост составил $2,00 \text{ м}^3/\text{с}$, а относительное увеличение среднемесячного стока достигло 57,8%. Данное изменение может быть связано с комплексом природных и антропогенных факторов, таких как колебания климата, повлиявших на количество осадков и характер таяния снега, а также возможные антропогенные изменения в бассейне реки.

На р. Оредеж есть каскад водопропускных сооружений — семь выведенных из эксплуатации ГЭС. В одной из таких ГЭС в д. Чикино в 2010 г. сменили шлюз, что также повлияло на сток воды из водохранилища, а также появление ледовых явлений. Из-за принципиально иной работы водопропускного сооружения в д. Чикино вода в нижний бьеф поступает, не переливаясь через стенку шлюза, а происходит истечение из-под щита. Из-за обратной температурной стратификации поступающая в русло вода создает полынью в несколько километров.

Из данных графика (рис. 5) следует, что половодье Оредежа плавное и имеет продолжительный спад. Начинается в марте-

апреле и длится вплоть до сентября-октября, когда среднеемноголетний расход воды

выходит на норму зимней межени, в данном случае — с ноября по март.

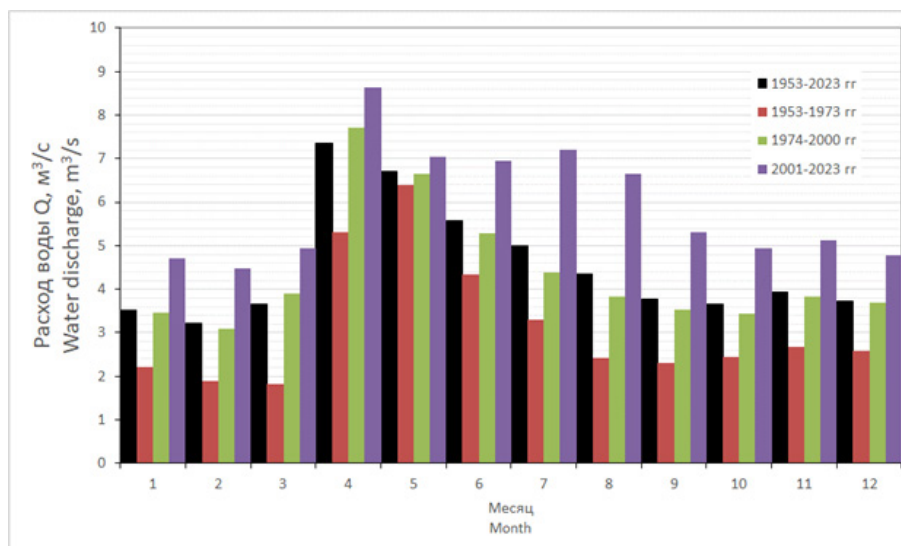


Рис. 5. Гистограмма среднемесячных многолетних расходов воды р. Оредеж — д. Чикино (1953–2023 гг.)

Fig. 5. Histogram of average monthly long-term water discharges of the Oredezh River — Chikino village (1953–2023)

Анализ графика среднемесячных расходов воды р. Оредеж (д. Чикино) (рис. 5):

1. Общая динамика за весь период (1953–2023 гг.) показывает четко выраженный весенний паводок в апреле ($7,31 \text{ м}^3/\text{с}$) с постепенным спадом к осени, второстепенный максимум в ноябре ($3,91 \text{ м}^3/\text{с}$), вероятно связанный с осенними дождями, минимальные расходы в феврале ($3,19 \text{ м}^3/\text{с}$).

2. Сравнительный анализ периодов:

- а) 1953–1973 гг. (ранний период): резко выраженный пик половодья в апреле-мае ($5,32$ – $6,40 \text{ м}^3/\text{с}$), ярко выраженная летне-осенняя межень ($2,31$ – $3,29 \text{ м}^3/\text{с}$), минимальные значения в феврале-марте ($1,90$ – $1,83 \text{ м}^3/\text{с}$);
- б) 1974–2000 гг. (средний период): увеличение стока во все месяцы на 30–60 % по сравнению с предыдущим периодом, сохранение аналогичного внутригодового распределения, появление более выраженного осеннего подъема;

- с) 2001–2023 гг. (современный период): резкий рост расходов во все месяцы (в 1,5–2,5 раза по сравнению с 1953–1973 гг.), сглаживание сезонных различий — разница между максимальным и минимальным расходами сократилась с 4,5 до $3,8 \text{ м}^3/\text{с}$, появление летнего максимума (июль — $7,15 \text{ м}^3/\text{с}$), значительное увеличение зимних расходов ($4,46$ – $5,15 \text{ м}^3/\text{с}$).

3. Основные изменения представляют собой абсолютный рост стока во все месяцы, особенно в зимний период (февральский расход вырос в 2,3 раза), изменение сезонного распределения, т. е. смещение максимума с апреля-мая на апрель-июль, уменьшение амплитуды сезонных колебаний, исчезновение выраженной летней межени.

Возможными причинами изменений являются климатические (увеличение зимних температур и дождевого питания) и антропогенные (изменение режима работы ГЭС, водозаборов), также возможны изменения

на водосборном бассейне (залесенность, мелиорации).

Следовательно, подтверждается гипотеза об увеличении меженного стока в условиях изменения климата.

Данные рис. 5 демонстрируют трансформацию гидрологического режима р. Оредеж за последние 70 лет, что требует дальнейшего изучения причин и последствий этих изменений.

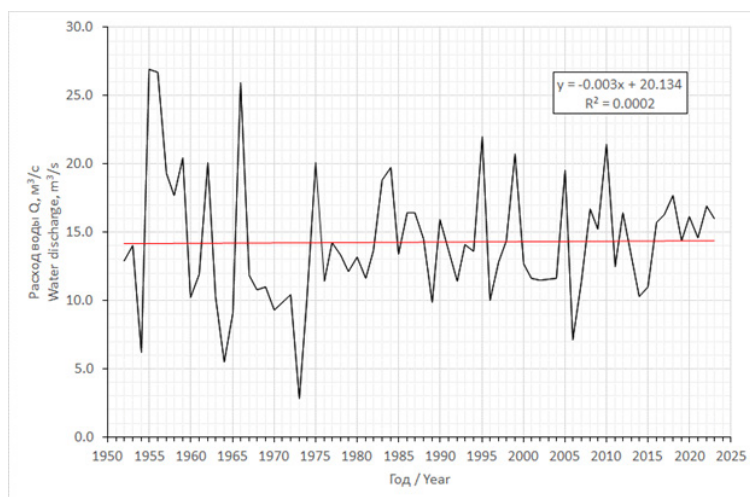


Рис. 6. График максимальных расходов воды р. Оредеж — д. Чикино (1952–2023 гг.)

Fig. 6. Graph of maximum water flow rates of the Oredezh River — Chikino village (1952–2023)

На рис. 6 представлен график максимальных расходов воды.

По графику (рис. 6) видно, что с начала наблюдений до примерно 1975 г. дисперсия ряда значительно превышает дисперсию за период 1976–2023 гг., в 4,3 раза. При этом отношение средних значений между теми же временными промежутками времени равно 0,98.

Оценка данного ряда на наличие тренда показала, что таковой отсутствует, и ряд

является статистически стационарным. Рассчитанные значения приведены в табл. 1.

Гистограмма (рис. 7) описывает внутригодовое распределение максимальных расходов воды за многолетний период.

Перед тем как рассчитать расходы различной обеспеченности, ряды исходных данных проверены на значимость линейного тренда (табл. 1). Для среднегодовых расходов тренд оказался значимым.

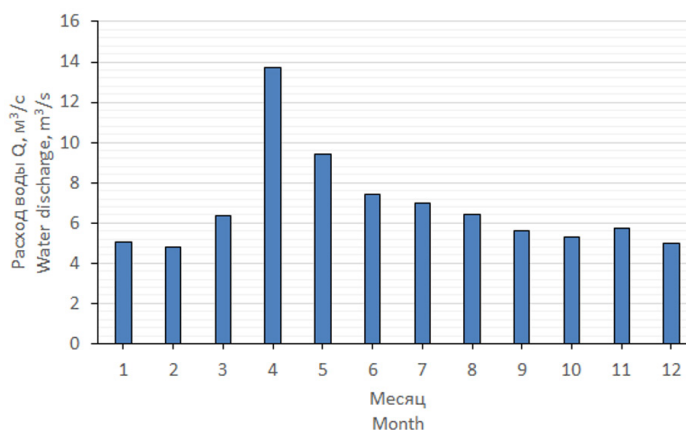


Рис. 7. Гистограмма осредненных по месяцам максимальных расходов воды р. Оредеж — д. Чикино (1976–2023 гг.)

Fig. 7. Histogram of monthly average maximum water discharges of the Oredezh River — Chikino village (1976–2023)

Таблица 1
Сводная таблица оценки линейного тренда рядов данных

Table 1

Summary table of linear trend estimation for data series

Ряд данных A set of data	R/σ_R	$t_{2\alpha\%}$	Тренд Trend
среднегодовых расходов average annual water discharge	12,24	2	значим significant
максимальных расходов maximum water discharge	–0,1	2	не значим insignificant

Проверка рядов на однородность проведена с использованием критериев Фишера и Стьюдента. Если расчетное значение этих статистик ($F_{2\alpha\%}$ и $t_{2\alpha\%}$) при уровне значимости

2α , равном 5 %, превышает критическое значение (F^* и $|t^*|$), то гипотеза об однородности ряда не опровергается. Рассчитанные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2
Сводная таблица оценки однородности рядов данных

Table 2

Summary table of the homogeneity assessment of data series

Ряд данных A set of data	$ t^* $	$t_{2\alpha\%}$	Гипотеза Hypothesis	F^*	$F_{2\alpha\%}$	Гипотеза Hypothesis
среднегодовых расходов average annual water discharge	–5,75	1,67	опров. is rejected	1,24	2,03	опров. is rejected
максимальных расходов maximum water discharge	–0,12	2	опров. is rejected	2	2,02	не опров. is not rejected

Для получения расходов различной обеспеченности построены аналитические кривые, согласно СП 529.1325800.2023 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик».

Согласно п. 5.1.1 СП 529.1325800.2023, «продолжительность периода наблюдений считают достаточной, если рассматриваемый период репрезентативен, а относительная средняя квадратическая погрешность расчетного значения исследуемой гидроло-

гической характеристики не превышает 10 % для годового и сезонного стоков и 20 % — для максимального и минимального стоков». Соответственно, в рассматриваемом случае (табл. 3) продолжительность периода наблюдений достаточна.

Для построения аналитической кривой использованы ординаты Крицкого — Менкеля. Полученные значения представлены в табл. 4.

По данным табл. 4 построены аналитические кривые (рис. 8, 9).

Таблица 3
Основные статистические характеристики

Table 3
Main statistical characteristics

Ряд данных A set of data	n	Q_{cp} , м ³ /с	C_v	C_s	C_s/C_v	ϵQ_{cp} , %	ϵC_v , %	ϵC_s , %
среднегодовых расходов average annual water discharge	67	4,51	0,32	0,30	0,94	4,0	9,0	115
максимальных расходов maximum water discharge	69	14,3	0,33	0,56	1,67	4,1	9,0	164

Таблица 4
Ординаты кривой Критского — Менкеля для среднегодовых расходов
р. Оредеж — д. Чикино ($Q_{cp} = 4,51$ м³/с, $C_v = 0,32$, $C_s/C_v = 1$) и для максимальных расходов
($Q_{cp} = 14,3$ м³/с, $C_v = 0,33$, $C_s/C_v = 2$)

Table 4
Ordinates of the Kritsky — Menkel curve for average annual discharges of the Oredezh River — Chikino village ($Q_{cp} = 4,51$ м³/с, $C_v = 0,32$, $C_s/C_v = 1$) and for maximum discharges ($Q_{cp} = 14,3$ м³/с, $C_v = 0,33$, $C_s/C_v = 2$)

P , %	0,01	0,1	1	5	10	25	50	75	90	95	99	99,9
k_p , %	2,35	2,11	1,82	1,56	1,43	1,21	0,98	0,77	0,60	0,50	0,35	0,22
Среднегодовые расходы, м ³ /с Average annual water discharge, м ³ /с												
Q_p	10,6	9,46	8,16	7,00	6,42	5,45	4,41	3,46	2,69	2,27	1,58	0,98
Максимальные расходы, м ³ /с Maximum water discharge, м ³ /с												
Q_p	39,0	33,5	27,5	22,8	20,6	17,0	13,9	10,8	8,61	7,50	5,59	3,95



Рис. 8. Аналитическая кривая Критского — Менкеля среднегодовых расходов р. Оредеж — д. Чикино;
 $Q_{cp} = 4,51$ м³/с, $C_v = 0,32$, $C_s/C_v = 1$

Fig. 8. Analytical curve of Kritsky — Menkel average annual discharge of the Oredezh River — Chikino village;
 $Q_{cp} = 4,51$ м³/с, $C_v = 0,32$, $C_s/C_v = 1$

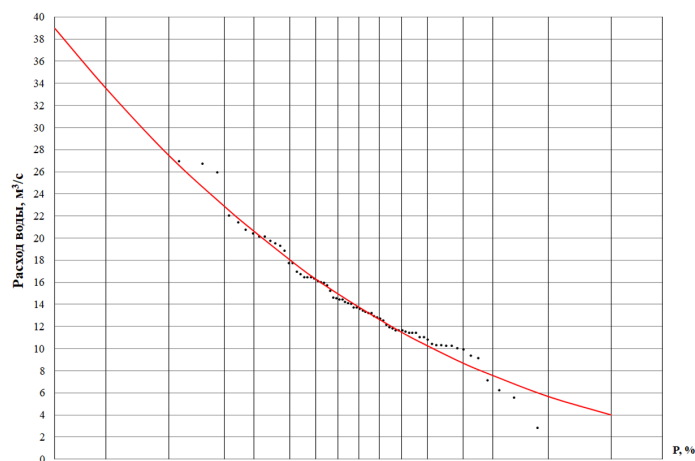


Рис. 9. Кривая Крицкого — Менкеля максимальных расходов р. Оредеж — д. Чикино; $Q_{cp} = 14,3 \text{ м}^3/\text{с}$, $C_v = 0,33$, $C_s/C_v = 2$
 Fig. 9. Kritsky — Menkel curve of maximum discharges of the Oredezh River — Chikino village; $Q_{cp} = 14,3 \text{ м}^3/\text{с}$, $C_v = 0,33$, $C_s/C_v = 2$

Для обеспечения безопасности движения по воднотранспортным системам местного значения помимо знания о расходах воды необходимо иметь представление и об уровнях воды. Соответственно, строится кривая расходов $Q = f(H)$, связывающая расходы и уровни воды.

Кривая расходов строится по эмпирическим данным и экстраполируется по необхо-

димости до фактических зафиксированных максимальных значений уровня или расхода.

На рис. 10 приведена кривая $Q = f(H)$ за 2020 г., продленная до максимального измеренного за весь период наблюдений значения расхода воды методом линейной тенденции (экстраполяции).

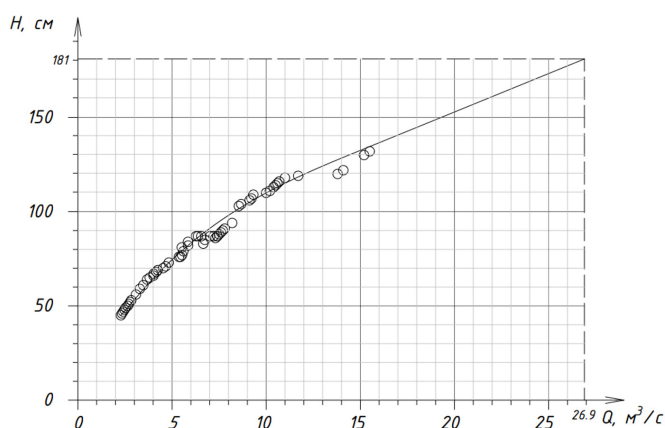


Рис. 10. Кривая $Q = f(H)$ р. Оредеж — д. Чикино за 2020 г. (исторический максимум в $26,9 \text{ м}^3/\text{с}$ наблюдался в 1955 г.)
 Fig. 10. Curve $Q = f(H)$ r. Oredezh — village Chikino for 2020 (the historical maximum of $26,9 \text{ м}^3/\text{с}$ was observed in 1955)

Обсуждение результатов

Проведенный анализ многолетней динамики стока р. Оредеж выявил ряд важных закономерностей, имеющих практическое значение для управления водными ресурсами и обеспечения безопасности водного транспорта.

1. Установленный положительный тренд роста среднегодовых расходов воды (с $3,45$ до $5,45 \text{ м}^3/\text{с}$) согласуется с общерегиональными климатическими изменениями, отмечаемыми в последние десятилетия. Увеличение зимних температур и изменение режима осадков привели к перераспределению источников

питания реки — росту доли дождевого стока и уменьшению роли снежного питания. Выделенные квазистационарные периоды (1953–1986 гг. и 1987–2023 гг.) демонстрируют различный характер внутригодового распределения стока, что требует уточнения нормативов водопользования.

2. Отсутствие статистически значимого тренда в рядах максимальных расходов ($14,3 \text{ м}^3/\text{с}$ в среднем) указывает на сохранение устойчивости к экстремальным гидрологическим явлениям.

3. Смещение максимума половодья с апреля на май и увеличение продолжительности периода повышенных расходов требуют корректировки сроков навигации и противопаводковых мероприятий. Установленное увеличение меженных расходов в 1,53 раза улучшает условия для малого судоходства в летне-осенний период.

4. Реконструкция сооружений Чикинской ГЭС в 2010 г. привела к изменению термического режима реки (появление протяженных полыней), что требует дополнительного изучения. Прекращение регулярного дноуглубления и расчистки русла увеличивает риски для судоходства на отдельных участках.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными других исследователей по малым рекам Северо-Запада России [13], подтверждая общую тенденцию изменения гидрологического режима под влиянием климатических факторов. Однако выявленные особенности стока р. Оредеж, связанные с геологическим строением бассейна и наличием каскада ГЭС, подчеркивают необходимость индивидуального подхода к управлению ее водными ресурсами.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных данных для планирования сроков навигации, оценки влияния климатических изменений на водный режим реки.

Перспективным направлением дальнейших исследований является детальное моделирование гидрологического режима с учетом прогнозных климатических сценариев и антропогенной нагрузки.

Заключение

Проведенное исследование изменчивости стока р. Оредеж в районе гидрологического поста д. Чикино за 1953–2022 гг. позволило получить следующие основные результаты:

1. Выявлен статистически значимый положительный тренд среднегодовых расходов воды с увеличением с $3,45$ до $5,45 \text{ м}^3/\text{с}$, что свидетельствует об изменении гидрологического режима реки под влиянием климатических факторов.
2. Установлено наличие двух квазистационарных периодов (1953–1986 гг. и 1987–2023 гг.) с различными характеристиками стока, что требует дифференцированного подхода к нормированию водопользования.
3. Максимальные расходы воды сохраняют стационарность (в среднем $14,2 \text{ м}^3/\text{с}$).
4. Произошло смещение максимума половодья с апреля на май и увеличение продолжительности периода повышенных расходов, что необходимо учитывать при планировании навигации и противопаводковых мероприятий.
5. Влияние антропогенных факторов (реконструкция Чикинской ГЭС, прекращение

дноуглубительных работ) проявляется в изменении термического режима и увеличении рисков для судоходства.

Для более точного прогнозирования изменений стока в будущем рекомендуется

продолжить исследования с использованием климатических моделей и расширенного мониторинга гидрологических характеристик. Особое внимание следует уделить оценке влияния антропогенных факторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О проблемной ситуации планирования мероприятий по уменьшению ущерба и реагированию на чрезвычайные ситуации в паводкоопасный период на территории субъекта Российской Федерации / А. В. Дмитриев [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 132–138. EDN: WCZTUO.

2. Особенности обеспечения техносферной безопасности объектов и населенных пунктов в условиях ухудшения паводковой обстановки / Е. Н. Неверов [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 115–131. EDN: EIOJXZ.

3. Статистический анализ чрезвычайных ситуаций природного характера в мире и на территории Российской Федерации / Д. С. Королев [и др.] // Техносферная безопасность. 2023. № 3 (40). С. 131–138. EDN: LYFQBM.

4. Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т. 2. Карелия и Северо-Запад / З. М. Иванов [и др.]. Л., 1978. 661 с.

5. Журавлев С. А., Бузмаков С. В. Оценка максимальных расходов воды весеннего половодья малых рек Северо-Запада в условиях нестационарности климата (на примере р. Тихвинки) // В мире научных открытий. 2015. № 12-2 (72). С. 618–628. EDN: VQZMGJ.

6. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Вып. 5, 7. Л., 1986, 1987.

7. Спутниковые снимки (Яндекс.Карты). URL: <https://clck.su/SUvwD> (дата обращения: 14.10.2025).

8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2, Ч. 1. Карелия и Северо-Запад. Л., 1972. 528 с.

9. Оредеж. URL: <https://clck.su/DleDy> (дата обращения: 14.10.2025).

10. Список гидрологических постов на реках, ручьях, каналах, среднесуточные уровни воды, среднегодовые и максимальные расходы воды по УГМС. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505> (дата обращения: 01.09.2025).

11. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 01.09.2025).

12. Гидрологические ежегодники. Т. 1. Карелия и Северо-Запад. Л., 1953–2006.

13. Лемешко Н. А., Шалашина Т. Л. Особенности гидрологического режима малых незарегулированных рек Северо-Запада России // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 314–324. EDN: OSAGLZ.

REFERENCES

1. On the Problematic Situation of Planning Measures to Reduce Damage and Response to Emergencies during the Flood-Prone Period in the Territory of a Subject of the Russian Federation / A. V. Dmitriev et al. // *Technosphere Safety*. 2024. No. 4 (45). P. 132–138. EDN: WCZTUO.
2. Features of Ensuring Technospheric Safety of Facilities and Settlements in Conditions of Worsening Flood Situations / E. N. Neverov et al. // *Technosphere Safety*. 2024. No. 4 (45). P. 115–131. EDN: EIOJXZ.
3. Statistical analysis of natural disasters in the world and in the Russian Federation / D. S. Korolev et al. // *Technosphere safety*. 2023. No. 3 (40). P. 131–138. EDN: LYFQBM.
4. State Water Cadastre. Main hydrological characteristics. T. 2. Karelia and the North-West / Z. M. Ivanov et al. Leningrad, 1978. 661 p.
5. Zhuravlev S. A., Buzmakov S. V. Assessment of maximum water discharges of spring floods of small rivers in the North-West under non-stationary climate conditions (using the Tikhvinka River as an example) // *In the world of scientific discoveries*. 2015. No. 12-2 (72). P. 618–628. EDN: VQZMGJ.
6. Long-term data on the regime and resources of surface waters of land. T. 2. Karelia and the North-West. Iss. 5, 7. Leningrad, 1986, 1987.
7. Satellite images (Yandex.Maps). URL: <https://clck.su/SUvwD> (accessed 14.10.2025).
8. Surface water resources of the USSR. Vol. 2. Part 1. Karelia and the North-West. Leningrad, 1972. 528 p.
9. Oredzh. URL: <https://clck.su/DleDy> (accessed 14.10.2025).
10. List of hydrological posts on rivers, streams, canals, average daily water levels, average annual and maximum water discharges according to UGMS. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505> (accessed 01.09.2025).
11. Automated Information System for State Monitoring of Water Bodies. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (accessed 01.09.2025).
12. Hydrological yearbooks. T. 1. Karelia and the North-West. Leningrad, 1953–2006.
13. Lemeshko N. A., Shalashina T. L. Features of the hydrological regime of small unregulated rivers of the North-West of Russia // *Questions of geography*. 2018. No. 145. P. 314–324. EDN: OSAGLZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волкова Надежда Александровна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры водно-технических изысканий Российского государственного гидрометеорологического университета (192007, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79); старший научный сотрудник Арктического и антарктического научно-исследовательского института (199397, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38); РИНЦ ID: 719765; ResearcherID: NBX-9467-2025; ORCID: 0000-0002-9272-4713; e-mail: navolkova@aari.ru

Шарков Григорий Алексеевич, инженер Арктического и антарктического научно-исследовательского института (199397, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38); РИНЦ ID: 1294566; e-mail: grisha.sharkov321321@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda A. Volkova, Cand. Sci. (Phys. & Maths.), Associate Professor of Department of Water Engineering Surveys, Russian State Hydrometeorological University (79 Voronezhskaya Street, St. Petersburg, 192007, Russian Federation); Senior Researcher of Arctic and Antarctic Research Institute (38 Bering Street, St. Petersburg, 199397, Russian Federation); RSCI ID: 719765; ResearcherID: NBX-9467-2025; ORCID: 0000-0002-9272-4713; e-mail: navolkova@aari.ru

Grigory A. Sharkov, Engineer of Federal State Budgetary Institution "Arctic and Antarctic Research Institute" (38 Bering Street, St. Petersburg, 199397, Russian Federation); RSCI ID: 1294566; e-mail: grisha.sharkov321321@mail.ru

