

ISSN 1998-8990

НАУЧНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
**ПРОБЛЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ
В ТЕХНОСФЕРЕ**
PROBLEMS OF TECHNOSPHERE RISK MANAGEMENT
№ 2 (78)–2026

Редакционный совет

Ложкин В.Н.
Председатель

д.т.н., проф., засл. деятель науки Рос. Федерации,
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Санкт-Петербург, Россия

Ложкина О.В.
Заместитель председателя

д.т.н., к.х.н., проф., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС
России, Санкт-Петербург, Россия

Шарипханов С.Д.

д.т.н., ассоциированный проф. (доц.), Академия гражданской защиты
им. М. Габдуллина Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Казахстан, г. Кокшетау, Республика Казахстан

Актерский Ю.Е.

д.в.н., проф., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Санкт-Петербург, Россия

Терехин С.Н.

д.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Санкт-Петербург, Россия

Малыгин И.Г.

д.т.н., проф., Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Евтюков С.С.

д.т.н., доц., Санкт-Петербургский архитектурно-строительный
университет, Санкт-Петербург, Россия

Калач А.В.

д.х.н., проф., Воронежский институт федеральной службы исполнения
наказаний России, Воронеж, Россия

Рудаков О.Б.

д.х.н., проф., Воронежский государственный технический
университет, Воронеж, Россия

Локтев А.А.

д.ф.-м.н., проф., Российский университет транспорта,
Москва, Россия

Сафарзода Б.А.

д.ю.н., проф., Совет Межпарламентской Ассамблеи – полномочный
представитель Маджлиси Оли Республики Таджикистан в МПА СНГ
и ПА ОДКБ, Республика Таджикистан

Макаров О.С.

д.ю.н., доц., Белорусский институт стратегических исследований,
г. Минск, Республика Беларусь

Ковалева Н.В.

д.ю.н., доц., Государственный университет управления, Академия
управления МВД России, Москва, Россия

Агаев Гюлоглан Али оглы	д.ю.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
Антонов А.А.	д.ю.н., доц., Санкт-Петербургский университет МВД России, Санкт-Петербург, Россия
Готчина Л.В.	д.ю.н., к.с.н., Санкт-Петербургская академия Следственного комитета Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия
Винокуров В.А.	д.ю.н., доц., засл. юрист Рос. Федерации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Ишеков К.А.	д.ю.н., доц., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Хлебушкин А.Г.	д.ю.н., доц., Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия
Мрачкова Ева	д.т.н., Технический университет, г. Зволэн, Республика Словакия
Мухаммед Халил Абузалата	проф., Университет прикладных наук Аль-Балка; Арабский университетский технологический колледж, Иордания
Медведева Л.В.	д.п.н., проф., засл. работник высш. шк. Рос. Федерации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Редакционная коллегия

Моторыгин Ю.Д. <i>Председатель</i>	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Горбунов А.А.	к.в.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Королева Л.А.	д.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Фомин А.В.	к.т.н., проф., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Шидловский Г.Л.	к.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Сытдыков М.Р.	к.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия



Editorial council

Lozhkin V.N. <i>Chairman</i>	DSc, prof., honored scientist of the Russian Federation, Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Lozhkina O.V. <i>Deputy chairman</i>	DSc, PhD, prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Sharipkhanov S.D.	DSc, associate prof., M. Gabdullin academy of civil protection of EMERCOM of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Republic of Kazakhstan
Akterskiy Yu.E.	DSc, prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Terekhin S.N.	DSc, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Malygin I.G.	DSc, prof., N.S. Solomenko institute of transport problems of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia
Evtukov S.S.	DSc, associate prof., Saint-Petersburg university of architecture and civil engineering, Saint-Petersburg, Russia
Kalach A.V.	DSc, prof., Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia, Voronezh, Russia
Rudakov O.B.	DSc, prof., Voronezh state technical university, Voronezh, Russia
Loktev A.A.	DSc, prof., Russian university of transport, Saint-Petersburg, Russia
Safarzoda B.A.	DSc, prof., Council of the Inter-Parliamentary Assembly – plenipotentiary representative of the Majlisi Oli of the Republic of Tajikistan in the IPA CIS and PA CSTO, Republic of Tajikistan
Makarov O.S.	DSc, associate prof., Belarusian institute of strategic studies, Minsk, Republic of Belarus
Kovaleva N.V.	DSc, associate prof., State university of management, Academy of management of the Ministry of internal affairs of Russia, Moscow, Russia
Agayev Guloglan Ali ogly	DSc, prof., Saint-Petersburg State university of aerospace instrumentation, Saint-Petersburg, Russia
Antonov A.A.	DSc, associate prof., Saint-Petersburg university of the Ministry of internal affairs of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Gotchina L.V.	DSc, PhD, prof., Saint-Petersburg academy of the investigative committee of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia
Vinokurov V.A.	DSc, associate prof., honored lawyer of the Russian Federation, Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Ishekov K.A.	DSc, associate prof., Lomonosov Moscow state university, Moscow, Russia
Khlebushkin A.G.	DSc, associate prof., Saint-Petersburg state university of economics, Saint-Petersburg, Russia
Mrachkova Eva	DSc, Technical university, Zvolen, Republic of Slovakia

Mohammed Khalil Abuzalata

prof., Al-Balqa university of applied sciences; Arab university college of technology, Jordan

Medvedeva L.V.

Secretary

DSc, prof., honored worker of the higher school of the Russian Federation, Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

Editorial board

Onov V.A.

Chairman

PhD, associate prof., Saint-Petersburg branch of the Russian customs academy, Saint-Petersburg, Russia

Motorygin Yu.D.

DSc, prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

Gorbunov A.A.

PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

Koroleva L.A.

DSc, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

Fomin A.V.

PhD, prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

Shidlovskiy G.L.

PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

Sytdykov M.R.

Secretary

PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

**Журнал «Проблемы управления рисками в техносфере» включен
в Научную электронную библиотеку eLibrary.ru.
Решением ВАК журнал включен в Перечень периодических научных и научно-технических
изданий, в которых рекомендуется публикация материалов, учитывающихся при защите
диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.
Периодичность издания журнала – ежеквартальная**

СОДЕРЖАНИЕ

СНИЖЕНИЕ РИСКОВ И ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧС

Будыкина Т.А., Коваль Ю.Н. Поиск оптимальных температурных режимов термической утилизации полимерного сорбента, насыщенного нефтью	8
Малыгин И.Г., Рогозинский Г.Г. Моделирование звуковых ландшафтов в системе управления при проведении аварийно-спасательных работ	20
Ложкина О.В. Обзор канадских исследований в области предупреждения, прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций – природных пожаров	31
Смирнов А.С., Юрченко Р.А. Применение беспилотных авиационных систем в поддержке принятия решений при чрезвычайных ситуациях: патентный и публикационный анализ	45
Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В. Современные программные продукты для моделирования динамики снежных лавин и их взаимодействия со строениями	56
Ложкин В.Н. Риск-ориентированная методология прогнозирования ущерба от чрезвычайно опасного загрязнения воздуха транспортом в Санкт-Петербурге	68
Гарелина С.А., Любкин Р.Н., Сысоев Д.О. Комплексная риск-ориентированная методика обоснования рациональных параметров системы организации поверки средств измерений в МЧС России	80
Карпова Ж.В., Яхеев В.В., Актерский Ю.Е. Предотвращение чрезвычайных ситуаций, вызываемых селями, путем создания аккумуляционных зон и добычей из них строительных материалов	91

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Хафизов И.Ф., Попова Е.В., Сафаргалин А.Р. Разработка модульного пеногенератора с регулируемыми параметрами	102
Зелинская И.А., Иванов А.В. Исследование влияния углеродных наномодификаторов на термическую стабильность материала верха боевой одежды пожарного	112
Синешук Ю.И., Терехин С.Н., Немчинов М.С. Способы повышения надежности роботизированных установок пожаротушения	120
Кожевин Д.Ф., Естехин В.Г. Применение мощности теплопоглощения огнетушащего вещества как критерия при оснащении судов огнетушителями	130
Астахина Ю.А., Королева Л.А. Многокритериальная оценка пожарной опасности автомобилей с разными типами силовых установок в условиях недостатка статистических данных	145
Сытдыков М.Р., Ивахнюк Г.К., Моторыгин Ю.Д. Повышение эффективности центробежных пожарных насосов за счет выбора предпочтительного вида вакуумной системы методом анализа иерархий	156
Козлова Ю.С. Методика оценки теплового состояния проводов и кабелей для обеспечения пожарной безопасности объектов защиты	165

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Поплевин А.С., Азаров В.Н., Манжилевская С.Е. Изучение негативного воздействия на атмосферный воздух в результате возгорания на полигонах твердых коммунальных отходов	176
Травин И.А., Козодаев А.С., Кондратьева М.В. Альтернативное топливо: международный опыт и возможности применения в Российской Федерации	186
Мельберт А.А., Машенская Е.А. Совершенствование экологических показателей дизельных двигателей автотракторной техники	198
Шкрабак Р.В., Шкрабак В.С., Савельев А.П. Экологический след систем жизнедеятельности сельских и других территорий структур Общероссийского классификатора видов экономической деятельности: состояние, последствия и пути нейтрализации	210

Сысоева Е.В. Применение «зеленых» крыш для обеспечения экологической безопасности городской воздушной среды	220
Берестевич М.О., Головейко И.В., Цховребов Э.С. Направления совершенствования правового обеспечения оценки и прогнозирования ущерба от последствий чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации	231
Гавкалюк Б.В., Савчук О.Н., Пьянусов А.В. Проблемы и пути совершенствования способов ликвидации последствий разлива нефтепродуктов	244

ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Мельников Г.О. Метод учета характеристик модульной системы оповещения и управления эвакуацией людей на основе технологии интернета вещей в расчете пожарного риска	257
---	-----

Авторам журнала «Проблемы управления рисками в техносфере».	270
--	-----

CONTENTS

RISKS REDUCTION AND ELIMINATION OF CONSEQUENCES OF EMERGENCIES. SAFETY ENSURING AT EMERGENCY SITUATIONS

Budykina T.A., Koval Yu.N. Search for optimal temperature conditions for thermal disposal of oil-saturated polymer sorbent	8
Malygin I.G., Rogozinski G.G. Modeling of acoustic landscapes in the management system for emergency response operations	20
Lozhkina O.V. Review of canadian investigations in forecasting and monitoring of extreme wildfires	31
Smirnov A.S., Yurchenko R.A. Application of unmanned aerial systems in decision support during emergencies: patent and publication analysis	45
Kalach A.V., Soloviev A.S., Lentyaeva T.V. Modern software products for modeling the dynamics of avalanches and their interaction with buildings	56
Lozhkin V.N. A risk-based methodology for predicting damage from extremely hazardous air pollution from transport in Saint-Petersburg	68
Garelina S.A., Lyubkin R.N., Sysoev D.O. Comprehensive risk-based methodology justifications of rational parameters systems for the organization of verification of measuring instruments in EMERCOM of Russia	80
Karpova Zh.V., Yakheev V.V., Aktersky Yu.E. Justification of safe technology for the exploitation of mountain river resources	91

FIRE SAFETY

Hafizov I.F., Popova E.V., Safargalin A.R. Development of a modular foam generator with adjustable parameters	102
Zelinskaya I.A., Ivanov A.V. Study of the influence of carbon nanomodifiers on thermal stability of the material of the top of firefighter's protective clothing	112
Sineshchuk Yu.I., Terekhin S.N., Nemchinov M.S. Methods for improving the reliability of robotic fire extinguishing systems	120
Kozhevin D.F., Estekhin V.G. Evaluation of the efficiency of fire extinguishers use on water transport	130
Astahina Yu.A., Koroleva L.A. Multi-criteria assessment of the fire hazard of vehicles with different types of power plants in the context of a lack of statistical data	145
Sytdykov M.R., Ivakhnyuk G.K., Motorygin Yu.D. Improving the efficiency of centrifugal fire pumps by selecting the preferred type of vacuum system using hierarchy analysis	156
Kozlova Yu.S. A methodology for assessing the thermal condition of wires and cables to ensure fire safety of protected facilities	165

ENVIRONMENTAL SAFETY

- Poplevin A.S., Azarov V.N., Manzhilevskaya S.E.** Study of the negative impact on the atmospheric air as a result of fires at solid municipal waste landfills 176
- Travin I.A., Kozodaev A.S., Kondratyeva M.V.** Alternative refuse derived fuels: international experience and application prospects in the Russian Federation 185
- Melbert A.A., Mashenskaya E.A.** Improving the environmental performance of diesel engines in tractor vehicles 198
- Shkrabak R.V., Shkrabak V.S., Savelyev A.P.** The ecological footprint of the vital activity systems of rural and other territories of the All-Russian classifier of types of activities structures: state, consequences and ways of neutralization 210
- Sysoeva E.V.** Using green roofs to ensure environmental safety in the urban air environment 220
- Berestevich M.O., Goloveiko I.V., Tskhovrebov E.S.** Directions for improving the legal support for assessing and forecasting damage from the consequences of emergencies in the Arctic zone of Russian Federation 231
- Gavkalyuk B.V., Savchuk O.N., Pyanusev A.V.** Problems and ways to improve the methods of eliminating the environmental consequences of oil spills 244

WORKS OF YOUNG SCIENTISTS

- Melnikov G.O.** A method for accounting for the characteristics of a modular alert and people evacuation management system based on the internet of things technology in calculation of fire risk 257

To the authors of the journal «Problems of risk management in the technosphere» 270

Полная или частичная перепечатка, воспроизведение, размножение либо иное использование материалов, опубликованных в журнале «Проблемы управления рисками в техносфере», без письменного разрешения редакции не допускается.

Ответственность за достоверность фактов, изложенных в материалах номера, несут их авторы

ББК 84.7Р

УДК 614.84+614.842.84

Отзывы и пожелания присылать по адресу: 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149. Редакция журнала «Проблемы управления рисками в техносфере»; тел. (812) 645-20-55. E-mail: redakziaotdel@yandex.ru. Официальный интернет-сайт научно-аналитического журнала: <http://journals.igps.ru>. Официальный интернет-сайт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России: WWW.IGPS.RU

ISSN 1998-8990

СНИЖЕНИЕ РИСКОВ И ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧС

Научная статья

УДК 658.567.5, 543.573; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-8-19

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНОГО СОРБЕНТА, НАСЫЩЕННОГО НЕФТЬЮ

✉ Будыкина Татьяна Алексеевна.

Академия гражданской защиты МЧС России, Московская обл., г.о. Химки,
мкр. Новогорск.

Коваль Юлия Николаевна.

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Красноярский край,
г. Железногорск

✉ tbudykina@yandex.ru

Аннотация. Проводится исследование по определению температурных режимов обезвреживания полимерного сорбента на основе карбамидоформальдегидной смолы после сорбции нефти методом синхронного термического анализа. Определены температуры начала термодеструкции, самовоспламенения, максимальной скорости убыли массы, тепловые эффекты, остаточная масса сорбентов (исходного и после поглощения нефти).

Установлено, что термодеструкция напитанного нефтью сорбента начинается при 100 °С, тогда как исходный сорбент проявляет термическую стойкость до 192 °С. Максимальная скорость убыли массы при термической деструкции фиксировали у насыщенного нефтью сорбента при 219 °С и при 264 °С – у исходного. Выявлено, что при проведении лабораторного анализа выделение энергии у исходного сорбента в 10 раз больше, чем у нефтезагрязненного. С целью экономии энергоресурсов рекомендовано сжигание сорбента, насыщенного нефтью, в температурном интервале 450–500 °С.

В ходе проведения анализа выявлено вспучивание насыщенного нефтью сорбента на 30–40 % вследствие выделения газообразных продуктов разложения полимерной матрицы. Преимуществом сорбента остается естественная биodeградация, а термическую утилизацию следует рассматривать как аварийную ситуацию.

Ключевые слова: сорбент, насыщенный нефтью, термогравиметрические кривые, термодеструкция, скорость деструкции, температура самовоспламенения

Для цитирования: Будыкина Т.А., Коваль Ю.Н. Поиск оптимальных температурных режимов термической утилизации полимерного сорбента, насыщенного нефтью // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 8–19. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-8-19

Scientific article

SEARCH FOR OPTIMAL TEMPERATURE CONDITIONS FOR THERMAL DISPOSAL OF OIL-SATURATED POLYMER SORBENT

✉Budykina Tatyana A.

Academy of civil defence of EMERCOM of Russia, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk.

Koval Yulia N.

Siberian fire and rescue academy of State fire service of EMERCOM of Russia,

Krasnoyarsk Krai, Zheleznogorsk, Zheleznogorsk

✉tbudykina@yandex.ru

Abstract. A study was conducted to determine the temperature regimes for the decontamination of a urea-formaldehyde resin-based polymer sorbent after oil sorption using synchronous thermal analysis. The onset temperatures of thermal degradation, autoignition, maximum mass loss rate, thermal effects, and residual mass of the sorbents (initial and after oil absorption) were determined.

It was found that thermal degradation of the oil-saturated sorbent begins at 100 °C, while the original sorbent exhibits thermal stability up to 192 °C. The maximum mass loss rate during thermal degradation was recorded at 219 °C for the oil-saturated sorbent and at 264 °C for the original sorbent. Laboratory analysis revealed that the energy release of the original sorbent was 10 times greater than that of the oil-contaminated sorbent. To conserve energy resources, combustion of oil-saturated sorbent at temperatures ranging from 450 to 500 °C is recommended.

Analysis revealed swelling of the oil-saturated sorbent by 30–40 % due to the release of gaseous decomposition products from the polymer matrix. Natural biodegradation remains an advantage of the sorbent, and thermal disposal should be considered an emergency.

Keywords: oil-saturated sorbent, thermogravimetric curves, thermal degradation, degradation rate, autoignition temperature

For citation: Budykina T.A., Koval Yu.N. Search for optimal temperature conditions for thermal disposal of oil-saturated polymer sorbent // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 8–19. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-8-19

Введение

Процессы адсорбции широко применяются в различных отраслях – пищевой, химической, фармацевтической, перерабатывающей, горнометаллургической промышленности, теплоэнергетике, в процессах водоподготовки и очистки сточных вод [1]. Для ликвидации аварийных ситуаций, в частности разливов нефти, широко применяются сорбенты, благодаря простоте использования, высокой скорости реакции и относительной экологической безопасности [2].

Известны минеральные сорбенты (вермикулит, перлит, диатомит, опилки, торф), органические природные сорбенты (целлюлоза, шерсть, кокосовое волокно), синтетические сорбенты (полипропиленовые, полиуретановые материалы), сорбенты из отходов производства (шлак металлургического производства, дефекат сахарного производства, аспирационная пыль электропечей и пр.), био- и фитосорбенты (отходы микробиологической промышленности, сельхозпроизводства и др.).

Ликвидация чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с разливом нефтепродуктов, требует мобилизации больших сил и средств – личного состава, техники, инструмента, специальной одежды, химикатов, сорбентов, но одной из важных задач является утилизация загрязненного сорбента. К сожалению, большинство сорбционных материалов обладают

недостатками – однократным применением и необходимостью обезвреживания либо утилизации отработанного материала.

Как известно, к методам утилизации насыщенных нефтью сорбентов относят следующие: повторное использование после обезвреживания, захоронение на специализированных полигонах, биоразложение с участием бактерий – нефтедеструкторов и термическая утилизация. Во всех случаях требуется предварительное обезвреживание шлама и лишь после этого определяется оптимальный вариант утилизации.

Возможность повторного использования сорбента зависит от его типа, физико-химических свойств поглощенного нефтепродукта, температурных условий проведения процесса. Захоронение отходов на специализированных полигонах является самым агрессивным методом и может быть применен лишь в исключительных случаях, при особых обстоятельствах. Биоразложение сорбентов требует наличия активной микрофлоры, деятельность которой ограничивается низкими температурами. Поэтому применение данного способа затруднительно, а чаще – невозможно в условиях Арктической зоны. Даже полимерные сорбенты, специально разработанные для отказа от термического метода утилизации, теряют мелиоративные функции и способность к биодegradации в условиях экстремально низких температур [3, 4].

При аварийных сценариях, когда биодegradация *in situ* временно невозможна, следует рассматривать термическую утилизацию насыщенного нефтью сорбента как оптимальный способ быстрого решения проблемы утилизации/обезвреживания обременительного для окружающей среды отхода. В связи с этим в данной работе представляет интерес определение температурных интервалов реализации термического способа утилизации насыщенного нефтью полимерного сорбента.

Цель исследования – изучение термодеструкции полимерного сорбента на основе карбамидоформальдегидной смолы для выбора оптимальных температурных режимов термической утилизации пропитанного нефтепродуктом вещества.

Задачи исследования:

- определение основных показателей термодеструкции исследуемых образцов сорбента в исходном состоянии и после сорбции нефтепродуктов;
- обоснование оптимального температурного режима термической утилизации насыщенного нефтью сорбента.

Характеристика объекта исследования

Исследованию подвергали полимерный сорбент, полученный на основе водорастворимой карбамидной смолы в лаборатории Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. Свойства полученного сорбента адаптированы и определены на основании ГОСТ 33627–2015 «Уголь активированный. Стандартный метод определения сорбционных характеристик адсорбентов» и ТУ 214-10942238-03–95 [5, 6].

В соответствии с литературой [2] изучаемый сорбент имеет высокие сорбционную емкость по нефтепродуктам, олеофильность, отсутствие десорбции и открытую ячеистую развитую структуру (рис. 1).

Исходными компонентами для получения полимерного сорбента является водорастворимая синтетическая карбамидоформальдегидная смола с классом эмиссии формальдегида не более 0,2 %, пенообразователь, отвердитель (кислота) и, в зависимости от рецептуры, – модификатор. Для улучшения физико-химических, механических, эксплуатационных и гигиенических свойств полимерный сорбент может быть наполнен различными компонентами – эмульгаторами пластификаторами антипиренами золой-уноса, вермикулитом [7–9].

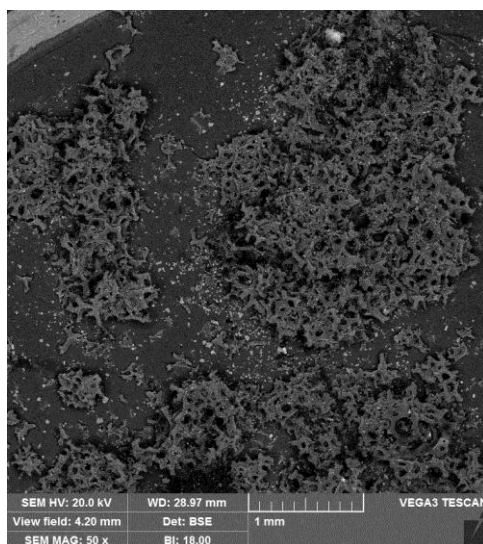


Рис. 1. Изучаемый полимерный сорбент (увеличение в 50 раз)

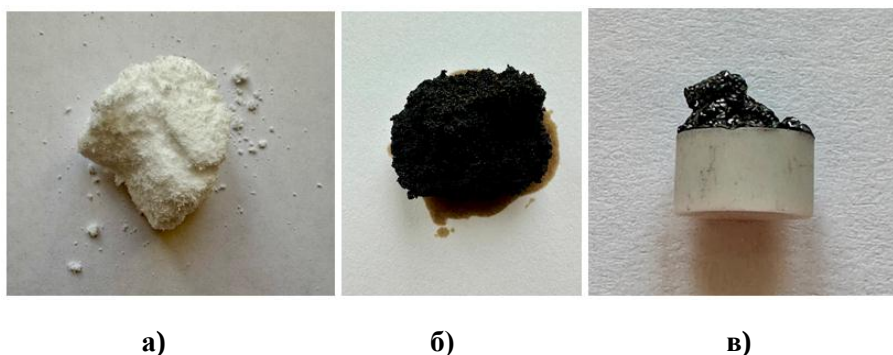
Сорбент, участвующий в эксперименте, имеет следующий состав, масс. %: вода – 50, смола – 25, поверхностно-активные вещества – 8, отвердитель (кислота) – 17. Маркировка – «Сорбент полимерный универсальный».

Данный сорбент имеет следующие характеристики [2, 7, 10]:

- сорбционное увлажнение (за 24 ч) по массе, % – 3;
- объемная масса, г/дм³ – 12;
- водопоглощение, % – 200;
- нефтеемкость при времени сорбции, $\Gamma_{\text{неф}}/\Gamma_{\text{сорб}}$ – 60;
- pH водной вытяжки – 5,5.

В качестве нефтепродукта для проверки работоспособности сорбента использовался сорт нефти Siberian Light – легкая нефть с низким содержанием серы Ханты-Мансийского месторождения. Нефтепродукт отобран на нефтеперекачивающей станции «Вознесенка» Красноярского края АО «Транснефть – Западная Сибирь». Эта станция является промежуточной нефтеперекачивающей станцией, входящей в состав магистрального нефтепровода Анжеро – Судженск – Красноярск, протяженностью 602 км (диаметр трубопровода 1 000 мм).

Термодеструкции подвергались два образца сорбента – образец 1, исходный сорбент (рис. 2 а), и образец 2 – сорбент, насыщенный нефтью (рис. 2 б). На рис. 2 в представлены изменения, происходящие с сорбентом, при нагревании в тигле до 600 °С.



а – исходный вид сорбента (образец 1); б – сорбент, насыщенный нефтью (образец 2);
в – тигель с остатками сорбента, насыщенного нефтью,
после нагрева в термоанализаторе до температуры 600 °С

Рис. 2. Исследуемый сорбент

Образец 2 имел высокую обводненность, влажность образца составляла 100 %. Для исследования был использован необезвоженный сорбент, аналогичный отработанному сорбенту, получаемому в реальных условиях при ликвидации ЧС. Обезвоживание сорбента в данных экспериментах не проводилось.

Метод исследования: синхронный термический анализ (СТА) на термоанализаторе STA 449 F3 фирмы NETZSCH Jupiter 449 выполнялся на кафедре пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России. Обработка результатов осуществлялась с применением программного обеспечения NETZSCH Proteus Thermal Analysis в виде графических зависимостей по изменению массы образца от продолжительности нагрева (ТГ-кривые), тепловым процессам (ДСК-кривые), скорости уменьшения массы образца во времени (ДТГ-кривые), скорости тепловыделений (dДСК-кривая).

Массу образцов сорбента определяли на лабораторных весах ВСЛ-60/0,1А «Невские весы».

Метод СТА позволяет проводить эксперимент с образцом минимальной массы (мг), что является его значительным преимуществом, наряду с высокой точностью, информативностью в дополнении к графическому отображению полученных результатов.

Условия эксперимента: нагрев до температуры 600 °С, скорость нагрева – 20 °С/мин, продувочный газ печи – воздух с расходом 20 мл/мин, защитный газ весовой части прибора – азот с расходом 20 мл/мин. Масса образца исходного сорбента – 11,0 мг; масса сорбента, насыщенного нефтью, – 63,5 мг.

Возникающие экзо- и эндоэффекты (дифференциальная сканирующая калориметрия, ДСК).

Результаты исследований

На рис. 3–6 представлена визуализация полученных на термоанализаторе термогравиметрических кривых образцов 1 и 2. На рис. 3 и 4 – термогравиметрические кривые в виде графиков ТГ/ДТГ/ДСК; на рис. 5 и 6 – изменение массы (ТГ) с выделением температуры, шагом 100 °С.

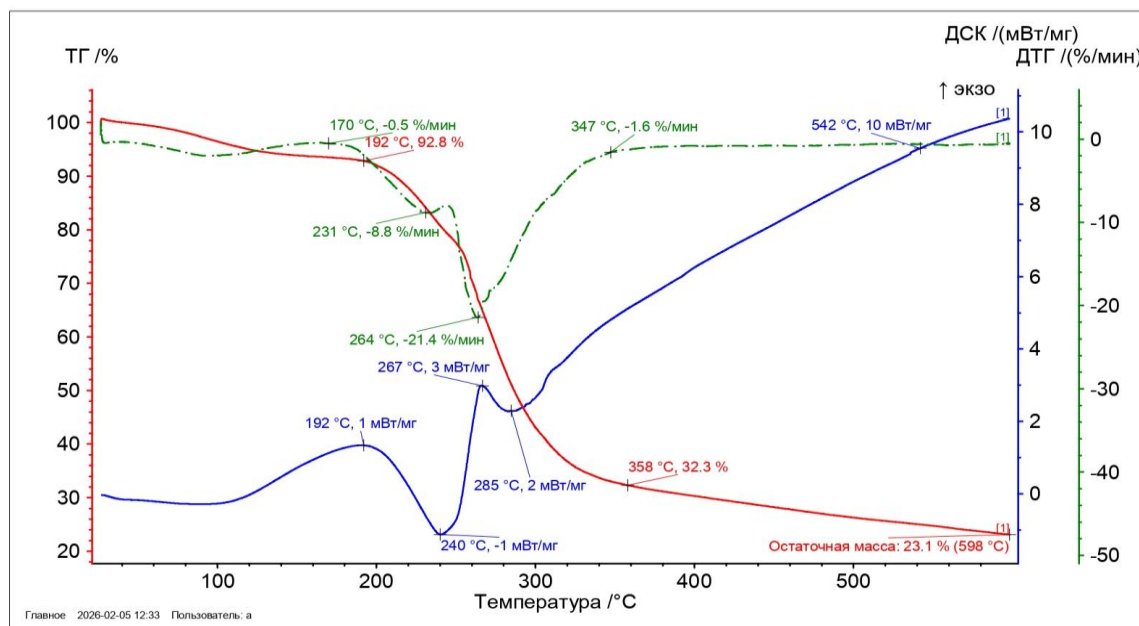


Рис. 3. Термогравиметрические кривые сорбента в исходном состоянии (образец 1)

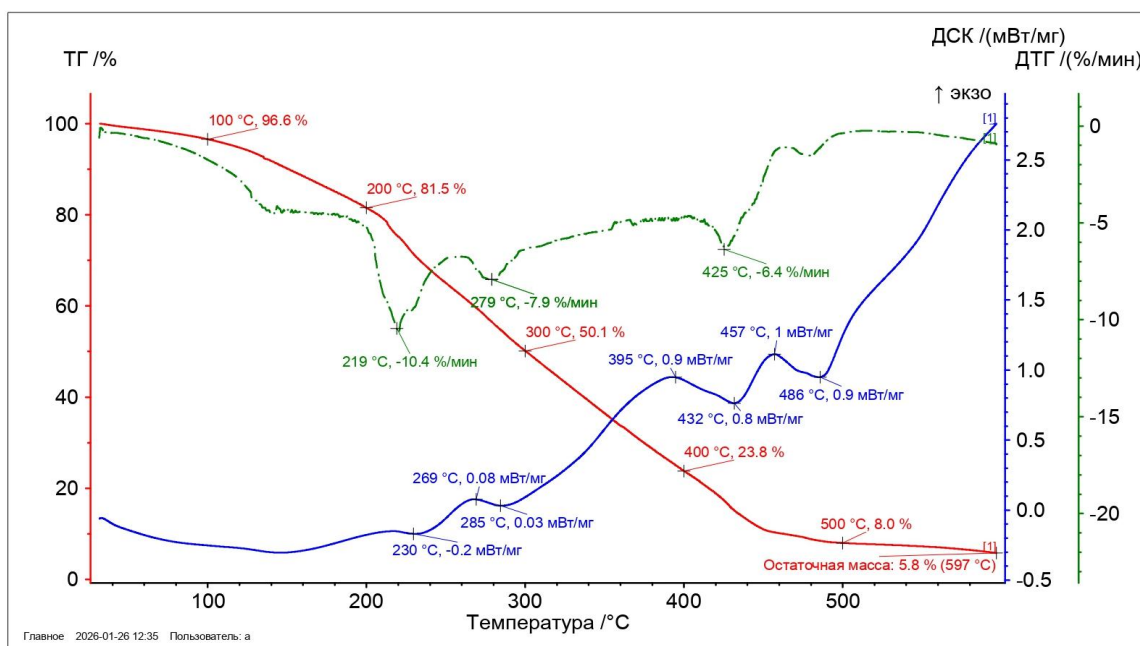


Рис. 4. Термогравиметрические кривые сорбента, насыщенного нефтью (образец 2)

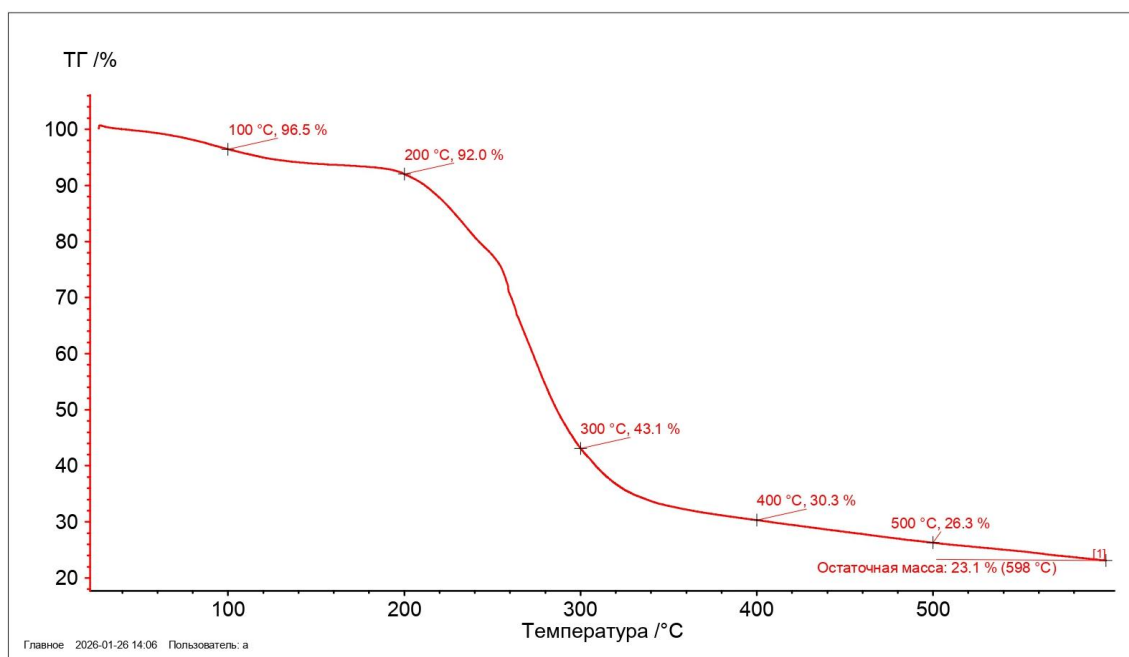


Рис. 5. ТГ-кривые образца 1

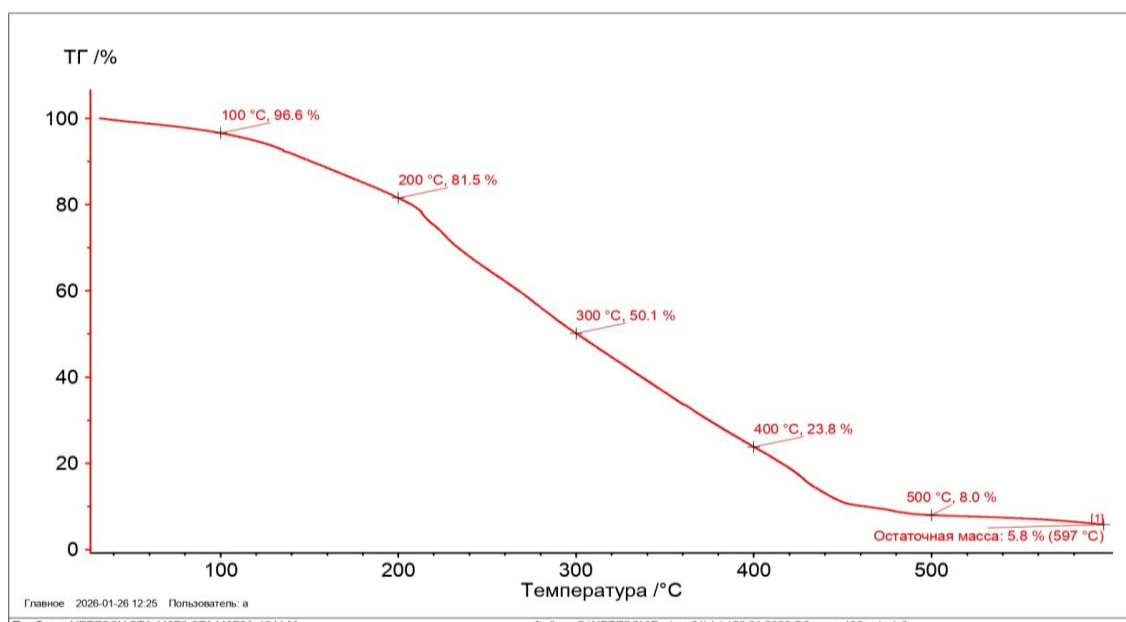


Рис. 6. ТГ-кривые образца 2

Как видно из рис. 3 и 4, характер кривых отличается: сорбент, насыщенный нефтью (образец 2), при сгорании демонстрирует более плавные кривые, нежели сорбент в исходном положении (образец 1). В образце 2 (рис. 4) снижение массы и, соответственно, отклик на температуру, начинается раньше – при 100 °C (96,6 %), чем у образца 1 – при 192 °C (92,8 %). Разница в температурах – почти 100 °C. При этом следует обратить внимание на термическую стойкость образца 1 и начало термодеструкции лишь при достижении 192 °C. После этой температуры образец 1 начинает резко терять массу, приблизительно на 60 % (до 32,3 %), при нагреве всего на 160 °C (при температуре 358 °C).

Этот интервал температур (192 °C – 358 °C) образца 1 (рис. 3) сопряжен с эндотермией с максимумом при температуре 240 °C (-1 мВт/мг) и высокой скоростью убыли массы – от -8,8 %/мин при 231 °C до -21,4 %/мин при 264 °C, что, вероятно, обусловлено реструктуризацией компонентов синтетического сорбента.

У образца 2 (рис. 4) эндотермические процессы практически отсутствуют, снижение массы происходит ровно, без резких скачков. Максимальная скорость убыли массы зафиксирована при 219 °C – -10,4 %/мин, затем при температуре 279 °C убыль массы имеет скорость меньше, – -7,9 %/мин. Интервалу температур от 200 °C до 300 °C соответствует наибольшая убыль массы (на 31,5 %). При температуре 425 °C выявлена скорость убыли массы – 6,4 %/мин и выгорание сорбента до остаточной массы 10,7 % (453 °C, на рисунке не показано). После этих значений наступает фиксация остаточной массы от 8,0 % при температуре 500 °C до итоговой – 5,8 % при 597 °C.

Анализируя ДСК-кривые, можно сделать заключение, что выделение энергии более свойственно образцу 1, нежели образцу 2. Так, у образца 1 при температуре 542 °C зафиксировано максимальное значение тепловыделения – 10 мВт/мг, а при более низких температурах – 192 °C, 267 °C, 285 °C встречаются незначительные тепловыделения – 1 мВт/мг, 3 мВт/мг и 2 мВт/мг соответственно. Образец 2, хоть и содержит в своей пористой и ячеистой структуре нефть, но не выделяет тепло при сгорании. Максимальное значение тепла, зафиксированное при температуре 457 °C, составляет величину 1 мВт/мг. Этим, вероятно, обусловлена разница в массе сорбента уже при температуре 500 °C.

Для определения оптимальной температуры термической утилизации сорбента экспериментальные данные были занесены в табл. 1.

Таблица 1

Убыль массы (%) при термодеструкции образцов 1 и 2

Показатель/ Образец	Убыль массы, %					
	100 °С	200 °С	300 °С	400 °С	500 °С	598 °С
Образец 1	96,5	92,0	43,1	30,3	26,3	23,1
Образец 2	96,6	81,5	50,1	23,8	8,0	5,8

Из табл. 1 видно, что лишь при достижении температуры 500 °С видны серьезные отличия в остаточной массе двух образцов. При увеличении температуры и до окончания эксперимента – 600 °С разница в значениях остаточной массы существенная: образец 1 имеет 23,1 % своей массы в то время, как образец 2, лишь 5,8 %.

Отличия в значении остаточной массы при температуре 500 °С и 600 °С у образца 2 незначительны – 8,0 % и 5,8 %. Поэтому при применении метода сжигания для изучаемого, отработанного, насыщенного нефтью сорбента, а также – экономии энергоресурсов можно рекомендовать сжигание отхода при температуре 500 °С, так как нет принципиальной разницы между величинами получаемой остаточной массы, а расход энергоносителя – существенен. Температура 453 °С также позволяет получить хороший результат – 10,7 % при сжигании насыщенного нефтью сорбента. Для установления итоговой температуры сжигания отхода в натурных условиях необходимо проведение эксперимента на полупромышленной установке с учетом моделирования процесса на мини-объекте (в термоанализаторе), когда доказано, что можно ограничиться сжиганием при температуре 450 °С.

На рис. 2 в показан тигель с сорбентом, насыщенным нефтью, после термодеструкции. При нагреве происходит вспучивание образца 2 (увеличение объема в 30–40 %), что может быть обусловлено выделением газообразных продуктов разложения карбаминоформальдегидной смолы (аммиака, формальдегида, водяных паров). Это следует учитывать при расчете рабочего объема камеры сжигания и обеспечения безопасного технологического процесса.

В соответствии с литературой [11], с помощью метода синхронного термического анализа можно определить температуру самовоспламенения материалов и веществ путем дифференцирования кривой ДСК (рис. 7 и 8), определения на ней экстремума, соответствующего процессу самовоспламенения и повышению скорости тепловыделения. При совмещении графиков 3, 4 с 7, 8 можно установить температуры самовоспламенения исследуемых материалов:

- образец 1 – исходный сорбент – 258 °С;
- образец 2 – сорбент, насыщенный нефтью, – 253 °С.

У исходного сорбента и насыщенного нефтью температуры самовоспламенения практически не отличаются, что можно, вероятно, объяснить неизменностью свойств сорбента при нагревании.

На рис. 7 и 8 представлены кривые ДСК и dДСК исследуемых образцов 1 и 2.

Литературные данные [12] содержат сведения о температуре самовоспламенения нефти, которая в зависимости от места добычи имеет значения от 237 °С до 310 °С. Полученные данные также подтверждают их достоверность, так как в образце 2 велико содержание нефтепродукта, следовательно, определенная по результатам эксперимента температура самовоспламенения сорбента, насыщенного нефтью, близка к температуре самовоспламенения нефти – 253 °С, но и почти не отличается от исходного сорбента.

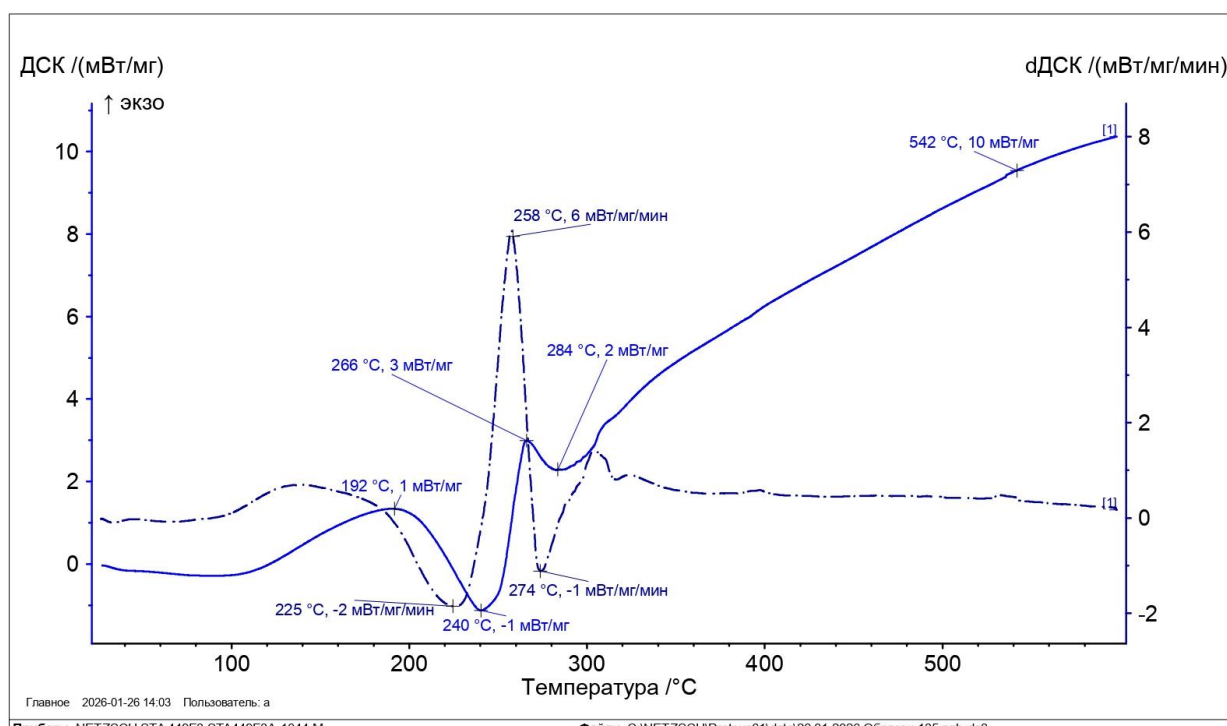


Рис. 7. ДСК и dДСК-кривые образца 1

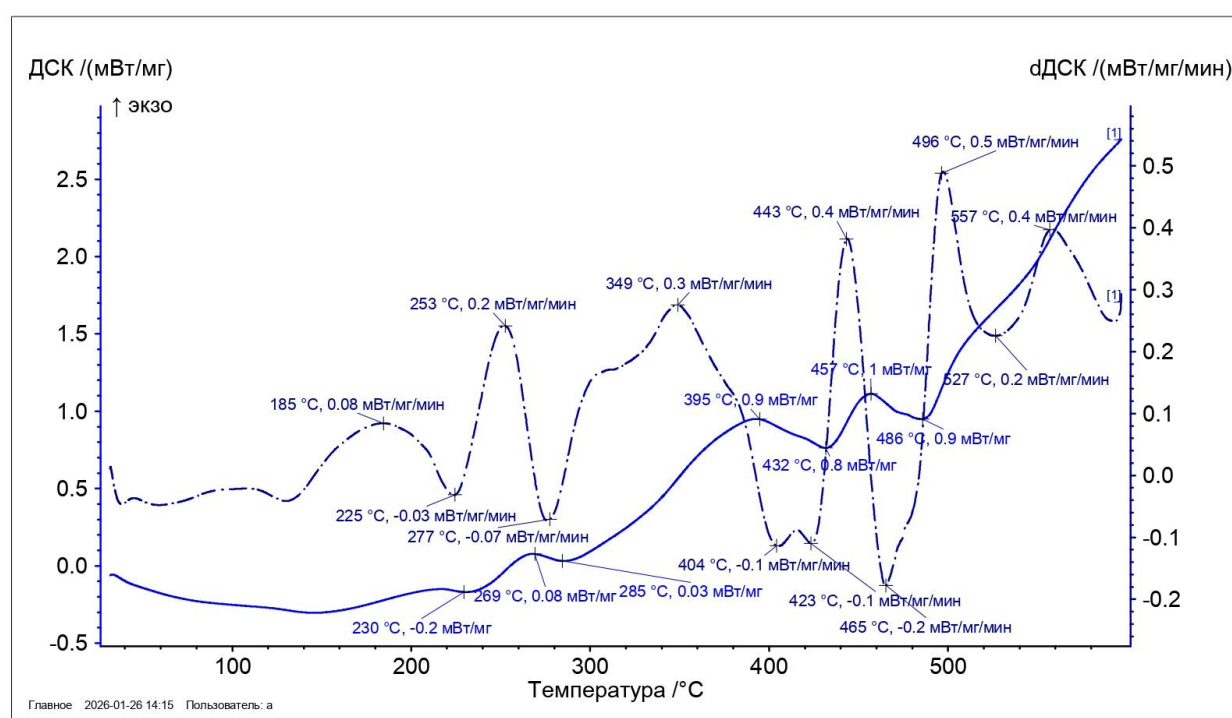


Рис. 8. ДСК и dДСК-кривые образца 2

Заключение

При использовании метода сорбции для ликвидации нефтеразлива, на взгляд авторов, следует предусматривать вначале процессы обезвоживания образующегося, обременительного отхода для снижения его объема и массы, а затем – термическую утилизацию. Для реализации на практике термического метода важно знать температуру, при которой произойдет полное

сгорание насыщенного нефтью сорбента или достаточное для уменьшения объема, чтобы рассчитать необходимые энергетические ресурсы. В данной работе определено, что достаточно достичь температуры 450 °С, чтобы получить остаточную массу 10,7 % утилизируемого, насыщенного нефтью сорбента.

Следует подчеркнуть, что термическая утилизация рассматривается как резервный метод, когда биоремедиация невозможна по климатическим или нормативным ограничениям.

Представленные результаты создают научную основу для разработки регламентов термической утилизации полимерных сорбентов и проектирования технологических процессов ликвидации напитанных нефтью отходов.

Список источников

1. Будыкина Т.А., Емельянов С.Г. Процессы и аппараты защиты гидросферы: учеб. пособие. М.: Академия, 2010. 288 с. EDN QNOUSD.
2. Конгар-Оол В.В., Мелкозеров В.М., Кайзер Ю.Ф. Индустриальная очистка нефтезагрязненных земель, водоемов, лесных угодий и других ландшафтов // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2019. № 4 (54).
3. Анализ влияния сорбционной обработки загрязненной нефтепродуктами почвы на развитие аборигенной микрофлоры / В.М. Мелкозеров [и др.] // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 4. С. 50–56. EDN SCTLMR.
4. Мелкозеров В.М., Васильев С.И., Вельп А.Я. Исследование эксплуатационных характеристик модифицированных многоцелевых карбамидных поропластов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 8. С. 34–39.
5. Мелкозеров В.М., Васильев С.И., Журавлев Д.Н. Производство полимерных сорбентов серий «Униполимер-М» и «Унисорб» // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. № 3. С. 9–13.
6. Композиция для получения сорбента на основе карбамидоформальдегидной смолы: пат. № 2587440 С1 Рос. Федерация: МПК В01J 20/26 / В.М. Мелкозеров, С.И. Васильев, Л.А. Лапушова; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – № 2015121956/05; заявл. 08.06.2015; опубл. 20.06.2016.
7. Мелкозеров В.М., Васильев С.И., Лапушова Л.А. Результаты исследования рабочих характеристик полимерных сорбентов, используемых для очистки нефтезагрязненных объектов и предотвращения их возгораний // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 1. С. 32–38.
8. Preparation of sorbents from selected polymers / W. Ciesińska [et al.] // Polish Journal of Chemical Technology. 2011. Т. 13. № 1. С. 51–54.
9. Application of sorbents for oil spill cleanup focusing on natural-based modified materials: a review / M. Zamparas [et al.] // Molecules. 2020. Т. 25. № 19. С. 4522.
10. Мелкозеров В.М., Васильев С.И., Журавлев Д.Н. Производство полимерных сорбентов серий «Униполимер-М» и «Унисорб» // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. № 3. С. 9–13.
11. К вопросу оценки показателей пожарной опасности полимерных материалов методом синхронного термического анализа / О.В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 51–63.
12. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник: в 2-х ч. 2-е изд., перераб и доп. М.: Асс. «Пожнаука», 2004. Ч. 2. 774 с.

References

1. Budykina T.A., Emel'yanov S.G. *Processy i apparaty zashchity gidrosfery: ucheb. posobie*. M.: Akademiya, 2010. 288 s. EDN QNOUSD.
2. Kongar-Ool V.V., Melkozerov V.M., Kajzer Yu.F. *Industrial'naya ochistka neftezagryaznennykh zemel', vodoemov, lesnykh ugodij i drugih landshaftov* // *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2019. № 4 (54).
3. *Analiz vliyaniya sorbcionnoj obrabotki zagryaznennoj nefteproduktami pochvy na razvitie aborigennoj mikroflory* / V.M. Melkozerov [i dr.] // *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse*. 2014. № 4. S. 50–56. EDN SCTLMR.
4. Melkozerov V.M., Vasil'ev S.I., Vel'p A.Ya. *Issledovanie ekspluatatsionnykh harakteristik modifitsirovannykh mnogocelevykh karbamidnykh poroplastov* // *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse*. 2010. № 8. S. 34–39.
5. Melkozerov V.M., Vasil'ev S.I., Zhuravlev D.N. *Proizvodstvo polimernykh sorbentov serij «Unipolimer-M» i «Unisorb»* // *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse*. 2017. № 3. S. 9–13.
6. *Kompozitsiya dlya polucheniya sorbenta na osnove karbamidoformal'degidnoj smoly: pat. № 2587440 C1 Ros. Federatsiya: MPK B01J 20/26* / V.M. Melkozerov, S.I. Vasil'ev, L.A. Lapushova; *zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sibirskij federal'nyj universitet»*. – № 2015121956/05; *zayavl.* 08.06.2015; *opubl.* 20.06.2016.
7. Melkozerov V.M., Vasil'ev S.I., Lapushova L.A. *Rezultaty issledovaniya rabochih harakteristik polimernykh sorbentov, ispol'zuemykh dlya ochistki neftezagryaznennykh ob'ektov i predotvrashcheniya ih vozgoranij* // *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse*. 2013. № 1. S. 32–38.
8. *Preparation of sorbents from selected polymers* / W. Ciesińska [et al.] // *Polish Journal of Chemical Technology*. 2011. T. 13. № 1. S. 51–54.
9. *Application of sorbents for oil spill cleanup focusing on natural-based modified materials: a review* / M. Zamparas [et al.] // *Molecules*. 2020. T. 25. № 19. S. 4522.
10. Melkozerov V.M., Vasil'ev S.I., Zhuravlev D.N. *Proizvodstvo polimernykh sorbentov serij «Unipolimer-M» i «Unisorb»* // *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse*. 2017. № 3. S. 9–13.
11. *K voprosu ocenki pokazatelej pozharnoj opasnosti polimernykh materialov metodom sinhronnogo termicheskogo analiza* / O.V. Bezzaponnaya [i dr.] // *Tekhnosfermaya bezopasnost'*. 2025. № 4 (49). S. 51–63.
12. Korol'chenko A.Ya., Korol'chenko D.A. *Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ih tusheniya: spravochnik: v 2-h ch. 2-e izd., pererab i dop.* M.: Ass. «Pozhnauka», 2004. Ch. 2. 774 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 08.02.2026; одобрена после рецензирования: 25.02.2026;
принята к публикации: 06.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 08.02.2026; approved after review: 25.02.2026;
accepted for publication: 06.04.2026

Информация об авторах:

Будыкина Татьяна Алексеевна, профессор кафедры пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), доктор технических наук, доцент, e-mail: tbudykina@yandex.ru, SPIN-код: 5164-7470

Коваль Юлия Николаевна, заведующая кафедрой химии и процессов горения Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, д. 1), кандидат биологических наук, доцент, e-mail: a_yulya@inbox.ru, SPIN-код: 8176-0603

Information about authors:

Budykina Tatiana A., professor of the department of fire safety of Academy of civil protection of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: tbudykina@yandex.ru, SPIN: 5164-7470

Koval Yulia N., head of the department of chemistry and combustion processes of Siberian fire and rescue academy of EMERCOM of Russia (662972, Krasnoyarsk Krai, Zheleznogorsk, Severnaya str., 1), candidate of biological sciences, associate professor, e-mail: a_yulya@inbox.ru, SPIN: 8176-0603

Научная статья

УДК 628.517.2: 534.831.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-20-30

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ ЛАНДШАФТОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

✉ **Малыгин Игорь Геннадьевич.**

**Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук;
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.**

Рогозинский Глеб Гендрихович.

**Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук;
Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург, Россия**

✉ ***malygin_com@mail.ru***

Аннотация. Рассматривается проблема акустической безопасности при проведении аварийно-спасательных работ. Авторами предлагается подход к анализу зоны ликвидации последствий чрезвычайной ситуации как сложного звукового ландшафта, интегрирующего сигналы жизнеобеспечения (биофонию), техногенные шумы (технофонию) и естественные звуки среды (геофонию). На основе аппарата раскрашенных временных сетей Петри разработана формальная модель, описывающая влияние акустической обстановки на своевременность передачи команд и, как следствие, на эффективность управления силами и средствами МЧС России. Показано, что превышение пороговых уровней технофонии приводит к блокировке управляющих переходов в системе, что позволяет интерпретировать риск потери управления как отказ в акустическом канале связи. Предложена концепция проектирования звукового ландшафта зоны ликвидации последствий чрезвычайной ситуации как элемента системы управления при проведении аварийно-спасательных работ.

Ключевые слова: безопасность в чрезвычайных ситуациях, звуковой ландшафт, сети Петри, управление рисками, технофония, биофония, аварийно-спасательные работы

Для цитирования: Малыгин И.Г., Рогозинский Г.Г. Моделирование звуковых ландшафтов в системе управления при проведении аварийно-спасательных работ // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 20–30. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-20-30

Scientific article

MODELING OF ACOUSTIC LANDSCAPES IN THE MANAGEMENT SYSTEM FOR EMERGENCY RESPONSE OPERATIONS

✉ Malygin Igor G.

**Solomenko institute of transport problems of Russian academy of sciences;
Saint-Petersburg university of the State fire service of the EMERCOM of Russia,
Saint-Petersburg, Russia.**

Rogozinski Gleb G.

**Solomenko institute of transport problems of Russian academy of sciences;
Herzen Russian state pedagogical university, Saint-Petersburg, Russia**✉ malygin_com@mail.ru

Abstract. The article addresses the issue of acoustic safety during emergency response operations. The authors propose an approach to analyzing an emergency zone as a complex soundscape that integrates life-support signals (biophony), technogenic noise (technophony), and natural environmental sounds (geophony). Based on the apparatus of Coloured Timed Petri Nets, a formal model is developed to describe the influence of the acoustic environment on the timeliness of command transmission and, consequently, on the effectiveness of emergency management. It is shown that exceeding threshold levels of technophony leads to the blocking of control transitions in the system, which allows interpreting the risk of loss of control as a failure in the acoustic communication channel. A concept for designing the acoustic landscape of an emergency zone as an element of the risk management system is proposed.

Keywords: emergency safety, acoustic landscape, soundscape, Petri nets, risk management, technophony, biophony, emergency response operations

For citation: Malygin I.G., Rogozinski G.G. Modeling of acoustic landscapes in the management system for emergency response operations // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 20–30. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-20-30

Введение

Восприятие чрезвычайной ситуации (ЧС) традиционно строится на визуальных образах: завалы, пожары, разрушения. Однако звуковая картина происходящего может передавать не менее важную информацию. Классическая экология звука, восходящая к работам Р.М. Шафера, рассматривает акустическую среду (АС) не как хаотический шум, но как сложно организованный звуковой ландшафт, в котором каждый элемент занимает свою нишу [1]. Применительно к зоне ликвидации последствий ЧС звуковой ландшафт может быть сегментирован на ряд фундаментальных слоев: биофонию – звуки, источником которых являются живые организмы, включая человека (крики о помощи, команды, дыхание под завалами); геофонию – естественные шумы среды (ветер, вода); и технофонию – звуки, порождаемые работой аварийно-спасательной техники (двигатели, генераторы, гидравлика, средства малой механизации).

Проблема безопасности потенциально возникает в точке дисбаланса этих слоев. В современных условиях ликвидации последствий ЧС технофония, как правило, доминирует. Высокий уровень шума от работающей техники (экскаваторов, подъемных кранов, компрессорных станций, бензорезов и т.д.) не только оказывает вредное воздействие на органы слуха спасателей, что является предметом медицины труда, но и в некоторых случаях критически искажает управляющие команды и сигналы. Команда руководителя, не услышанная в шуме, или крик пострадавшего, растворенный в низкочастотном гуле генератора, представляют собой прямой риск перехода ситуации в неконтролируемую фазу.

Целью настоящей работы является построение формальной модели, описывающей влияние звукового ландшафта (ЗЛ) на процесс управления силами и средствами при ликвидации последствий ЧС, а также разработка концептуальных основ для включения акустических факторов в общую систему управления проведением аварийно-спасательных работ (ПАСР).

Теоретические основы и методы расчета

Современное состояние исследований звуковых ландшафтов

Понятие ЗЛ (soundscape) в его современном научном понимании было введено канадским исследователем-акустиком Р.М. Шафером в конце 1960-х гг. Его фундаментальный труд «Настройка мира» (The Tuning of the World, 1977) [1] заложил основы акустической экологии – дисциплины, изучающей сложные взаимосвязи между живыми организмами и их акустическим окружением. Дальнейшее развитие – это направление получило в работах Б. Краузе, который, исследуя акустику дикой природы, ввел понятие биофонии и впервые указал на феномен акустической ниши, где каждый вид занимает свой частотный диапазон для эффективной коммуникации [2]. Параллельно Б. Труа развивал теорию акустической коммуникации, акцентируя внимание на роли контекста и слухового восприятия в интерпретации звуковых событий [3].

В последние десятилетия произошла экспансия идей акустической экологии в прикладные области. Исследования ЗЛ вышли за рамки музыковедения и экологии, интегрировавшись в градостроительство, архитектуру [4, 5], транспорт [6] и общественное здоровье. Сформировалось направление «акустического урбанизма», рассматривающее звуковую среду как ресурс, требующий управления и оптимизации наравне с визуальными и планировочными аспектами. Ключевым выводом современных исследований является признание того факта, что восприятие звука глубоко субъективно и контекстуально: один и тот же акустический сигнал может оцениваться как нежелательный шум или как значимый, комфортный элемент среды в зависимости от обстоятельств и культурных установок слушателя.

Определенный интерес для задач управления рисками при ликвидации последствий ЧС представляют работы, посвященные проектированию естественных (природных) звуковых ландшафтов в урбанизированной среде [7, 8]. В них обосновывается, что включение элементов биофонии и создание «зон тишины» способно не только повышать качество жизни городского населения, но и выполнять восстановительную функцию, снижая уровень стресса и улучшая когнитивные показатели человека [9, 10]. Сам по себе этот вывод относится, прежде всего, к условиям нормальной жизнедеятельности, однако он побуждает обратить внимание на проблему акустической реабилитации личного состава МЧС России, работающего в экстремальных условиях. Можно предположить, что для спасателей, подвергающихся в зоне ЧС значительным акустическим нагрузкам, возможность кратковременного пребывания в акустически комфортной среде (например, в специально организованных зонах отдыха) могла бы стать значимым фактором сохранения профессиональной работоспособности и психоэмоциональной устойчивости. Разумеется, проверка данной гипотезы требует отдельных физиологических и психологических исследований, выходящих за рамки настоящей работы, однако само ее существование указывает на широту потенциального применения концепции ЗЛ.

Таким образом, современное состояние исследований ЗЛ предоставляет богатый концептуальный аппарат для анализа акустических условий в зонах ЧС. Однако, как показывает анализ литературы, существующие работы сосредоточены либо на проблемах городского шума и его влияния на здоровье населения, либо на эстетических и экологических аспектах природных ЗЛ. Применение методологии акустической экологии к задачам обеспечения безопасности при ликвидации последствий ЧС, а именно к анализу влияния дисбаланса биофонии и технофонии на управляемость силами и средствами, до настоящего времени не получило должного развития, что определяет актуальность настоящего исследования.

Методология. Сегментация акустического ландшафта

В основе методологии лежит представление о зоне ликвидации последствий ЧС как о полисенсорной среде, где акустическая составляющая выполняет две ключевые функции: сигнальную (предупреждение об опасности, локализация последствий ЧС, спасение и эвакуация пострадавших) и коммуникационную (передача команд и донесений). Исходя из классификации Шафера, адаптированной к задачам безопасности, мы выделяем следующие классы акустических событий, определяющих ЗЛ ЧС:

– биофония (В). Звуки, продуцируемые живыми организмами, включая человека. Данный класс является целевым – ради его восприятия и выстраивается система акустической безопасности. Данный класс включает вербальные команды, а также невербальные сигналы (стоны, стуки), например, позволяющие обнаружить пострадавших в завалах;

– геофония (Г). Звуки небиологического природного происхождения. В зависимости от характера ЧС (наводнение, ураган, землетрясение) могут выступать как в роли фоновых, так и создавать существенную помеху;

– технофония (Т). Звуки, генерируемые техническими устройствами и механизмами, задействованными в ликвидации ЧС. Именно этот класс является основным дестабилизирующим фактором в силу высокой интенсивности и широкополосности спектра относящихся к нему звуковых объектов.

Доминирование технофонии над остальными компонентами характеризует экстремальные акустические условия зон ЧС. Результирующий ЗЛ L в каждый момент времени может быть описан как суперпозиция уровней, обозначенных выше трех компонент. Критическим для безопасности является состояние, при котором уровень технофонии L_T превышает суммарный уровень биофонии L_B и геофонии L_G настолько, что отношение «сигнал-шум» для речевого сигнала оказывается ниже порога разборчивости $SNR_{кр}$:

$$SNR = L_B - 10 \log_{10}(10^{0.1L_T} + 10^{0.1L_G}) < SNR_{кр}.$$

Очевидно, что простой констатации этого факта недостаточно для моделирования процессов управления. Необходимо понять, как именно акустический дисбаланс влияет на логику спасательной операции, что требует перехода к динамическому моделированию.

*Разработка формальной модели акустически-зависимого управления
на основе раскрашенных временных сетей Петри*

Постановка проблемы и обоснование выбора математического аппарата

Классические подходы к нормированию шума в ЧС, регламентируемые преимущественно санитарно-гигиеническими требованиями (СП 51.13330.2011¹, ГОСТ 12.1.003–2014²), рассматривают акустическую нагрузку исключительно как вредный производственный фактор. Однако ЗЛ зоны ЧС представляет собой сложную динамическую систему, где технофония способна непосредственно вмешиваться в контуры управления, блокируя передачу критически значимой биофонической информации.

¹ СП 51.13330.2011. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (утв. приказом Министерства регионального развития Рос. Федерации от 28 дек. 2010 г. № 825) (с изм. и доп.). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант»

² ГОСТ 12.1.003–2014. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 дек. 2014 г. № 2146-ст). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант»

Для формализации данного процесса необходим математический аппарат, способный отразить реальную сложность ПАСР. Работающее на ликвидации последствий ЧС подразделение не является однородным: это множество различных групп (пожарные, спасатели-кинологи, операторы тяжелой техники и т.д.), каждая из которых обладает своими функциональными задачами, средствами связи и порогами чувствительности к шуму. Команды, поступающие от руководителя, также разнородны – они могут требовать немедленного реагирования (сигнал тревоги), планового выполнения (начало разбора завала, «режим тишины» и т.д.) или быть адресованы конкретному звену (группе).

Классические сети Петри позволяют моделировать параллельные и асинхронные процессы, что является шагом вперед по сравнению со статическими схемами. Однако в классическом варианте сетей Петри все ресурсы (маркеры) неразличимы. В нашем исследуемом случае важно различать, находится ли в точке принятия решения спасатель-химик-дозиметрист или спасатель-альпинист либо пожарный ствольщик, а также поступила ли команда на эвакуацию или команда на запуск генератора. Соответствующую возможность предоставляют раскрашенные сети Петри. Благодаря наличию у маркера цветового признака можно задавать условия срабатывания переходов не только по факту наличия ресурса, но и по его типу.

Дополнительное усложнение происходит из-за наличия фактора времени. В реальной ситуации ПАСР важна не только последовательность событий, но и их длительность. Сколько секунд есть у спасателя, кинолога или пожарного, чтобы услышать команду, прежде чем шум работающей техники заглушит всё? Через какое время после запуска генератора наступает критический уровень технофонии? Ответы на эти вопросы требуют введения временных параметров, что приводит нас к временным раскрашенным сетям Петри (*Coloured Timed Petri Nets – CTPN*) [11, 12]. Таким образом, выбор данного аппарата продиктован необходимостью адекватно отразить три ключевые характеристики процесса ликвидации ЧС: параллельность работы множества групп, разнородность задействованных ресурсов и критическую зависимость от времени протекания процессов.

Формальное определение модели

Определим кортеж Σ , описывающий процесс ликвидации последствий ЧС как акустически-зависимую систему:

$$\Sigma = (P, T, A, C, G_a, E, I, M_0),$$

где P – множество позиций (примеры возможных состояний: p_{com} – «канал связи свободен», p_{order} – «команда отдана», p_{noise} – «источник шума активен»); T – множество переходов; A – множество дуг, соединяющих переходы между собой; C – множество цветов (типов фишек); G_a – предикаты разрешения перехода; E – выражения на дугах; I – функция временных задержек; M_0 – начальная разметка.

Ключевой особенностью предлагаемой модели является введение предиката разрешения $G_a(t_k)$ для переходов, связанных со звуковой коммуникацией. Данная функция ставит разрешение на срабатывание перехода в зависимость от текущего уровня технофонии $L_T(t)$. Пусть $L_{Th}(t_k)$ — пороговое значение уровня звука, при превышении которого коммуникация становится невозможной. Тогда:

$$G_{ac}(t_k) = \begin{cases} \text{Истина, если } L_T(t) < L_{th}(t_k) \\ \text{Ложь, если } L_T(t) \geq L_{th}(t_k) \end{cases}$$

Уровень технофонии $L_T(t)$ зависит от состояния позиций сети Петри, соответствующих работающей технике. Для учета пространственной неоднородности акустического поля введем

понятие акустического веса позиции. Каждой позиции p_i , связанной с источником технофонии, ставится в соответствие кортеж $(r_i, W_i(f))$, где r_i – радиус влияния, а $W_i(f)$ – спектральная весовая функция. В упрощенном виде результирующий уровень технофонии для перехода t_k вычисляется как суперпозиция вкладов всех активных источников:

$$L_T(t_k) = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i \in I_{\text{актив}}} 10^{0.1 \cdot (L_{Ti} - \Delta L(r_{ik}))} \right),$$

где $\Delta L(r_{ik}) = 20 \log_{10}(r_{ik}) + 11$ – затухание с расстоянием до точечного источника сферических волн [13].

Анализ динамических свойств модели

Введение акустических предикатов позволяет выделить следующие критические режимы:

1. Акустический коллапс управления, проявляющийся в виде блокировки всех акустических коммуникационных переходов T_{comm} и ведущий к состоянию полной потери управляемости по звуковому каналу.

2. Частичная деградация связности, приводящая к фрагментации сети и формированию изолированных групп, работающих без координации.

3. Акустически индуцированные задержки, проявляющиеся как увеличение времени срабатывания переходов при превышении порога (моделируется функцией $d(t_k) = f(L_T(t))$).

Имитационное моделирование

Для верификации подхода выполнен имитационный эксперимент на сценарии ликвидации последствий обрушения здания в условиях плотной городской застройки. При определении исходных параметров модели использовались консервативные оценки, основанные на анализе литературных источников [14, 15]³ и материалов с мест реальных ЧС. В модель введены три источника технофонии с характерными уровнями звука в зоне проведения работ (на удалении 6–12 м от источника): тяжелый экскаватор (95–100 дБА на расстоянии 1 м), дизельная компрессорная станция (90 дБА на расстоянии 1 м) и бензорез (110 дБА на расстоянии 1 м).

Коммуникационные переходы заданы двумя типами: передача вербальной команды от руководителя тушения пожара (РТП) к звену спасателей (пороговый уровень $L_{th1}=80$ дБА) и акустический контакт с пострадавшим, находящимся в завале (пороговый уровень $L_{th2}=60$ дБА). Имитация методом Монте-Карло (1 000 циклов) с варьированием последовательности включения источников технофонии показывает, что вероятность блокировки канала связи «РТП-звено» превышает 0,65 при одновременной работе экскаватора и компрессора, а вероятность акустического обнаружения пострадавшего падает ниже 0,2 при работе любого из источников в радиусе 20 м от эпицентра завала. Полученные результаты, безусловно, требуют натурной валидации, однако на данном этапе они наглядно демонстрируют нелинейный характер влияния технофонии на эффективность АСР и чувствительность модели к изменению входных параметров.

На рисунке представлена соответствующая сеть Петри, в которой множество позиций $P = \{p_1, \dots, p_9\}$:

p_1 – работающий экскаватор с заданным уровнем шума по шкале А и расстоянием до исследуемой точки;

p_2 – работающий компрессор с заданным уровнем шума по шкале А и расстоянием до исследуемой точки;

³ ГОСТ 31295.2–2005 (ИСО 9613-2:1996). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Ч. 2. Общий метод расчета. М.: Стандартинформ, 2006. 28 с.

p_3 – работающий бензорез с заданным уровнем шума по шкале А и расстоянием до исследуемой точки;

p_4 – текущий суммарный уровень шума;

p_5 – звено спасателей (для примера взято три спасателя одной специализации (синие маркеры));

p_6 – штаб, передающий команды управления (красные маркеры);

p_7 – пострадавший;

p_8 – команда выполнена;

p_9 – пострадавший обнаружен.

Для случая, представленного на рисунке, начальная разметка $M_0 = \{(95,10), (100, 12), (110, 6), 0, (3, \text{синий}), (1, \text{красный}), 1, 0, 0\}$. Спустя одну временную единицу ($@ + 1$) значение позиции p_3 будет обновлено и для трех источников составит около 83 дБ. Пунктирные соединительные линии в расширенных сетях Петри обозначают так называемые информационные (тестовые) дуги. Они не требуют отправки маркеров и просто передают информацию.

Для данной сети задано множество переходов $T = \{t_1, t_2, t_3\}$:

t_1 – переход, обновляющий суммарное значение уровня шума;

t_2 – переход, требующий для открытия 1 фишки красного цвета (команды из штаба), 1 фишки синего цвета (спасателя) и выполнения условия $L_{th} < 80$ дБ;

t_3 – переход, требующий для открытия 1 фишки (наличия потерпевшего, подающего крики о помощи) и выполнения условия $L_{th} < 60$ дБ.

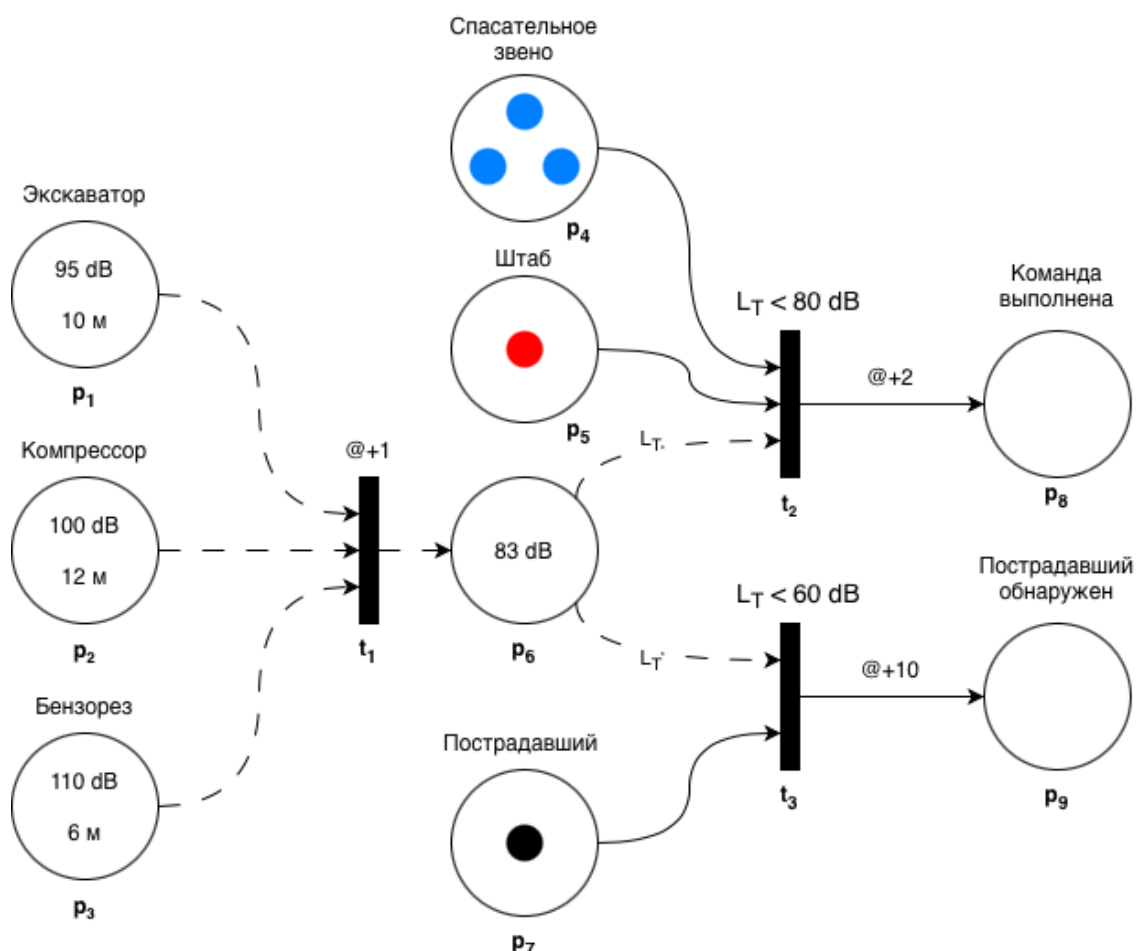


Рис. Пример рассматриваемой модели на основе раскрашенных сетей Петри

Развитие модели: нечеткие сети Петри и учет неопределенности

Предложенная выше модель на основе раскрашенных временных сетей Петри предполагает, что все параметры (уровни шума, расстояния, пороги срабатывания) известны точно либо могут быть заданы детерминированно. В реальных условиях ПАСР это допущение часто нарушается. Уровень технофонии может флуктуировать в зависимости от режима работы двигателя, расстояние до источника – изменяться в процессе перемещения техники, а порог разборчивости речи L_{th} – варьировать в зависимости от утомления конкретного спасателя.

Перспективным направлением развития модели представляется использование аппарата нечетких сетей Петри (*Fuzzy Petri Nets*). В этом случае уровни звука, расстояния и пороговые значения могут быть заданы нечеткими числами с соответствующими функциями принадлежности. Например, порог разборчивости может быть описан треугольным нечетким числом $L_{th} = (75, 80, 85)$, что отражает диапазон, в котором коммуникация возможна с той или иной степенью уверенности.

Предикат разрешения в этом случае приобретает вид функции степени разрешения $\mu_{ac}(t_k) \in [0,1]$, определяющей, насколько переход разрешен в текущей нечеткой акустической обстановке. Переход считается сработавшим, если $\mu_{ac}(t_k) \geq \lambda$, где λ – заданный порог уверенности. Такой подход позволяет моделировать плавную деградацию качества управления, а не только катастрофические отказы, что более адекватно отражает реальность. Введение нечеткости также открывает путь к использованию лингвистических переменных (например, «шумно», «очень шумно», «критично») при описании акустической обстановки, что может быть полезно при разработке систем поддержки принятия решений для РТП, для других руководителей ликвидации последствий ЧС.

Обсуждение и практическая значимость

Предложенный подход позволяет переосмыслить роль акустики в техносферной безопасности. Шум перестает быть только гигиеническим фактором и становится фактором эргатическим, влияющим на надежность системы «человек-техника». Моделирование на основе сетей Петри дает возможность на этапе планирования ПАСР выявлять уязвимости ЗЛ. Это открывает дорогу к концепции проектирования ЗЛ зоны ЧС, включающей следующие три фактора:

1. Пространственное размещение. Вынос шумных агрегатов за пределы «акустического коридора» между штабом и активной зоной.
2. Временное разделение. Планирование циклов работы техники в периоды наименьшей интенсивности речевого обмена.
3. Активная акустическая защита. Применение гарнитур с активным шумоподавлением и костной проводимостью, селективно подавляющих технофонию.

Любое управленческое решение, направленное на снижение акустического риска, должно быть обосновано не только с позиций безопасности, но и экономически. Стоимость потери управления, вызванной акустическим коллапсом, складывается из прямых и косвенных составляющих. К прямым потерям могут быть отнесены затраты на лечение профессиональных заболеваний органов слуха (нейросенсорная тугоухость), компенсации за вред, причиненный здоровью спасателей. Косвенные потери, как правило, значительно превышают прямые и включают: снижение скорости ПАСР, что увеличивает общее время операции и стоимость привлечения техники; вероятность повторного обрушения или иного вторичного поражения из-за несвоевременной подачи команды об отходе; а также репутационные издержки и снижение доверия населения к действиям экстренных служб МЧС России.

Предложенная модель позволяет оценить вероятность блокировки ключевых переходов, что дает возможность перейти к расчету предотвращенного ущерба. Сравнивая затраты на внедрение организационных мер (вынос техники, графики работы и сеансов связи) и технических средств (активные наушники, системы дублирования команд) с математическим ожиданием потерь от акустически-индуцированных сбоев, можно получить экономическое обоснование для включения вопросов акустической безопасности в общий контур системы управления при ПАСР. В зарубежной практике подобные расчеты выполняются в рамках методологии ALARP (As Low As Reasonably Practicable) [16], адаптация которой к условиям ликвидации последствий ЧС в России представляет собой отдельную научную задачу.

Заключение

ЗЛ ЧС представляет собой не фоновый шум, а активный элемент системы управления рисками. Предложенная модель на основе раскрашенных временных сетей Петри позволяет формализовать влияние акустической среды на процессы передачи управляющих сигналов. Дальнейшее развитие направления представляется в разработке методов расчета критических уровней технофонии для типовых сценариев ликвидации последствий ЧС и создании рекомендаций по акустической эргономике зон проведения АСР. Управление звуком в зоне ЧС становится таким же значимым, как управление светом и доступом, что позволяет говорить о формировании нового направления для исследований.

Список источников

1. Schafer R.M. The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World. 1994. NY: Destiny Books. 322 p.
2. Krause B.L. The Great Animal Orchestra: Finding the Origins of Music in the World's Wild Places. 2012. Little, Brown and Company. 278 p.
3. Truax B. Acoustic Communication (2nd edition). New Jersey: Ablex Publishing, 2001. 266 p.
4. Music Literacy and Soundscape Perception: A Study based on the Sound Walk Method of Soundscapes / B. Song [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. № 19 (14). P. 8471. DOI: 10.3390/ijerph19148471
5. Classifying urban public spaces according to their soundscape / K. Sun [et al.] // International Congress in Acoustics – ICA 2019. Aachen.
6. Рогозинский Г.Г. Математическая модель искусственного звукового ландшафта как средства психологической адаптации в условиях длительных морских рейсов // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 3-1 (69). С. 164–170. EDN UQOWOE. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.034
7. Raimbault M., Dubois D. Urban soundscapes: Experiences and knowledge // Cities. 2005. № 22 (5). P. 339–350. DOI: 10.1016/j.cities.2005.05.003
8. Cerwen G., Mossberg F. Implementation of quiet areas in Sweden // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. № 16 (1). P. 134. DOI: 10.3390/ijerph16010134
9. Berto R. Exposure to restorative environments helps restore attentional capacity // Journal of Environmental Psychology. 2005. № 25 (3). P. 249–259.
10. Aletta F., Oberman T., Kang J. Associations between positive health-related effects and soundscapes perceptual constructs: A systematic review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018. № 15 (11). P. 2392. DOI: 10.3390/ijerph15112392
11. Timed Coloured Petri Net Simulation Model for Reinforcement Learning in the Context of Production Systems / S. Riedmann [et al.] // Production at the Leading Edge of Technology, Proceedings of the 11th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP). Dresden. 2021. P. 457–465. DOI: 10.1007/978-3-030-78424-9_51
12. Somsak V.A. A Train Rescheduling System Using Timed Coloured Petri Nets // Urban Rail Transit. 2021. P. 245–256. DOI: 10.1007/978-981-15-5979-2_14

13. Смагин В.А. Эвристическая модель ликвидации нештатных ситуаций в эргатических системах управления // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2017. № 1.
14. Рожкова Н.В., Страхолис А.А. Математическая модель информационной поддержки оперативных групп пожарно-спасательного гарнизона // T-Comm. 2021. № 1.
15. Буторина М.В., Донцов С.А. Шум и вибрация как приоритетные факторы безопасности труда при строительстве транспортно-пересадочных кластеров // Noise Theory and Practice. 2025. № 3.
16. A summary of the 'ALARP' principle and associated thinking / J. Hurst [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. 2019. № 56 (2). P. 241–253. DOI: 10.1080/00223131.2018.1551814

References

1. Schafer R.M. The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World. 1994. NY: Destiny Books. 322 p.
2. Krause B.L. The Great Animal Orchestra: Finding the Origins of Music in the World's Wild Places. 2012. Little, Brown and Company. 278 p.
3. Truax B. Acoustic Communication (2nd edition). New Jersey: Ablex Publishing, 2001. 266 p.
4. Music Literacy and Soundscape Perception: A Study based on the Sound Walk Method of Soundscapes / B. Song [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. № 19 (14). P. 8471. DOI: 10.3390/ijerph19148471
5. Classifying urban public spaces according to their soundscape / K. Sun [et al.] // International Congress in Acoustics – ICA 2019. Aachen.
6. Rogozinskij G.G. Matematicheskaya model' iskusstvennogo zvukovogo landshafta kak sredstva psihologicheskoy adaptacii v usloviyah dlitel'nyh morskikh rejsov // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. № 3-1 (69). S. 164–170. EDN UQOWOE. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.034
7. Raimbault M., Dubois D. Urban soundscapes: Experiences and knowledge // Cities. 2005. № 22 (5). P. 339–350. DOI: 10.1016/j.cities.2005.05.003
8. Cerwen G., Mossberg F. Implementation of quiet areas in Sweden // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. № 16 (1). P. 134. DOI: 10.3390/ijerph16010134
9. Berto R. Exposure to restorative environments helps restore attentional capacity // Journal of Environmental Psychology. 2005. № 25 (3). P. 249–259.
10. Aletta F., Oberman T., Kang J. Associations between positive health-related effects and soundscapes perceptual constructs: A systematic review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018. № 15 (11). P. 2392. DOI: 10.3390/ijerph15112392
11. Timed Coloured Petri Net Simulation Model for Reinforcement Learning in the Context of Production Systems / S. Riedmann [et al.] // Production at the Leading Edge of Technology, Proceedings of the 11th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP). Dresden. 2021. P. 457–465. DOI: 10.1007/978-3-030-78424-9_51
12. Somsak V.A. A Train Rescheduling System Using Timed Coloured Petri Nets // Urban Rail Transit. 2021. P. 245–256. DOI: 10.1007/978-981-15-5979-2_14
13. Смагин В.А. Эвристическая модель ликвидации нештатных ситуаций в эргатических системах управления // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2017. № 1.
14. Рожкова Н.В., Страхолис А.А. Математическая модель информационной поддержки оперативных групп пожарно-спасательного гарнизона // T-Comm. 2021. № 1.
15. Буторина М.В., Донцов С.А. Шум и вибрация как приоритетные факторы безопасности труда при строительстве транспортно-пересадочных кластеров // Noise Theory and Practice. 2025. № 3.
16. A summary of the 'ALARP' principle and associated thinking / J. Hurst [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. 2019. № 56 (2). P. 241–253. DOI: 10.1080/00223131.2018.1551814

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 08.02.2026; одобрена после рецензирования: 04.03.2026; принята к публикации: 31.03.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 08.02.2026; approved after review: 04.03.2026; accepted for publication: 31.03.2026

Информация об авторах:

Малыгин Игорь Геннадьевич, директор Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (199178, Санкт-Петербург, 12-я Линия В.О., д. 13); профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: malygin_com@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0403-8095>, SPIN-код: 7602-1628

Рогозинский Глеб Гендрихович, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (199178, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., д. 13); старший научный сотрудник научно-методической лаборатории «Музыкально-компьютерные технологии» РГПУ им. А.И. Герцена (191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 48), доктор технических наук, e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5698-2347>, SPIN-код: 5421-5387

Information about the authors:

Malygin Igor G., director of the N.S. Solomenko institute of transport problems of the Russian academy of sciences (199178, Saint-Petersburg, 12th Line V.O., 13); professor of the department of fire fighting and emergency rescue operations of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: malygin_com@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0403-8095>, SPIN: 7602-1628

Rogozinski Gleb G., leading researcher at the laboratory for problems of ecology of transport systems of the N.S. Solomenko institute of transport problems of the Russian academy of sciences (199178, Saint-Petersburg, 12th Line V.O., 13); senior researcher at the research and methodology laboratory «Music and computer technologies» at the Herzen state pedagogical university of Russia (191186, Saint-Petersburg, Moika River emb. 48), doctor of technical sciences, e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5698-2347>, SPIN: 5421-5387

Научная статья

УДК 614.8; 355.58; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-31-44

ОБЗОР КАНАДСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ – ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

✉ Ложкина Ольга Владимировна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ oljkina@yandex.ru

Аннотация. Представлен обзор канадских исследований в области прогнозирования и мониторинга природных пожаров. Ко всемирно признанным достижениям канадских ученых относится разработанная ими научно обоснованная комплексная система мониторинга и прогнозирования пожарной опасности лесов, включающая подсистему индексирования пожароопасной погоды и подсистему прогнозирования поведения пожаров, а также результаты исследования взаимосвязи изменения климата, лесных пожаров, лесохозяйственных практик и практик пожаротушения, качественно-количественного состава лесов, на основании которых предлагаются стратегические подходы для контроля и управления лесными пожарами, в том числе чрезвычайного характера, представляющими серьезную угрозу для человеческого общества в социально-экономическом и экологическом аспектах.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, природные пожары, прогнозирование, мониторинг, канадские исследования

Для цитирования: Ложкина О.В. Обзор канадских исследований в области прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций – природных пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 31–44. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-31-44

Scientific article

REVIEW OF CANADIAN INVESTIGATIONS IN FORECASTING AND MONITORING OF EXTREME WILDFIRES

✉ Lozhkina Olga V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ oljkina@yandex.ru

Abstract. The paper presents an overview of Canadian key achievements in wildland fire science, namely, in wildfire forecasting and monitoring. Among the internationally recognized achievements of Canadian scientists is the development of an integrated Canadian Forest Fire Danger Rating System including Fire Weather Index subsystem and Fire Behaviour Prediction subsystem. Moreover, they estimated relationship between climate change, wildfires, forest management and fire suppression practices, and the qualitative and quantitative composition of forests. These findings help to determine strategic approaches for managing wildfires, including extreme ones, which pose a serious threat to human society in socioeconomic and environmental terms.

Keywords: emergencies, wildfires, forecasting, monitoring, Canadian investigations

For citation: Lozhkina O.V. Review of canadian investigations in forecasting and monitoring of extreme wildfires // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 31–44. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-31-44

Введение

Во второй половине XX в. и первой четверти XXI в. на фоне глобального потепления климата стали изменяться режимы, продолжительность, частота, масштабность, число ландшафтных пожаров [1, 2]. Длительные, опустошающие, трудно локализуемые лесные пожары представляют собой чрезвычайные ситуации глобального масштаба, которые имеют место на всех континентах планеты, за исключением Антарктиды [3, 4].

Известно, что лесные пожары являются важным экологическим фактором природных экосистем пожарного типа, способствующим смене лесных биоценозов, сохранению видового разнообразия, минерализации почвенного слоя и др. В то же время в новейшем историческом периоде они стали представлять не только серьезную социально-экономическую угрозу для человеческого общества, но и оказывать значимое глобальное негативное влияние на состояние биосферы [5].

В России, Канаде, США системные исследования в области лесной пирологии начались в 30-х гг. прошлого века. В нашей стране существенный вклад в развитие этой отрасли знаний внесли: Н.П. Курбатский (разработка научных основ построения местных шкал пожарной опасности в лесах), В.Г. Нестеров (обоснование индексов горимости леса), С.М. Вонский, Г.А. Амосов, Г.Н. Коровин и В.Г. Гусев (систематические исследования количественных характеристик лесных пожаров) [6]; И.С. Мелехов, В.А. Жданко, М.А. Софронов, А.В. Волокитина (развитие системы знаний о пирологических характеристиках лесных горючих материалов) [7], А.М. Гришин (создание физико-математических моделей распространения природных пожаров) [8] и многие другие ученые.

В конце XX в. и начале XXI в., ввиду глобальности и актуальности проблемы лесных пожаров, ученые со всего мира интенсивно обменивались опытом и консолидировали усилия по созданию международных моделей природных пожаров. Например, на северо-западных территориях Канады в 1995–2001 гг. был реализован глобальный международный экспериментальный проект по моделированию верховых пожаров с участием более 100 учёных из 14 стран мира, в том числе и из Российской Федерации из Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) [9].

Российская прогностическая модель распространения и поведения пожара, реализуемая в рамках комплексной прогнозно-аналитической системы ИСДМ-Рослесхоз, создавалась с учетом принципов канадской модели CFFBPS (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System), что следует из информационных материалов, размещенных на официальном сайте ФБУ «Авиалесоохрана» (https://nffc.aviales.ru/docs/isdm_docs/Fire_model.pdf).

Для выработки эффективной стратегии адаптации и управления природными пожарами в современном климатическом контексте необходимо иметь представление об актуальных исследованиях в области управления лесными пожарами, проводимых зарубежными научными школами, в том числе канадскими.

Методы исследования

Методологической базой работы стали труды канадских ученых и специалистов в области предупреждения, мониторинга и прогнозирования природных пожаров, в том числе исследования С.Е. Van Wagner, В.Ж. Стокса, Х. Сонга, М.А. Паризьена, К.Е. Барбера, М.Л. Бурбоннаиса, М.С. Кирхмайера-Юнга и др., а также международные информационные базы данных, включая данные агрегатора о состоянии лесов планеты Global Forest Watch (GFW, <https://www.globalforestwatch.org/>), материалы департамента природных ресурсов правительства Канады (<https://natural-resources.canada.ca>), Канадского национального регистра лесов (<https://nfi.nfis.org/en>) и материалы Канадской системы мониторинга и прогнозирования природных пожаров (<https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca>).

Сведения о лесных фондах и лесных пожарах в Канаде

Согласно информационно-аналитическим данным GFW Канада занимает третье место в мире по площади лесных насаждений после России и Бразилии – 421 Мга. На территории Канады имеется множество природных национальных парков (рис. 1).



а



б)

Рис. 1. а) Национальный парк Брюс Пенинсула (Онтарио, Канада);
б) Национальный парк Банф (Альберта, Канада)

Данные инвентаризации древесных и недревесных лесных материалов и распределение их по возрастным группам представлены в табл. 1 (<https://nfi.nfis.org/en>).

Таблица 1

Общий запас древесной и недревесной растительности, млн м³, на канадских лесных угодьях по типам и возрастам

	Запасы древесной и нелесной лесной растительности, м³											
	Возраст лесной растительности, лет											
Тип леса	1–20	21–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	141–160	161–180	181– 200	>200	Итого
НР	1,79	2,07	6,53	24,59	26,36	31,81	5,70	0,54	0,25	0,19	0,09	99,94
Ш	221,57	585,37	1199,20	2015,71	1806,82	727,65	302,96	115,35	16,44	18,94	14,66	7024,68
С	233,94	624,61	1127,33	1691,79	1605,89	1137,56	498,37	218,27	55,10	28,01	34,72	7255,59
Х	326,38	1593,29	2682,88	4111,47	4759,52	7056,66	5381,55	2538,47	1113,41	596,74	6532,9128	36693,36
Итого	783,69	2805,35	5015,94	7843,56	198,59	8953,69	6188,58	2872,63	1185,20	643,88	6582,45	51073,56

Примечания: НР – недревесная растительность; Ш – широколиственные леса; С – смешанные леса; Х – хвойные леса

Анализ данных инвентаризации лесов, осуществленной в 2007–2017 гг., свидетельствует о том, что в Канаде преобладают хвойные деревья – на их долю приходится 71,84 % лесных материалов. Запасы широколиственных деревьев ощутимо (более чем в 5 раз меньше), их доля составляет 13,75 % от общей лесной растительности. Обращает на себя внимание «солидный» возраст хвойных лесов, фонд старых деревьев более 100 лет составляет 63,28 %, а деревьев старше 200 лет – 12,79 %. Забегая вперед, обратим внимание на то, что, по мнению ряда канадских ученых, именно высокий возраст лесов (лесных горючих материалов), хуже удерживающих влагу и легче поддающихся воспламенению, чем молодые деревья, рассматривается в качестве одной из основных причин небывалых прежде лесных пожаров 2023–2025 гг.

Динамика утраты лесных угодий в 2001–2025 гг. суммарно и вследствие пожаров отражена на рис. 2 (<https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/CAN/>).

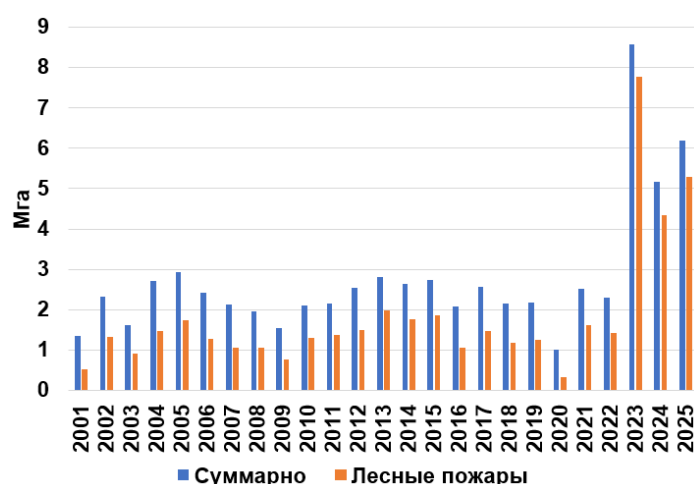


Рис. 2. Динамика потерь лесных площадей суммарно и вследствие пожаров в Канаде в 2001–2025 гг.

С 2001 по 2022 г. площадь лесных пожаров в Канаде не превышала 2 Мга. Максимальное значение 1,98 Мга было зафиксировано в 2013 г., а минимальное 0,32 Мга – в 2020 г. В 2023 г. страна пережила небывалое доселе бедствие – суммарно огнем было пройдено 7,76 Мга лесных угодий. В 2024 г. – 4,3 Мга, в 2025 г. – 5,3 Мга, то есть кардинально увеличились масштабы лесных пожаров.

Пожароопасные сезоны последних трех лет заставили ученых, политиков, ответственных лиц переосмыслить стратегию предупреждения и управления лесными пожарами и адаптации к ним в условиях изменения климата.

Канадская система мониторинга и прогнозирования природных пожаров

В 70-х гг. прошлого века Канадская лесная служба, Канадский межведомственный центр по борьбе с лесными пожарами в сотрудничестве с провинциальными и территориальными агентствами по борьбе с лесными пожарами приступили к разработке комплексной системы мониторинга и прогнозирования пожарной опасности лесов (Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS) [9, 10]. Эта комплексная модель развивалась в результате обработки большого количества эмпирического материала по ландшафтным пожарам разных типов. Модель CFFDRS, на основе комплексной оценки пожарной опасности погоднo-климатических условий и состояния лесных горючих материалов, позволяет прогнозировать возникновение, распространение, поведение лесных пожаров, обосновывать мероприятия по предотвращению и управлению лесными пожарами, определять силы и средства для их ликвидации и др. [10].

CFFDRS включает следующие подсистемы:

- подсистему прогнозирования развития пожаров (Fire Behaviour Prediction (FBP), разработанный группой ученых S.W. Taylor, M.E. Alexander, D.D.B. Perrakis, B.J. Stocks [9];
- подсистему индексирования пожароопасной погоды (Fire Weather Index (FWI), в разработку и структурирование которой значимый вклад внес Ch. Van Wagner [10];
- подсистему прогнозирования возникновения пожаров (Fire Occurrence Prediction (FOP);
- подсистему контроля влагосодержания горючих материалов (Accessory Fuel Moisture System (AFMS)).

Для модели FWI необходимы данные о температуре, относительной влажности, скорости ветра в полдень по местному времени и осадках за 24 ч, высота снежного покрова, направление ветра, точка росы и атмосферное давление, по которым оценивается влагосодержание растительных горючих материалов и прогнозируется возникновение пожаров.

Модель FBP позволяет оценить скорость распространения низовых и верховых пожаров по фронту и по периметру, расход лесных горючих материалов, интенсивность и площадь пожаров, а также с помощью эллиптической модели развития пожара позволяет оценить площадь пожара, его периметр, скорость распространения и поведение по всему периметру.

И, хотя изначальная система концептуально надежна, в 10–20-х гг. нынешнего века стало очевидно, что она уже не отвечала современному информационно-коммуникационному технологическому прогрессу: увеличению вычислительной мощности компьютеров, скорости получения данных с помощью систем удаленного и космического мониторинга (включая данные о погоде в реальном времени, прогнозы погоды, данные спутниковых наблюдений за лесными пожарами и удаленного анализа состояния лесных горючих материалов) и их обработки с использованием искусственного интеллекта, поэтому потребовалось проведение научных исследований по разработке моделей нового поколения с расширенными возможностями [12–14].

Краткий обзор исследований по мониторингу влияния изменения климата на природные пожары

По данным Канадского климатического института, средняя температура по стране повысилась с 1948 г. примерно на 1,7 °C, в целом в Канаде глобальное потепление происходит примерно вдвое быстрее, чем в мире, а в Арктической зоне – в четыре раза быстрее. Согласно текущим прогнозам по пессимистичным сценариям, среднегодовая температура здесь может повыситься на 5 °C к концу столетия, а в северных регионах – до 8 °C [15]. Изменения температурных режимов прогнозируемо будут сопровождаться изменениями других климатических показателей, включая количество осадков, продолжительность вегетационного периода, что неизбежно приведет к значительному изменению растительных (лесных) экосистем по видовому и количественному составу [16].

В актуальных условиях разработка подходов и инструментов для количественной оценки влияния климатических, биотических и топографических характеристик на состояние лесных горючих материалов, а также предоставление пространственно-согласованной и актуальной информации о риске лесных пожаров имеет критически важное значение.

Одно из первых знаковых исследований в области оценки влияния изменения климата было проведено в 1991 г. М. Flannigan и С.Е. Van Wagner с использованием трех моделей общей циркуляции атмосферы (модели Лаборатории геофизической гидродинамики, модели Института космических исследований имени Годдарда и модели Университета штата Орегон) и разработанных авторами моделей прогнозирования лесных пожаров в Канаде [17].

В качестве показателя влияния изменения климата на лесные пожары применялся сезонный индекс опасности (seasonal severity rating, SSR), рассчитанный с учетом удвоения концентрации CO₂ в воздушной среде. SSR является компонентом канадской системы индексирования пожароопасной погоды (fire weather index, FWI) и представляет собой усредненное значение ежедневных индексов опасности (daily severity rating, DSR), которые, в свою очередь, вычисляются по формуле:

$$DSR = 0.0272FWI^{1.77}$$

Для расчета индекса FWI требуются такие погодные данные, как температура атмосферного воздуха, относительная влажность, скорость и направление ветра, точка росы и атмосферное давление, высота снежного покрова в весенне-зимний период. FWI отражает риск (опасность) распространения пожара в определенных точечных пространственно-временных координатах, а индексы DSR и SSR используются для временного или пространственного усреднения показателей пожарной опасности в целях управления лесными пожарами, в том числе для обоснования сил и средств, необходимых для их тушения.

Результаты выполненных расчетных исследований по сценарию, предполагающему удвоение содержания CO_2 относительно 1991 г., выявили несколько критических последствий для режима лесных пожаров в Канаде:

- увеличение индекса SSR на 46 % и сопоставимое увеличение площадей пожаров;
- увеличение продолжительности пожароопасного сезона, подтвержденное результатами более позднего исследования [18], показывающими, что изменение климата приведет к росту продолжительности пожароопасного сезона в Канаде примерно на 22 %, то есть примерно на 30 дн.;

- усиление всех ключевых климатических и биотических факторов возникновения лесных пожаров: ускорение темпов «пожарного созревания» лесных горючих материалов, более высокая грозовая активность, формирование благоприятных погодных условий для возникновения пожаров, включая устойчивые атмосферные блокирующие гребни. Полученные M. Flannigan и C.E. Van Wagner результаты получили подтверждение в значительно более позднем исследовании C. Mulverhill и коллег [19].

В работе [20] описаны результаты изучения влияния изменения погодноклиматических условий в долгосрочной ретроспективе 1971–2019 гг. на режимы и масштабы природных пожаров в провинции Альберта и Национальном парке Вуд-Буффало на Северо-Западных территориях Канады (где совокупная площадь бореальных лесов составляет примерно 409 350 км²) с использованием анализа временных рядов, основанного на архивных метеоданных (температуры воздуха, дефицита давления водяного пара, количества осадков и др.) и сведениях о числе, площади и интенсивности пожаров.

Тренды погодноклиматических характеристик и характеристик пожаров приведены на рис. 3 [20].

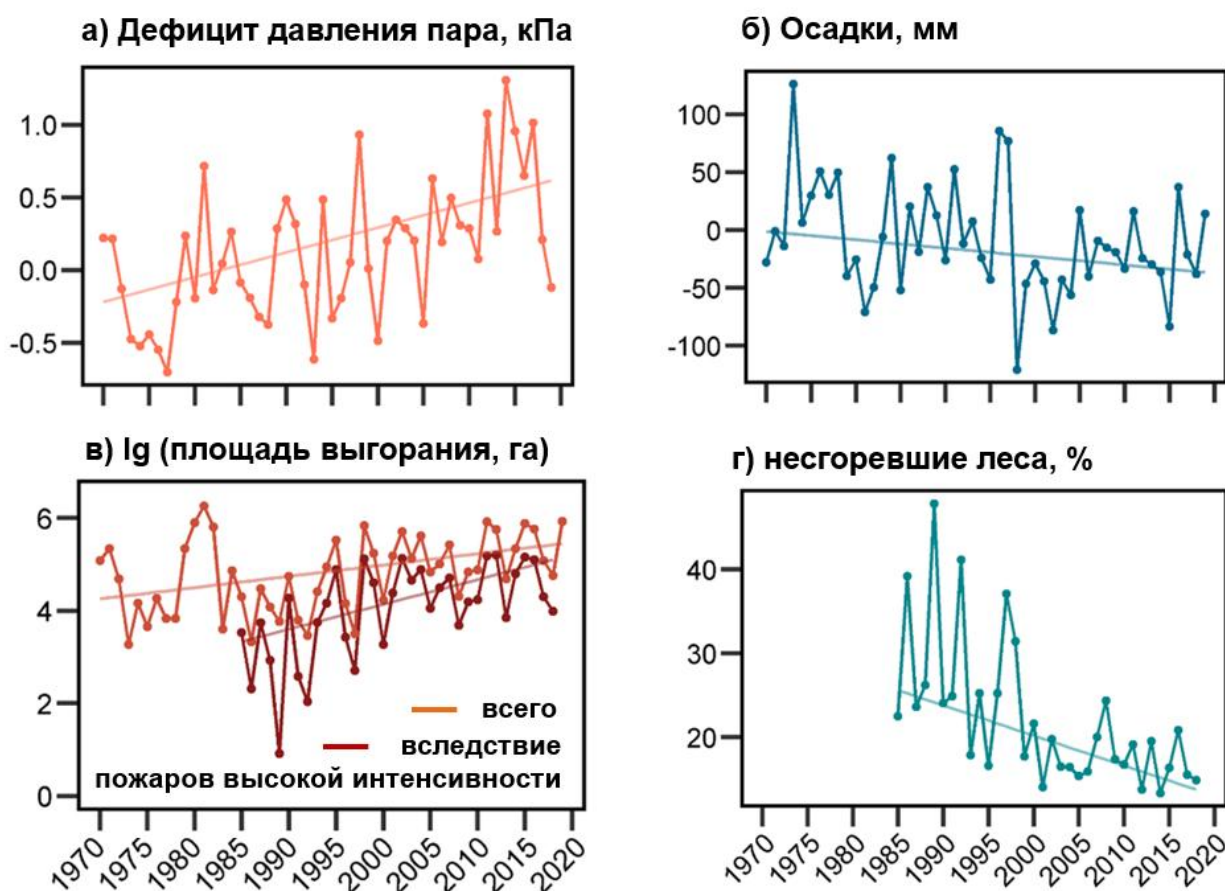


Рис. 3. Временные ряды динамики изменения: а) дефицита давления водяного пара летом; б) годовых осадков; в) площади выгорания лесных территорий; г) доли негоревшего леса на лесных территориях, пройденных пожарами в 1971–2020 гг. в провинции Альберта, Канада

Авторы проверили наличие непараметрических линейных трендов для каждого временного ряда, рассчитав коэффициенты наклона Тейла-Сена и определили значимость ($p \leq 0,05$) линейных трендов, используя односторонний тест тренда Манна-Кендалла в программном продукте EnvStats.

Было подтверждено, что отклонения от исторических режимов пожаров в условиях изменения климата имеют существенные последствия для структуры и состава бореальных лесов, а также для контроля над пожарами.

Аналитическое ретроспективное (с 1920 по 2021 гг.) и прогнозное (до 2100 г.) исследование, проведенное для еще одной канадской провинции – Британской Колумбии, тоже подтвердило общую тенденцию негативного влияния климатических изменений на режимы и характер природных пожаров [21]. На рис. 4 представлены мониторинговые и прогнозные данные по изменению температуры воздуха и дефициту атмосферной влаги в Британской Колумбии [21].

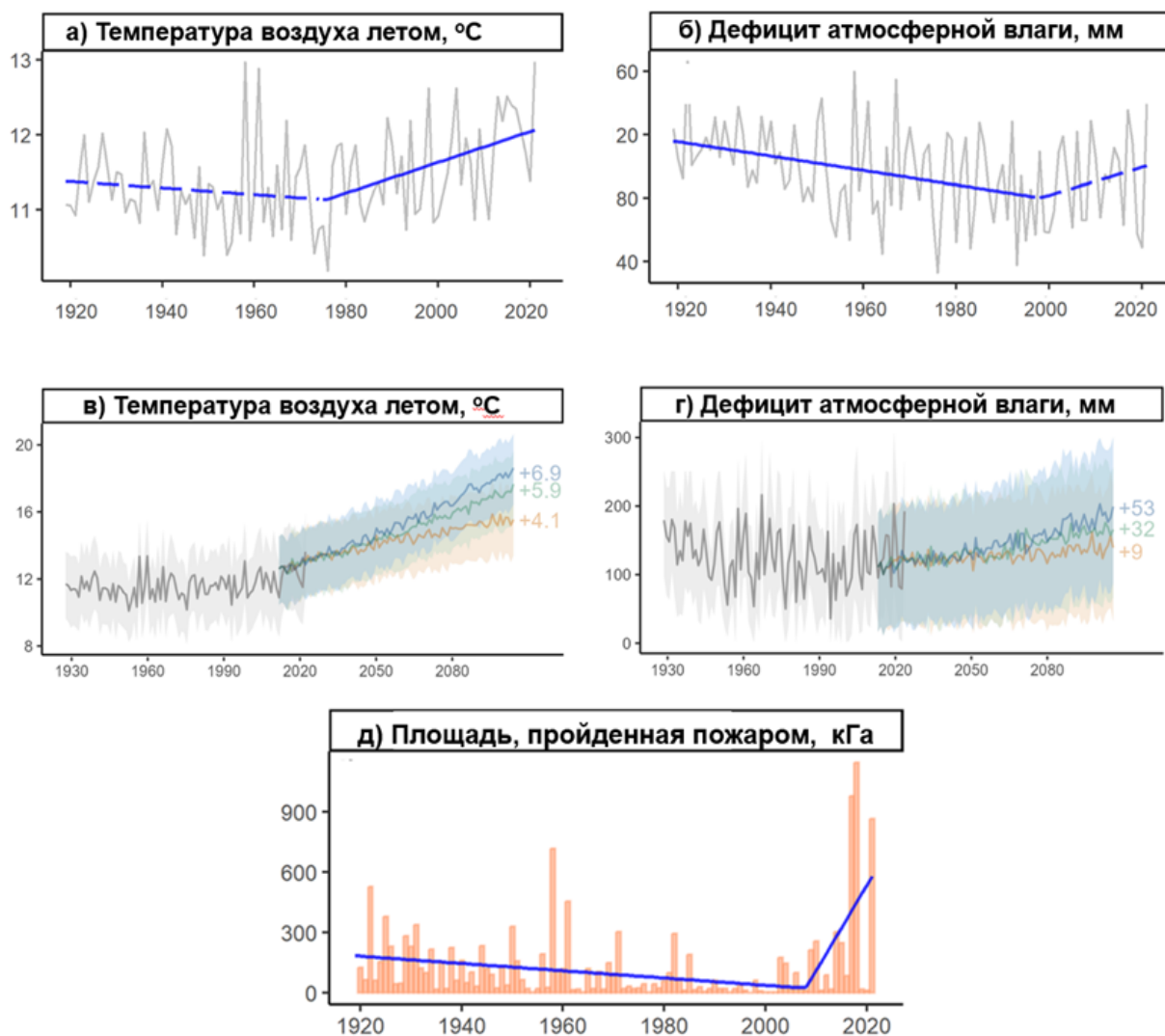


Рис. 4. Временные ряды динамики изменения:

а) летней температуры воздуха и б) дефицита атмосферной влаги в Британской Колумбии в 1920–2020 гг.; временные ряды прогнозных трендов изменения в) летней температуры воздуха и в) дефицита атмосферной влаги в Центральной Британской Колумбии до 2100 г. по пессимистичному (синий), базовому (зеленый) и оптимистичному (оранжевый) сценариям климатических изменений; д) площадь, пройденная пожарами в Британской Колумбии в 1920–2020 гг.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в этой канадской провинции в течение последнего столетия имели место существенные климатические изменения, включая рост температуры воздуха с 1970 по 2021 г. (в центральной зоне на 0,98 °С, в прибрежной – на 1,25 °С, в северной – на 0,61 °С), непропорциональный (замедленный) рост количества осадков, что в совокупности отразилось на увеличении дефицита атмосферной влаги.

С конца прошлого века погодно-климатические условия в Британской Колумбии стали заметно меняться, даже при высоком уровне осадков дефицит атмосферной влаги увеличился из-за быстрого потепления и увеличения эвапотранспирации (рис. 4 б). В результате, после продолжительного спада пожарной активности с 60-х гг. по 2000 г., с начала XXI в. она вновь начала расти (рис. 4 д). Кроме того, средняя продолжительность сезона лесных пожаров, определяемая по метеорологическим данным (высота снежного покрова, количество дней без заморозков и др.), тоже увеличилась на 26,7 дн., а начало пожароопасного сезона (день, когда площадь лесных пожаров достигает 2 % от общей площади, выгоревшей за год, сместилось на 27,1 дн. с начала прошлого века. Площадь выгоревшей территории значительно коррелирует с дефицитом атмосферной влаги (рис. 4 б и 4 д). Следует отметить, что помимо изменения климата, на вариабельность режимов лесных пожаров в трех зонах провинции оказывали влияние грозная активность, повреждение лесов насекомыми, способы лесоведения и т.д.

Результаты прогнозирования по климатическим моделям указывают на то, что даже по оптимистичному сценарию продолжится рост приземной температуры и рост дефицита атмосферной влаги, наиболее проявленный в центральной зоне провинции и наименее – в северной. Учитывая наблюдаемый и прогнозируемый тренд в изменении климата, вероятно, риск возникновения и распространения лесных пожаров будет продолжать расти в нынешнем столетии даже при самом оптимистичном климатическом сценарии.

Можно сказать, что представленные прогнозы уже начали оправдываться с 2023 г., когда Канада пережила беспрецедентные лесные пожары, охватившие в совокупности ~ 15 млн га лесных территорий (рис. 2).

2023 стал самым теплым годом за всю историю метеорологических наблюдений с 1850 г., а средняя температура в Канаде в течение пожароопасного сезона 2023 г. была на 2,2 °С выше, чем в среднем за период 1991–2020 гг. [22].

В 2023 г. лесные пожары в Канаде уничтожили 15 миллионов гектаров, что более чем вдвое превысило предыдущий рекорд. Эти пожары привели к рекордному числу эвакуаций, беспрецедентному ухудшению качества воздуха по всей Канаде и на северо-востоке США, а также к значительной нагрузке на ресурсы по борьбе с пожарами. Численные исследования с использованием климатических моделей (CMIP6-historical и CMIP6-HighResMIP) и модели прогнозирования пожароопасной погоды (CanLEAD-FWI) показали, что вызванное деятельностью человека изменение климата более чем в два раза увеличило вероятность лесных пожаров на востоке и юго-западе Канады, вероятность длительного пожароопасного сезона возросла более чем в пять раз, выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов от лесных пожаров 2023 г. в восемь раз превысили средний показатель за 1985–2022 гг. Авторы прогнозируют дальнейшее увеличение риска экстремальных пожароопасных сезонов в будущем дополнительным риском для здоровья людей и устойчивости экосистем.

В статьях [23] и [24] по результатам аналитических исследований приводятся приблизительные численные оценки влияния антропогенного изменения климата на режимы лесных пожаров. По оценкам специалистов, влияние изменения климата на продолжительность и масштабность природных пожаров составило 30–45 %.

Краткий обзор исследований по оценкам экологических последствий природных пожаров и адаптации к ним

Катастрофические лесные пожары в Канаде в 2023–2025 гг. (особенно 2023 г., когда огнем было пройдено около 15 млн га, более 200 тыс. чел. было эвакуировано из мест своего обитания либо в связи с угрозой огня, либо из-за экстремально высокого загрязнения воздуха, при тушении пожаров погибло 8 пожарных, а в некоторых провинциях (Британской Колумбии,

Альберте, Квебеке и др.) режим чрезвычайного положения продлился около месяца [26]) подтвердили правильность трендов поведения природных пожаров, выявленных предшествующими прогнозами, и заставили встать на путь пересмотра существующих практик в управлении лесным хозяйством, профилактики пожаров и пожаротушении, в подготовке общества к жизни в меняющихся климатических условиях и адаптации к изменению режимов природных пожаров.

Подтверждение тому – ряд научных статей, не только анализирующих причины и экологические последствия этой чрезвычайной ситуации глобального масштаба [22, 26–28], но и предлагающие стратегические концептуальные решения, необходимые для сосуществования с лесными пожарами [29, 30].

В ряде работ анализируется влияние продуктов горения лесных пожаров 2023 г. на выброс парниковых газов и потенциальные климатические эффекты.

Например, численные исследования, выполненные с использованием модели LSM, показали, что в среднем выбросы CO_2 от лесных пожаров в Канаде в период с 1985 по 2022 г. составляли 88 ± 62 Тг CO_2 в год, а выбросы CO_2 в 2023 г. – 700 Тг, что в восемь раз превышает средний показатель за 1985–2022 гг. И это без учета других парниковых газов [22].

Работа [26] посвящена изучению влияния аэрозольных поллютантов от пожаров на прозрачность атмосферы по значениям оптической плотности и на метеорологические условия в Северном полушарии с использованием модели EC-Earth327 и сопоставлением результатов моделирования с данными наблюдений. Предсказуемым результатом исследования явилось подтверждение потенциального охлаждения поверхности вследствие поглощения взвешенными ультрадисперсными частицами солнечной радиации.

В статье [27] исследуется влияние мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$ (частиц диаметром менее 2,5 мкм), выделившихся в атмосферу в ходе катастрофических пожаров 2023 г., на уровень их содержания в атмосфере Канады, США, Евросоюза и глобально, а также их воздействие на здоровье населения. Было обнаружено, что эти пожары привели к увеличению глобальной годовой концентрации $\text{PM}_{2.5}$ на $0,17 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ (95 % доверительный интервал, $0,09\text{--}0,26 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$), в Северной Америке – на $1,08 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ($0,82\text{--}1,34 \text{ мкг}/\text{м}^3$), в Европе – на $0,41 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ($0,32\text{--}0,50 \text{ мкг}/\text{м}^3$); в Канаде – на $3,82 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ($3,00\text{--}4,64 \text{ мкг}/\text{м}^3$), в США – на $1,49 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ($1,22\text{--}1,77 \text{ мкг}/\text{м}^3$), что в четыре раза больше, чем вклад лесных пожаров 2023 г, возникших непосредственно в США. Согласно полученным оценкам 354 млн (277–421 млн) чел. в Северной Америке и Европе подверглись негативному воздействию мелкодисперсных частицами $\text{PM}_{2.5}$ и оно могло спровоцировать 64300 (37 800–90 900) случаев преждевременной смерти среди людей с хроническими заболеваниями в Северной Америке и Европе.

Масштабные социально-экономические и экологические последствия природных пожаров 2023 г. для населения, экономические – для лесных хозяйств, экологические – для природных экосистем привели научное канадское общество к необходимости обоснования новых стратегических путей и методов контроля и управления лесными пожарами [29, 30].

Можно выделить следующие стратегические направления [29, 30]:

1. Организация пожаротушения. По мнению ведущих канадских специалистов в области лесной пирологии, одними из причин столь масштабных пожаров 2023–2025 гг. явились применявшаяся десятилетиями практика агрессивного пожаротушения и практически полный запрет на профилактический отжиг растительности, что привело к формированию одновозрастных старых лесных массивов, восприимчивых к горению.

2. Неполное тушение лесных пожаров, а управление ими позволит постепенно снизить количество лесных горючих материалов, будет способствовать видовому разнообразию и предотвращению в будущем распространения масштабных пожаров.

3. Одновременно приходится признать, что изменение климата, увеличение длительности пожароопасной погоды, изменение характеристик пожарного созревания лесной растительности будут в ближайшей перспективе приводить к большему числу продолжительных ландшафтных пожаров, поэтому требуется увеличение сил и средств для тушения пожаров.

4. Лесохозяйственная деятельность. На лесных территориях, где велись лесозаготовки и были нарушены исторические циклы лесных пожаров, сосредоточены густые одновозрастные хвойные леса. Для повышения резистентности лесов к пожарам, увеличения видового разнообразия растительности целесообразно на вырубках и на территориях после пожаров увеличивать долю лиственных пород деревьев (таких как осина, белая береза и красный клен), менее склонных к возгоранию, чем хвойные породы (такие как пихта бальзамическая, ель черная и сосна Банкса). Для повышения устойчивости к пожарам лесов, где преобладают черная ель и сосна Банкса, при лесозаготовке предпочтение может быть отдано видам с ускоренным созреванием, а также можно использовать технологию частичной вырубki, оставляя мозаично, подобно пожарам, нетронутыми зрелые деревья в качестве естественного семенного фонда.

5. Образовательная деятельность. Комплексные эффективные решения в области лесной пирологии требуют междисциплинарных подходов, ориентированных на глубокие знания в области экологии и управления лесными пожарами. По мнению авторов, отсутствие специализированных образовательных программ в области пожарной экологии лесов и управления лесными пожарами является одним из препятствий на пути совершенствования системы управления лесными пожарами.

Заключение

Признавая положительную историческую роль лесных пожаров как регуляторного экологического фактора, важно понимать, что глобальное потепление приводит к изменению погодно-климатических условий в направлении, благоприятствующем негативному изменению режимов лесных пожаров, что проявляется в сокращении сроков между пожарами, повышении их агрессивности, увеличении длительности и росту площадей, пройденных огнем. Отмеченные выше обстоятельства ставят перед мировой общественностью нетривиальную задачу – на основе всестороннего анализа выработать эффективную стратегию управления природными пожарами и адаптации к ним в условиях изменения климата.

Отдавая должное отечественным ученым и сотрудникам специализированных служб, а именно российские ученые основали «лесную пирофизику» как самостоятельную науку, в нашей стране была создана и эффективно работает крупнейшая в мире служба «Авиалесоохрана», специализирующаяся на тушении пожаров с воздуха, учеными Института космических исследований РАН в сотрудничестве с Институтом лесного хозяйства им. В.Н. Сукачева СО РАН и др. организациями была разработана система спутникового мониторинга пожаров, пожарной опасности и восстановления лесов после пожаров по всей Евразии, важно осознавать, что для эффективного ответа на новые угрозы необходимо иметь представление о передовых достижениях зарубежных ученых и учитывать зарубежный опыт.

Канадские ученые внесли весомый вклад в развитие науки о лесных пожарах, к их ключевым достижениям относится разработка фундаментальных систем прогнозирования, управления и смягчения последствий пожаров (системы оценки и прогнозирования пожарной опасности (пожароопасной погоды), системы прогнозирования поведения ландшафтных пожаров, системы поддержки принятия оперативных решений, позволяющей ведомствам оптимизировать распределение ресурсов, включая размещение самолетов-танкеров, время разворачивания и оценку рисков эвакуации населения), использующихся во многих странах мира. Результаты исследования взаимосвязи лесных пожаров, изменения климата, лесохозяйственной практики и практики пожаротушения, а также ретроспективного анализа качественно-количественного состава бореальных лесов и факторов, повлиявших на них, позволили канадским ученым сформировать современные представления о частоте и пространственно-временных характеристиках пожаров, восстановлении лесов и обосновать стратегически целесообразные подходы для управления лесными пожарами и минимизации их последствий в условиях глобального потепления.

Список источников

1. Curt C., Curt T. A Review of the Literature on Wildfires in the Context of Climate Change // Fire. 2026. Vol. 9 (2). P. 52. DOI: 10.3390/fire9020052
2. Wildfire risk for species under climate change / X. Yang [et al.] // Nature Climate Change. 2026. Vol. 16. P. 613–621. DOI: 10.1038/s41558-026-02600-5
3. Wildfire in Australia during 2019–2020, Its Impact on Health, Biodiversity and Environment with Some Proposals for Risk Management: A Review / Md. K. Haque [et al.] // Journal of Environmental Protection. 2021. № 12. P. 391–414. DOI: 10.4236/jep.2021.126024
4. Kigomo J.N., Obwoyere G., Kirui B. Influence of wildfires severity on tree composition and structure in Aberdare Afromontane forest ranges, Kenya // Trees, Forests and People. 2024. Vol. 18. P. 100695. DOI: 10.1016/j.tfp.2024.100695
5. Ложкина О.В. Природные пожары и глобальное изменение климата: взаимное влияние, динамика, последствия: монография. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2025. 183 с.
6. Гусев В.Г., Арцыбашев Е.С. Исследования Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства в области охраны лесов от пожаров // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2014. № 2. С. 56–73.
7. Волокитина А.В., Софронова Т.М., Корец М.А. Технология составления карт растительных горючих материалов (карт РГМ) // Наука и технологии Сибири. 2024. № 2 (13). С. 26–30.
8. Гришин А.М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2008. № 2 (3). С. 105–114.
9. Canadian Forest Fire Danger Rating System: an overview / B.J. Stocks [et al.] // For. Chron. 1989. Vol. 65 (4). P. 258–265. DOI: 10.5558/tfc65258-4
10. Van Wagner C.E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System: Forestry Technical Report. Canadian Forestry Service, Headquarters, Ottawa. 1987. № 35. 35 p.
11. Stocks B.J., Alexander M.E., Lanoville R.A. Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME) // Can. J. For. Res. 2004. Vol. 34. № 8. P. 1543–1547. DOI: 10.1139/x04-905
12. Elliott K.G., Flannigan M.D., Tymstra C. Enhanced prediction of extreme fire weather conditions in spring using the Hot-Dry-Windy Index in Alberta, Canada // International Journal of Wildland Fire. 2024. Vol. 33. WF24015. DOI: 10.1071/WF24015
13. A Novel CFFBP algorithm with non-interpolation Image Merging for Bistatic Forward-Looking SAR Focusing / Yu. Li [et al.] // Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. № 5225916. P. 1–16. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3162230
14. Canadian Forest Service Fire Danger Group. The 2025 Update to the FWI System: Structure, Changes and Interpretation. Information Report (GLFC – Sault Ste. Marie), GLC-X-42, 59. Natural Resources Canada. 2025. DOI: 10.4095/st000101
15. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / H.O. Pörtner [et al.]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. P. 3–33. DOI: 10.1017/9781009325844.001
16. Wotherspoon A.R., Achim A., Coops N.C. Assessing future climate trends and implications for managed forests across Canadian ecozones // Canadian Journal of Forest Research. 2024. Vol. 54. № 3. P. 278–289. DOI: 10.1139/cjfr-2023-0058
17. Flannigan M., Van Wagner C.E. Climate change and wildfire in Canada // Canadian Journal of Forest Research. 1991. Vol. 21 (1). P. 66–72. DOI: 10.1139/x91-010

18. Implications of changing climate for global wildland fire / M.D. Flannigan [et al.] // *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18. № 5. P. 483. DOI: 10.1071/WF08187
19. Projected Future Changes in Burn Probability in Canada's Forests and Communities Under Different Climate Change Scenarios / C. Mulverhill [et al.] // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2025. Vol. 51. № 1. P. 2560347. DOI: 10.1080/07038992.2025.2560347
20. Abrupt, climate-induced increase in wildfires in British Columbia since the mid-2000s / M.A. Parisien [et al.] // *Communications Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. P. 309. DOI: 10.1038/s43247-023-00977-1
21. Climate-induced fire regime amplification in Alberta, Canada / E. Whitman [et al.] // *Environ. Res. Lett.* 2022. Vol. 17. P. 055003. DOI: 10.1088/1748-9326/ac60d6
22. Human driven climate change increased the likelihood of the 2023 record area burned in Canada / M.C. Kirchmeier-Young [et al.] // *NPJ Clim. Atmos. Sci.* 2024. Vol. 7. P. 316. DOI: 10.1038/s41612-024-00841-9
23. Attribution of the influence of human-induced climate change on an extreme fire season / M.C. Kirchmeier-Young [et al.] // *Earth's Future*. 2019. Vol. 7. P. 2–10. DOI: 10.1029/2018EF001050
24. Ложкина О.В., Орловцев С.В., Савинов А.Г. Анализ влияния изменения климата на природные пожары на примере российской федерации и ряда зарубежных стран // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2022. № 4 (64). С. 111–121.
25. Barber Shifting wildfire spread dynamics in Canada: declining spread rates but increasing spread days under more severe fire weather from 2002 to 2024 / Yu. Boulanger [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. 2026. Vol. 56. P. 1–15. DOI: 10.1139/cjfr-2026-0100
26. Large-scale impacts of the 2023 Canadian wildfires on the Northern Hemisphere atmosphere / I.A. Roşu [et al.] // *NPJ Clean Air Sci.* 2025. Vol. 1. № 22. DOI: 10.1038/s44407-025-00022-9
27. Long-range PM_{2.5} pollution and health impacts from the 2023 Canadian wildfires / Q. Zhang [et al.] // *Nature*. 2025. Vol. 645. P. 672–678. DOI: 10.1038/s41586-025-09482-1
28. Chen H., Zhang W., Sheng L. Canadian record-breaking wildfires in 2023 and their impact on US air quality // *Atmospheric Environment*. 2025. Vol. 342. P. 120941. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120941
29. The 2023 wildfires in British Columbia, Canada: impacts, drivers, and transformations to coexist with wildfire / L.D. Daniels [et al.] // *Can. J. For. Res.* 2025. Vol. 55. P. 1–18. DOI: 10.1139/cjfr-2024-0092
30. The 2023 wildfire season in Québec: an overview of extreme conditions, impacts, lessons learned, and considerations for the future / Yu. Boulanger [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. 2025. Vol. P. 1–21. DOI: 10.1139/cjfr-2023-0298

References

1. Curt C., Curt T. A Review of the Literature on Wildfires in the Context of Climate Change // *Fire*. 2026. Vol. 9 (2). P. 52. DOI: 10.3390/fire9020052
2. Wildfire risk for species under climate change / X. Yang [et al.] // *Nature Climate Change*. 2026. Vol. 16. P. 613–621. DOI: 10.1038/s41558-026-02600-5
3. Wildfire in Australia during 2019–2020, Its Impact on Health, Biodiversity and Environment with Some Proposals for Risk Management: A Review / Md.K. Haque [et al.] // *Journal of Environmental Protection*. 2021. № 12. P. 391–414. DOI: 10.4236/jep.2021.126024
4. Kigomo J.N., Obwoyere G., Kirui B. Influence of wildfires severity on tree composition and structure in Aberdare Afromontane forest ranges, Kenya // *Trees, Forests and People*. 2024. Vol. 18. P. 100695. DOI: 10.1016/j.tfp.2024.100695
5. Lozhkina O.V. Prirodnye pozhary i global'noe izmenenie klimata: vzaimnoe vliyanie, dinamika, posledstviya: monografiya. SPb.: Sankt-Peterburgskij universitet GPS MCHS Rossii, 2025. 183 s.

6. Gusev V.G., Arcybashev E.S. Issledovaniya Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva v oblasti ohrany lesov ot pozharov // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva. 2014. № 2. S. 56–73.
7. Volokitina A.V., Sofronova T.M., Korec M.A. Tekhnologiya sostavleniya kart rastitel'nyh goryuchih materialov (kart RGM) // Nauka i tekhnologii Sibiri. 2024. № 2 (13). S. 26–30.
8. Grishin A.M. O matematicheskom modelirovanii prirodnyh pozharov i katastrof // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. 2008. № 2 (3). S. 105–114.
9. Canadian Forest Fire Danger Rating System: an overview / B.J. Stocks [et al.] // For. Chron. 1989. Vol. 65 (4). P. 258–265. DOI: 10.5558/tfc65258-4
10. Van Wagner C.E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System: Forestry Technical Report. Canadian Forestry Service, Headquarters, Ottawa. 1987. № 35. 35 p.
11. Stocks B.J., Alexander M.E., Lanoville R.A. Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME) // Can. J. For. Res. 2004. Vol. 34. № 8. P. 1543–1547. DOI: 10.1139/x04-905
12. Elliott K.G., Flannigan M.D., Tymstra C. Enhanced prediction of extreme fire weather conditions in spring using the Hot-Dry-Windy Index in Alberta, Canada // International Journal of Wildland Fire. 2024. Vol. 33. WF24015. DOI: 10.1071/WF24015
13. A Novel CFFBP algorithm with non-interpolation Image Merging for Bistatic Forward-Looking SAR Focusing / Yu. Li [et al.] // Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. № 5225916. P. 1–16. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3162230
14. Canadian Forest Service Fire Danger Group. The 2025 Update to the FWI System: Structure, Changes and Interpretation. Information Report (GLFC – Sault Ste. Marie), GLC-X-42, 59. Natural Resources Canada. 2025. DOI: 10.4095/st000101
15. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / H.O. Pörtner [et al.]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. P. 3–33. DOI: 10.1017/9781009325844.001
16. Wotherspoon A.R., Achim A., Coops N.C. Assessing future climate trends and implications for managed forests across Canadian ecozones // Canadian Journal of Forest Research. 2024. Vol. 54. № 3. P. 278–289. DOI: 10.1139/cjfr-2023-0058
17. Flannigan M., Van Wagner C.E. Climate change and wildfire in Canada // Canadian Journal of Forest Research. 1991. Vol. 21 (1). P. 66–72. DOI: 10.1139/x91-010
18. Implications of changing climate for global wildland fire / M.D. Flannigan [et al.] // International Journal of Wildland Fire. 2009. Vol. 18. № 5. P. 483. DOI: 10.1071/WF08187
19. Projected Future Changes in Burn Probability in Canada's Forests and Communities Under Different Climate Change Scenarios / C. Mulverhill [et al.] // Canadian Journal of Remote Sensing. 2025. Vol. 51. № 1. P. 2560347. DOI: 10.1080/07038992.2025.2560347
20. Abrupt, climate-induced increase in wildfires in British Columbia since the mid-2000s / M.A. Parisien [et al.] // Communications Earth & Environment. 2023. Vol. 4. P. 309. DOI: 10.1038/s43247-023-00977-1
21. Climate-induced fire regime amplification in Alberta, Canada / E. Whitman [et al.] // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17. P. 055003. DOI: 10.1088/1748-9326/ac60d6
22. Human driven climate change increased the likelihood of the 2023 record area burned in Canada / M.C. Kirchmeier-Young [et al.] // NPJ Clim. Atmos. Sci. 2024. Vol. 7. P. 316. DOI: 10.1038/s41612-024-00841-9
23. Attribution of the influence of human-induced climate change on an extreme fire season / M.C. Kirchmeier-Young [et al.] // Earth's Future. 2019. Vol. 7. P. 2–10. DOI: 10.1029/2018EF001050
24. Lozhkina O.V., Orlovcev S.V., Savinov A.G. Analiz vliyaniya izmeneniya klimata na prirodnye pozhary na primere rossijskoj federacii i ryada zarubezhnyh stran // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 4 (64). S. 111–121.

25. Barber Shifting wildfire spread dynamics in Canada: declining spread rates but increasing spread days under more severe fire weather from 2002 to 2024 / Yu. Boulanger [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. 2026. Vol. 56. P. 1–15. DOI: 10.1139/cjfr-2026-0100
26. Large-scale impacts of the 2023 Canadian wildfires on the Northern Hemisphere atmosphere / I.A. Roşu [et al.] // NPJ Clean Air Sci. 2025. Vol. 1. № 22. DOI: 10.1038/s44407-025-00022-9
27. Long-range PM_{2.5} pollution and health impacts from the 2023 Canadian wildfires / Q. Zhang [et al.] // Nature. 2025. Vol. 645. P. 672–678. DOI: 10.1038/s41586-025-09482-1
28. Chen H., Zhang W., Sheng L. Canadian record-breaking wildfires in 2023 and their impact on US air quality // Atmospheric Environment. 2025. Vol. 342. P. 120941. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120941
29. The 2023 wildfires in British Columbia, Canada: impacts, drivers, and transformations to coexist with wildfire / L.D. Daniels [et al.] // Can. J. For. Res. 2025. Vol. 55. P. 1–18. DOI: 10.1139/cjfr-2024-0092
30. The 2023 wildfire season in Québec: an overview of extreme conditions, impacts, lessons learned, and considerations for the future / Yu. Boulanger [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. 2025. Vol. P. 1–21. DOI: 10.1139/cjfr-2023-0298

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 10.05.2026; одобрена после рецензирования: 21.05.2026; принята к публикации: 14.06.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 10.05.2026; approved after review: 21.05.2026; accepted for publication: 14.06.2026

Информация об авторах:

Ложкина Ольга Владимировна, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, кандидат химических наук, профессор, e-mail: olojkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8604-2698>, SPIN-код: 6275-4249

Information about the authors:

Lozhkina Olga V., professor of the department of chemistry and combustion processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, candidate of chemical sciences, professor, e-mail: olojkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8604-2698>, SPIN: 6275-4249

Научная статья

УДК 004.8:614.8:623.746.-519; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-45-55

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ: ПАТЕНТНЫЙ И ПУБЛИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Смирнов Алексей Сергеевич;

✉ **Юрченко Роман Александрович.**

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ **ray1981@yandex.ru**

Аннотация. Выполнен патентный и публикационный анализ применения беспилотных авиационных систем в поддержке принятия решений при чрезвычайных ситуациях. Рассмотрены российские и зарубежные патентные решения, а также научные публикации, посвящённые мониторингу обстановки, выявлению опасных факторов, поисково-спасательным работам, обработке визуальных и тепловизионных данных и использованию алгоритмов интеллектуального анализа. Выделены основные направления развития беспилотных авиационных систем, их функциональные возможности и ограничения при решении задач информационного обеспечения органов управления. Показано, что наибольший практический эффект достигается при интеграции беспилотных авиационных систем в системы поддержки принятия решений, а также при развитии интегрированной интеллектуальной беспилотной авиационной системы, обеспечивающей повышение оперативности, обоснованности и адресности управленческих воздействий в условиях чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: интеллектуальные беспилотные авиационные системы; системы поддержки принятия решений; чрезвычайные ситуации; мониторинг обстановки; патентный анализ; публикационный анализ

Для цитирования: Смирнов А.С., Юрченко Р.А. Применение беспилотных авиационных систем в поддержке принятия решений при чрезвычайных ситуациях: патентный и публикационный анализ // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 45–55. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-45-55

Scientific article

APPLICATION OF UNMANNED AERIAL SYSTEMS IN DECISION SUPPORT DURING EMERGENCIES: PATENT AND PUBLICATION ANALYSIS

Smirnov Aleksey S.;

✉ **Yurchenko Roman A.**

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ **ray1981@yandex.ru**

Abstract. The article presents a patent and publication analysis of the use of unmanned aerial systems in decision support during emergencies. Russian and foreign patent solutions, as well as scientific publications devoted to situation monitoring, hazardous factor detection, search and rescue operations, visual and thermal imaging data processing, and intelligent data analysis algorithms, are examined. The main directions of unmanned aerial system development, their functional capabilities, and limitations in solving information support tasks for management bodies

are identified. It is shown that the greatest practical effect is achieved through the integration of unmanned aerial systems into decision support systems, as well as through the development of an integrated intelligent unmanned aerial system that ensures increased timeliness, validity, and targeting of managerial actions under emergency conditions.

Keywords: intelligent unmanned aerial systems, decision support systems, emergencies, situation monitoring, patent analysis, publication analysis

For citation: Smirnov A.S., Yurchenko R.A. Application of unmanned aerial systems in decision support during emergencies: patent and publication analysis // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 45–55. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-45-55

Введение

В условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) эффективность управления определяется своевременностью получения, полнотой и интерпретируемостью информации об оперативной обстановке. В этой связи беспилотные авиационные системы (БАС) приобретают всё большее значение как средство воздушного мониторинга, выявления опасных факторов, поиска пострадавших и наблюдения за динамикой развития пожаров и других ЧС. При этом наибольший интерес для органов управления представляет не только получение данных с борта БАС, но и их преобразование в информационные продукты, пригодные для использования в системах поддержки принятия решений (СППР) [1–7].

Современные исследования и практические разработки показывают высокую эффективность БАС при решении задач визуального и тепловизионного контроля, обнаружения очагов горения и задымления, обследования труднодоступных территорий, а также при выполнении поисково-спасательных мероприятий [2, 3, 5, 8, 9–16].

Вместе с тем анализ публикаций и патентов показывает, что большинство существующих решений сосредоточено преимущественно на получении и первичной обработке данных, тогда как вопросы использования БАС именно в СППР при ЧС раскрыты значительно слабее [1–6, 17–19]. Вследствие этого сохраняется разрыв между возможностями беспилотного мониторинга и потребностями органов управления в структурированной, управленчески значимой информации.

В статье выполнен патентный и публикационный анализ применения БАС в условиях ЧС, позволяющий выявить существующие ограничения и определить основные направления развития с учётом интеграции БАС в СППР.

В соответствии с обозначенной проблематикой в статье поставлены и решены следующие задачи исследования:

1. Проанализировать отечественные и зарубежные публикации и патенты по применению БАС при ЧС.
2. Классифицировать существующие решения по направлениям и задачам применения.
3. Выделить ключевые технологические компоненты и функциональные возможности рассматриваемых БАС.
4. Установить основные ограничения использования БАС в СППР.
5. Сформулировать требования к ИБАС для информационной поддержки органов управления.
6. Предложить направления дальнейшего развития проекта интеллектуального БАС, включая расширение расчётных модулей, внедрение моделей искусственного интеллекта, отработку сценариев для объектов нефтегазового комплекса, поисково-спасательных работ и пожаров, а также экспериментальную валидацию эффективности.

Цель исследования состоит в выявлении функциональных возможностей и ограничений применения БАС в задачах поддержки принятия решений при ЧС на основе сопоставительного патентного и публикационного анализа.

Научная новизна исследования заключается в том, что применение БАС рассмотрено не только как средство мониторинга и обнаружения опасных факторов, но и как элемент СППР; на этой основе выявлен разрыв между этапами получения данных и формирования управленчески значимой информации, а также обоснованы направления развития ИБАС.

Методы исследования

Исследование выполнено на основе патентного анализа, библиографического анализа научных публикаций, классификации и сравнительного сопоставления решений по применению БАС при ЧС [1–30]. В анализ включались российские и зарубежные патенты, статьи и диссертационные исследования, содержащие сведения о назначении систем, составе полезной нагрузки, способах получения и обработки данных, а также о характере выходной информации для органов управления.

Сопоставление рассмотренных решений проводилось по следующим признакам: область применения, тип сенсорных средств, функциональные возможности, уровень обработки данных, форма представления результатов и степень их пригодности для использования в системах поддержки принятия решений. Дополнительно выполнялась систематизация решений по этапам работы СППР: сбор данных, выявление опасных признаков, аналитическая интерпретация, формирование информационного продукта для управления и интеграция в управленческий цикл.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведённый анализ показывает, что современное применение БАС при ЧС характеризуется переходом от решения отдельных задач воздушного наблюдения к более сложным функциям, связанным с обработкой данных, автоматизированным выявлением опасных признаков и информационной поддержкой органов управления [1–30]. При этом как патентный, так и публикационный массив демонстрируют устойчивый рост интереса к применению БАС в условиях высокой динамики изменения обстановки, ограниченной доступности территории и необходимости оперативного получения достоверной информации.

Наиболее разработанным направлением является использование БАС для мониторинга пожаров и ЧС. В этой группе решений БАС применяются для воздушной разведки, наблюдения за развитием очага, оценки площади и конфигурации опасной зоны, передачи видеоданных в реальном времени и получения дополнительной информации о состоянии объекта защиты [2–7, 19, 20, 22, 25–27]. Практическая значимость данного направления определяется возможностью быстрого обследования труднодоступных, протяжённых и опасных участков без непосредственного риска для личного состава. Вместе с тем в большинстве работ результат использования БАС ограничивается предоставлением оператору видеопотока, снимков или отдельных измерений, что не означает наличие полноценной СППР.

Существенный блок исследований связан с автоматизированным выявлением признаков горения, задымления и тепловых аномалий на основе методов компьютерного зрения и интеллектуального анализа изображений [5, 8, 9–13, 16]. В данных работах показана высокая эффективность нейросетевых алгоритмов при обработке данных аэрофотосъёмки и дистанционного наблюдения, особенно в задачах раннего выявления опасных признаков и повышения оперативности реагирования. Аналогичные тенденции прослеживаются и в патентных решениях, где реализуются средства раннего обнаружения пожара, идентификации дыма и автономного наблюдения за пожароопасной обстановкой [20, 22, 24–26]. Однако даже при высокой точности детекции конечный результат во многих случаях остаётся на уровне сигнала о наличии опасного признака, без дальнейшего преобразования в управленчески значимую информацию, необходимую для выбора тактики действий.

Отдельное направление составляют решения, ориентированные на поисково-спасательные работы и тепловизионную поддержку подразделений [2, 14, 15, 18, 23]. Их ценность особенно высока в условиях ограниченной видимости, сложного рельефа, ночного времени, задымления и неопределённости местонахождения пострадавших. Применение тепловизионных и комбинированных полезных нагрузок позволяет повысить вероятность обнаружения людей, локализовать зоны повышенной температуры и уточнить фактическую оперативную обстановку. Вместе с тем и здесь основное внимание сосредоточено на расширении возможностей наблюдения, тогда как формализация результатов обследования в виде стандартных предупреждений, приоритетов реагирования и рекомендаций для руководителя ликвидации ЧС представлена ограниченно.

Значимый массив публикаций посвящён применению БАС для контроля объектов нефтегазового комплекса, трубопроводной инфраструктуры и иных территориально распределённых объектов [1, 4, 6, 7, 18, 19, 27, 28]. В данных исследованиях БАС используются для визуального и тепловизионного обследования, диагностики состояния оборудования, выявления деформаций, контроля технологических нарушений и анализа потенциально опасных сценариев. Тем не менее даже в этом сегменте интеграция результатов в СППР чаще всего остаётся неполной и сводится к передаче данных оператору или внешней информационной системе.

Дополнительный интерес представляет аграрный сектор, в котором БАС широко применяются для мониторинга больших площадей, дистанционной оценки состояния объектов, построения карт, выявления неоднородностей и принятия решений по результатам оперативной обработки изображений [29, 30]. Хотя данные исследования не относятся напрямую к пожарно-спасательной деятельности, они имеют важное методическое значение. Именно в аграрной сфере хорошо отработаны подходы к обработке пространственно распределённых данных, маршрутизации облёта, автоматизированной интерпретации результатов и формированию прикладных рекомендаций. Это позволяет рассматривать аграрный сегмент как смежную область, в которой уже апробированы технологические решения, потенциально переносимые в задачи мониторинга природных пожаров, обследования зон ЧС и поддержки решений при работе на больших территориях.

Таким образом, результаты анализа (представлены в табл. 1) позволяют выделить несколько устойчивых направлений применения БАС: мониторинг пожаров и ЧС, автоматизированное обнаружение опасных факторов, поисково-спасательные работы, контроль объектов критической и нефтегазовой инфраструктуры, а также смежные мониторинговые применения в аграрном секторе [1–30]. При всём разнообразии решений их общая особенность состоит в том, что наибольшая проработанность характерна для этапов получения данных и первичной аналитической обработки, тогда как этапы интерпретации, выработки рекомендаций и включения результатов в СППР раскрыты слабо.

Патентный анализ подтверждает ту же тенденцию. Российские и зарубежные патенты охватывают задачи обнаружения и тушения пожаров, раннего выявления дыма, мониторинга лесных пожаров, поисково-спасательных операций и автономного применения беспилотных платформ [17–28]. Однако в большинстве случаев патентуемые решения ориентированы на реализацию отдельной функции: наблюдение, доставка полезной нагрузки, определение контролируемого параметра, выявление признака или локальное сопровождение объекта. В меньшей степени патенты ориентированы на представление результата в форме, непосредственно пригодной для руководителя ликвидации ЧС, дежурно-диспетчерской службы или иного органа управления.

Таблица 1

**Направления применения БАС и типовые результаты
(по публикациям и патентам)**

Класс задач	Типовые данные/ сенсоры	Типовые методы	Типовой результат	Примеры источников
Мониторинг пожаров/ ЧС (контур воздушного мониторинга)	RGB/ИК, телеметрия	полётное ИО, диспетчеризация	видеопоток/трек/ карта	[2, 4, 6, 7]
Обнаружение огня/дыма (CV/ИИ)	RGB/ДЗЗ/ИК	CNN/ YOLO/детекторы	метка «огонь/дым» + координаты	[5, 8–13, 16]
Тепловизионная поддержка ПСР	ИК-камера	интерпретация температурных полей	выявление горячих зон/путей	[2, 14]
Мониторинг трубопроводов/ инфраструктуры	фото/видео, геодезия	CV-дефекты, геодезический анализ	дефект/ деформация/ аномалия	[2, 6]
Нефтегаз/ аварийное прогнозирование	данные объекта и цифровые модели	цифровой двойник/ прогноз	сценарии аварий/ оценка последствий	[2]
Газовые утечки/ измерения	газоанализаторы/ лазерные анализаторы/метан	оценка утечки/ локализация/ маршрутное обследование	концентрация / источник утечки / зона аномалии	[2, 6, 20]
Применение БАС в аграрном секторе и мониторинге больших территорий	RGB/ мультиспектральные/ ИК/геопривязка	ортофотопланирование/ классификация/ индексный анализ/ картографирование	карта неоднородностей/ тематический слой/ зональная оценка/ прикладные рекомендации	[29, 30]

В совокупности это позволяет сделать вывод о наличии устойчивого прикладного разрыва между развитием беспилотного мониторинга и развитием СППР при ЧС [1–6, 17, 19]. Современные БАС уже обеспечивают высокий уровень оперативного наблюдения и автоматизированного обнаружения, однако значительно реже формируют события, предупреждения, прогнозные оценки, картографические слои риска и иные управленческие продукты, необходимые для обоснованного выбора действий. Следовательно, дальнейшее развитие данной области должно быть связано не только с совершенствованием летательных платформ и сенсорики, но и с интеграцией БАС в СППР, включающий веб-платформу, модули интеллектуальной обработки и средства формирования рекомендаций для органов управления.

В табл. 2 представлен анализ этапов работы СППР в рассматриваемых направлениях применения БАС [1–30].

Таблица 2

Этапы работы СППР в рассмотренных направлениях применения БАС (по [1–30])

Направление / источники	Сбор данных (сенсоры/полёт)	Детекция/ измерение	Интерпретация (оценка/риск/сценарий)	Информационный продукт для управления (событие / предупреждение / карточка действий)	Интеграция в контур управления (РЛЧ/ЦУКС), регламент/ трассируемость
Мониторинг пожаров/ЧС, ИО и управление полётами [3, 4, 6, 7]	●	●	●	нет	●
CV/ИИ: детекция огня/дыма по аэрофотосъёмке/ ДЗЗ [5, 8, 9–13, 16]	●	●	●	нет	нет
Тепловизионная поддержка ПСР [2, 14]	●	●	●	нет	нет
Трубопроводы/ инфраструктура: дефекты/ деформации [2, 6]	●	●	●	нет	нет
Нефтегаз: прогнозирование/цифровые модели + риск-аспекты [2]	●	нет	●	●	●
Газ/метан: утечки и измерительные миссии БАС [2, 6]	●	●	●	нет	нет
Интеграция/устойчивость/безопасность/интерфейсы (DT, комплаенс, кибер, AR, CI) [4, 6, 25]	●	нет	●	●	●
Аграрный сектор: мониторинг больших территорий и картографирование [29, 30]	●	●	●	●	нет
Патенты: обнаружение/тушение/дым/ПСР [17–28]	●	●	●	●	нет

Примечание: ● – явно описаны входы/выходы/метрики/процедуры; ● – упоминается, но без процедур/метрик; «нет» – не является фокусом источников; ИО – информационное обеспечение; CV – компьютерное зрение; ИИ – искусственный интеллект; аэро – аэрофотосъёмка/аэросъёмка; ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли; ПСР – поисково-спасательные работы; DT – digital twin, цифровой двойник; AR – augmented reality, дополненная реальность; CI – critical infrastructure, критическая инфраструктура; комплаенс – соответствие нормативным и организационным требованиям; кибер – кибербезопасность

Таблица 2 показывает, что большинство решений концентрируются на уровнях «сбор данных/ детекция», тогда как уровни «информационный продукт для управления» и «интеграция в контур управления РЛЧ/ ЦУКС» закрываются фрагментарно, что и обосновывает необходимость интегрированной ИБАС (БАС + веб-платформа + ИИ). Во многих случаях выходные данные не доводятся до формы, непосредственно пригодной для органов управления: предупреждений, прогнозных оценок, карт рисков и рекомендаций по действиям. Это указывает на сохраняющийся разрыв между этапами получения данных и их использованием в управленческом процессе [1–6].

Дополнительный интерес представляет аграрный сектор, где БАС эффективно применяются для мониторинга больших территорий, автоматизированной интерпретации данных и формирования прикладных выводов [29, 30]. Такой опыт имеет методическое значение для задач ЧС, поскольку подтверждает перспективность перехода от простого наблюдения к аналитической поддержке решений.

Следовательно, дальнейшее развитие БАС при ЧС должно быть связано не только с совершенствованием платформ и сенсорики, но и с их интеграцией в интеллектуальные системы, обеспечивающие обработку данных, оценку обстановки и формирование рекомендаций для органов управления. Именно такой подход представляется наиболее перспективным для развития проекта интеллектуального БАС.

Сопоставительный анализ патентных и публикационных источников позволил установить, что существующие решения на основе БАС преимущественно замыкаются на этапах сбора данных и выявления отдельных опасных признаков, тогда как этапы аналитической интерпретации и формирования информационных продуктов для органов управления реализуются фрагментарно. Тем самым обоснована необходимость перехода от изолированного применения БАС как средства наблюдения к построению интегрированного решения, обеспечивающего не только мониторинг, но и поддержку принятия решений в рамках СППР при ЧС.

Заключение

В результате проведённого исследования проанализированы отечественные и зарубежные публикации и патенты, посвящённые применению беспилотных авиационных систем при чрезвычайных ситуациях [1–30]. Выполнена классификация существующих решений по основным направлениям применения, включая мониторинг пожаров и ЧС, выявление признаков горения и задымления, поисково-спасательные работы, контроль объектов инфраструктуры, нефтегазовый сегмент и мониторинг больших территорий [1–30].

Установлено, что ключевыми технологическими компонентами рассматриваемых решений выступают бортовые оптико-электронные и тепловизионные средства наблюдения, газоаналитические средства, навигационно-телеметрические подсистемы, алгоритмы обработки изображений и цифровые средства представления результатов [2–16, 29, 30]. Показано, что наибольшая проработанность характерна для этапов сбора данных и выявления опасных признаков, тогда как этапы аналитической интерпретации, формирования информационных продуктов для управления и интеграции результатов в системы поддержки принятия решений остаются недостаточно развитыми [1–6, 17–19].

На этой основе сформулирован вывод о наличии прикладного разрыва между возможностями БАС как средства мониторинга и требованиями органов управления к информационной поддержке принятия решений при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций [1–6, 9–15, 17–19]. Практически значимым направлением дальнейшего развития является построение ИБАС, объединяющей БАС, веб-платформу, интеллектуальные модули обработки данных и средства формирования рекомендаций. Перспективы развития проекта интеллектуального БАС связаны с расширением расчётных модулей, внедрением моделей искусственного интеллекта, отработкой типовых сценариев применения и экспериментальной валидацией эффективности [1–6].

Список источников

1. Денисов А.Н. Методы, модели и алгоритмы поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2018. 406 с.
2. Давиденко А.С. Методика использования беспилотных авиационных систем при анализе крупных пожаров на объектах нефтегазового комплекса: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2024. 127 с.
3. Матвеев А.В., Матиев Р.Т. Принятие решений при пожарах в горной местности: сравнительный анализ методов мониторинга // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2023. № 2 (42). С. 76–90. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-76-90
4. Применение и развитие беспилотной авиации МЧС России // МЧС России. 2025.

5. Обоснование аналитического аппарата для автоматизации процедур обнаружения лесных пожаров / Д.В. Васильева [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2024. № 1. С. 44–54. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-44-54
6. Система информационного обеспечения и управления полётами воздушных судов при мониторинге чрезвычайных ситуаций и пожаров / А.Н. Коротоношко [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2020. № 1 (87). С. 51–66. DOI: 10.25257/TTS.2020.1.87.51-66
7. Бубнов А.Г., Сараев И.В., Семенов А.Д. Аспекты надёжности и выбора беспилотных летательных аппаратов для предупреждения и мониторинга пожаров в условиях пониженных температур // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1 (54). С. 12–21.
8. Калиев Д.И., Швеиц О.Я. Свёрточные нейронные сети для решения задач обнаружения пожаров по данным аэрофотосъёмки // Программные системы: теория и приложения. 2022. Т. 13. № 1 (52). С. 195–213. DOI: 10.25209/2079-3316-2022-13-1-195-213
9. Fire-Net: Rapid Recognition of Forest Fires in UAV Remote Sensing Imagery Using Embedded Devices / S. Li [et al.] // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. Art. 2846. DOI: 10.3390/rs16152846
10. Active Fire Detection in Landsat-8 Imagery: A Large-Scale Dataset and a Deep-Learning Study / G.H.A. Pereira [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2021. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.06.002
11. Moumgiakmas S.S., Samatas G.G., Papakostas G.A. Computer Vision for Fire Detection on UAVs – From Software to Hardware // Future Internet. 2021. Vol. 13. Art. 200. DOI: 10.3390/fi13080200
12. Mukhiddinov M., Abdusalomov A., Cho J. A Wildfire Smoke Detection System Using Unmanned Aerial Vehicle Images Based on the Optimized YOLOv5 // Sensors. 2022. Vol. 22. Art. 9384. DOI: 10.3390/s22239384
13. An Improved Wildfire Smoke Detection Based on YOLOv8 and UAV Images / S.N. Saydirasulovich [et al.] // Sensors. 2023. Vol. 23. Art. 8374. DOI: 10.3390/s23208374
14. Zawistowski M., Car M., Kłoczewiak T. The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Equipped with a Thermal Imaging Camera in the Activities of the Fire Service in Poland. Suggested Parameters and Settings // Safety & Fire Technology. 2024. Vol. 63. Iss. 1. P. 44–56. DOI: 10.12845/sft.63.1.2024.4
15. Leveraging Augmented Reality for Improved Situational Awareness During UAV-Driven Search and Rescue Missions / R. Nalamothu [et al.] // arXiv. 2024. arXiv:2402.01421.
16. Yuan C. Automatic Fire Detection Using Computer Vision Techniques for UAV-Based Forest Fire Surveillance: PhD thesis. Concordia University, 2017.
17. Способ технического контроля и диагностирования бортовых систем беспилотного летательного аппарата с поддержкой принятия решений и комплекс контрольно-проверочной аппаратуры с интеллектуальной системой поддержки принятия решений для его осуществления: пат. 2557771 Рос. Федерация, МПК G05B 23/00; № 2014107871/08; заявл. 28.02.2014; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 21.
18. Unmanned aerial vehicle search and rescue systems and methods: patent US12417710B2. Publ. 16.09.2025.
19. Emergency incident detection, response, and mitigation using autonomous drones: patent US20230045828A1. Publ. 16.02.2023.
20. Способ обнаружения и тушения пожаров и система для его осуществления: пат. 2826399 Рос. Федерация, МПК A62C 3/02; B64D 1/16; № 2022125068; заявл. 23.09.2022; опубл. 09.09.2024, Бюл. № 9.
21. Способ обеспечения пилотирования БПЛА в общем воздушном пространстве: пат. 2847508 Рос. Федерация, МПК G08G 5/00; G05D 1/24; G08G 5/21; G08G 5/26; № 2024110249; заявл. 16.04.2024; опубл. 06.10.2025, Бюл. № 28.

22. Система раннего обнаружения и определения типа лесного пожара: пат. 2617138 Рос. Федерация, МПК G08B 17/00; G08B 25/10; G01V 1/00; G08B 13/16: № 2016108916; заявл. 11.03.2016; опубл. 21.04.2017, Бюл. № 12.
23. Способ проведения поисково-спасательных работ: пат. 2694528 Рос. Федерация, МПК A62B 99/00 № 2018139491; заявл. 07.11.2018; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20.
24. Система на основе лидара с компьютерным управлением для идентификации дыма, в частности для выявления лесного пожара на ранней стадии: пат. 2293998 Рос. Федерация, МПК G01S 17/95; G01S 7/48; G08B 17/10: № 2003135610/09; заявл. 31.05.2002; опубл. 20.02.2007, Бюл. № 5.
25. A fire detection system using a drone: patent WO2017137393A1. Publ. 17.08.2017.
26. Wildfire surveillance UAV and fire surveillance system: patent US11250262B2. Publ. 15.02.2022.
27. Wildfire arrest and prevention system: patent CA2813831A1. Publ. 24.01.2014.
28. Tethered unmanned aerial vehicle fire fighting system: patent US20170043872A1. Publ. 16.02.2017.
29. Игайкина И.И., Даськин И.Н. Анализ эффективности беспилотных летательных аппаратов для мониторинга пожаров сельхозугодий // Сельский механизатор. 2023. № 1–2. С. 5–7.
30. Adoption of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery in Agricultural Management: A Systematic Literature Review / Md.A. Istiak [et al.] // Ecological Informatics. 2023. Vol. 78. Art. 102305. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102305

References

1. Denisov A.N. Metody, modeli i algoritmy podderzhki upravleniya pozharo-spasatel'nymi podrazdeleniyami pri tushenii pozharov: dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 2018. 406 s.
2. Davidenko A.S. Metodika ispol'zovaniya bespilotnyh aviacionnyh system pri analize krupnyh pozharov na ob'ekтах neftegazovogo kompleksa: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2024. 127 s.
3. Matveev A.V., Matiev R.T. Prinyatie reshenij pri pozharah v gornoj mestnosti: sravnitel'nyj analiz metodov monitoringa // Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie. 2023. № 2 (42). S. 76–90. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-76-90
4. Primenenie i razvitie bespilotnoj aviatsii MCHS Rossii // MCHS Rossii. 2025.
5. Obosnovanie analiticheskogo apparata dlya avtomatizatsii procedur obnaruzheniya lesnyh pozharov / D.V. Vasil'eva [i dr.] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii. 2024. № 1. S. 44–54. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-44-54
6. Sistema informacionnogo obespecheniya i upravleniya polyotami vozdushnyh sudov pri monitoringe chrezvychajnyh situacij i pozharov / A.N. Korotonoshko [i dr.] // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2020. № 1 (87). S. 51–66. DOI: 10.25257/TTS.2020.1.87.51-66
7. Bubnov A.G., Saraev I.V., Semenov A.D. Aspekty nadyozhnosti i vybora bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlya preduprezhdeniya i monitoringa pozharov v usloviyah ponizhennyh temperatur // Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity. 2025. № 1 (54). S. 12–21.
8. Kaliev D.I., Shvec O.Ya. Svyortochnye nejronnye seti dlya resheniya zadach obnaruzheniya pozharov po dannym aerofotos"yomki // Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya. 2022. T. 13. № 1 (52). S. 195–213. DOI: 10.25209/2079-3316-2022-13-1-195-213
9. Fire-Net: Rapid Recognition of Forest Fires in UAV Remote Sensing Imagery Using Embedded Devices / S. Li [et al.] // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. Art. 2846. DOI: 10.3390/rs16152846
10. Active Fire Detection in Landsat-8 Imagery: A Large-Scale Dataset and a Deep-Learning Study / G.H.A. Pereira [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2021. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.06.002

11. Moumgiakmas S.S., Samatas G.G., Papakostas G.A. Computer Vision for Fire Detection on UAVs – From Software to Hardware // *Future Internet*. 2021. Vol. 13. Art. 200. DOI: 10.3390/fi13080200
12. Mukhiddinov M., Abdusalomov A., Cho J. A Wildfire Smoke Detection System Using Unmanned Aerial Vehicle Images Based on the Optimized YOLOv5 // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Art. 9384. DOI: 10.3390/s22239384
13. An Improved Wildfire Smoke Detection Based on YOLOv8 and UAV Images / S.N. Saydirasulovich [et al.] // *Sensors*. 2023. Vol. 23. Art. 8374. DOI: 10.3390/s23208374
14. Zawistowski M., Car M., Kłoczewiak T. The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Equipped with a Thermal Imaging Camera in the Activities of the Fire Service in Poland. Suggested Parameters and Settings // *Safety & Fire Technology*. 2024. Vol. 63. Iss. 1. P. 44–56. DOI: 10.12845/sft.63.1.2024.4
15. Leveraging Augmented Reality for Improved Situational Awareness During UAV-Driven Search and Rescue Missions / R. Nalamothu [et al.] // *arXiv*. 2024. arXiv:2402.01421.
16. Yuan C. Automatic Fire Detection Using Computer Vision Techniques for UAV-Based Forest Fire Surveillance: PhD thesis. Concordia University, 2017.
17. Способ технического контроля и диагностирования бортовых систем беспилотного летательного аппарата с поддержкой принятия решений и комплекс контрольно-проверочной аппаратуры с интеллектуальной системой поддержки принятия решений для его осущестствления: пат. 2557771 Рос. Федерация, МПК G05B 23/00; № 2014107871/08; заявл. 28.02.2014; опubl. 27.07.2015, *Byul.* № 21.
18. Unmanned aerial vehicle search and rescue systems and methods: patent US12417710B2. Publ. 16.09.2025.
19. Emergency incident detection, response, and mitigation using autonomous drones: patent US20230045828A1. Publ. 16.02.2023.
20. Способ обнаружения и тушения пожаров и система для его осущестствления: пат. 2826399 Рос. Федерация, МПК A62C 3/02; B64D 1/16; № 2022125068; заявл. 23.09.2022; опubl. 09.09.2024, *Byul.* № 9.
21. Способ обеспечения пилотирования BPLA в общем воздушном пространстве: пат. 2847508 Рос. Федерация, МПК G08G 5/00; G05D 1/24; G08G 5/21; G08G 5/26; № 2024110249; заявл. 16.04.2024; опubl. 06.10.2025, *Byul.* № 28.
22. Система раннего обнаружения и определения типа лесного пожара: пат. 2617138 Рос. Федерация, МПК G08B 17/00; G08B 25/10; G01V 1/00; G08B 13/16; № 2016108916; заявл. 11.03.2016; опubl. 21.04.2017, *Byul.* № 12.
23. Способ проведения поисково-спасательных работ: пат. 2694528 Рос. Федерация, МПК A62B 99/00 № 2018139491; заявл. 07.11.2018; опubl. 16.07.2019, *Byul.* № 20.
24. Система на основе лидара с компьютерным управлением для идентификации дыма, в частности для выявления лесного пожара на ранней стадии: пат. 2293998 Рос. Федерация, МПК G01S 17/95; G01S 7/48; G08B 17/10; № 2003135610/09; заявл. 31.05.2002; опubl. 20.02.2007, *Byul.* № 5.
25. A fire detection system using a drone: patent WO2017137393A1. Publ. 17.08.2017.
26. Wildfire surveillance UAV and fire surveillance system: patent US11250262B2. Publ. 15.02.2022.
27. Wildfire arrest and prevention system: patent CA2813831A1. Publ. 24.01.2014.
28. Tethered unmanned aerial vehicle fire fighting system: patent US20170043872A1. Publ. 16.02.2017.
29. Igajkina I.I., Das'kin I.N. Analiz effektivnosti bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya monitoringa požarov sel'hozogodij // *Sel'skij mekhanizator*. 2023. № 1–2. S. 5–7.
30. Adoption of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery in Agricultural Management: A Systematic Literature Review / Md.A. Istiak [et al.] // *Ecological Informatics*. 2023. Vol. 78. Art. 102305. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102305

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 03.04.2026; одобрена после рецензирования: 24.04.2026;
принята к публикации: 20.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 03.04.2026; approved after review: 24.04.2026;
accepted for publication: 20.05.2026

Информация об авторах:

Смирнов Алексей Сергеевич, первый заместитель начальника Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: sas@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1661-9089>, SPIN-код: 1677-1402

Юрченко Роман Александрович, старший преподаватель кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: ray1981@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0355-3295>, SPIN-код: 6210-8733

Information about the authors:

Smirnov Alexey S., first deputy head of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: sas@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1661-9089>, SPIN: 1677-1402

Yurchenko Roman A., senior lecturer of department of firefighting and emergency rescue operations of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: ray1981@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0355-3295>, SPIN: 6210-8733

Научная статья

УДК 004.942; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-56-67

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ СНЕЖНЫХ ЛАВИН И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СТРОЕНИЯМИ

Калач Андрей Владимирович;

✉ **Соловьев Александр Семенович.**

Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия.

Лентяева Татьяна Владимировна.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

✉ **asoloviev58@yandex.ru**

Аннотация. Рассмотрены возможности отечественного и зарубежного специализированного программного обеспечения для моделирования движения снежных лавин и прогнозирования ущерба. Показано, что, несмотря на использование различных математических подходов, популярностью у исследователей пользуются двумерные модели движения, что, очевидно, связано с ограничением вычислительных мощностей. Особо отмечено, что использование трехмерного пространства моделирования лавин должно приводить к более реалистичным результатам, однако для сохранения приемлемого времени расчетов исследователям приходится прибегать к различным приближениям и допущениям, что снижает точность расчетов.

По результатам анализа возможностей специализированного программного обеспечения предложен авторский проблемно-ориентированный комплекс программ для синтеза 3D математической модели динамики снежной лавины, основанный на использовании модифицированного численного метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH), выбор которого обусловлен возможностью анализировать влияние микро- и макрорельефа склона на динамику движения, распределение плотности снега по толщине и ширине потока, формирование сопутствующей ударной волны и, соответственно, рассчитать силовое воздействие в различных точках взаимодействия.

Комплекс программ предусматривает возможность варьирования параметров взаимодействия внутри тела лавины, между снежной массой и склоном для моделирования изменения метеорологических условий, а, следовательно, физические свойства снега, что позволяет точнее прогнозировать разрушительное воздействие лавин на элементы инфраструктуры. Адекватность работы оригинального комплекса имитационного моделирования снежных лавин подтверждается сопоставлением результатов компьютерного моделирования с реальными статистическими данными сходов лавин.

Ключевые слова: снежные лавины, модели, программы для ЭВМ, разрушительное воздействие

Для цитирования: Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В. Современные программные продукты для моделирования динамики снежных лавин и их взаимодействия со строениями // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 56–67. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-56-67

Scientific article

MODERN SOFTWARE PRODUCTS FOR MODELING THE DYNAMICS OF AVALANCHES AND THEIR INTERACTION WITH BUILDINGS

Kalach Andrey V.;**✉Soloviev Alexander S.****Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia, Voronezh, Russia.****Lentyaeva Tatyana V.****MIREA – Russian university of technology, Moscow, Russia****✉asoloviev58@yandex.ru**

Abstract. The capabilities of domestic and foreign specialized software for modeling snow avalanche motion and predicting damage examined. It shown that, despite the use of various mathematical approaches, two-dimensional motion models are popular among researchers, which is obviously due to limited computing power. It articularly noted that the use of a three-dimensional avalanche modeling space should lead to results that are more realistic; however, to maintain acceptable computation time, researchers must resort to various approximations and assumptions, which reduces the accuracy of calculations.

Based on the analysis of specialized software capabilities, a proprietary problem-oriented software suite for synthesizing a 3D mathematical model of snow avalanche dynamics proposed. This suite based on a modified numerical method of smoothed particle hydrodynamics (SPH). This method is chosen due to its ability to analyze the influence of slope micro- and macrotopography on the dynamics of motion, the distribution of snow density across the thickness and width of the flow, the formation of an accompanying shock wave, and, accordingly, to calculate the force impact at various points of interaction. The software suite allows for varying the interaction parameters within the avalanche body, between the snow mass and the slope, to simulate changes in meteorological conditions and, consequently, the physical properties of the snow, enabling more accurate predictions of the destructive impact of avalanches on infrastructure elements.

The adequacy of the original avalanche simulation suite confirmed by comparing the results of the computer simulation with actual avalanche statistics.

Keywords: avalanches, models, computer programs, destructive effects

For citation: Kalach A.V., Soloviev A.S., Lentyaeva T.V. Modern software products for modeling the dynamics of avalanches and their interaction with buildings // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 56–67. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-56-67

Введение

Снежные лавины являются одним из наиболее опасных природных процессов в горных районах, ежегодно приводящим к человеческим жертвам, разрушению инфраструктуры, повреждению транспортных коммуникаций и значительным экономическим потерям. Масштабы угрозы лавинной активности особенно велики в России, где к наиболее лавиноопасным регионам относятся Кавказ, Урал и Хибинны [1–3]. Высокая повторяемость сходов, сложные природные условия и активное развитие туристической и промышленной инфраструктуры на этих территориях требуют постоянного мониторинга и надёжных методов оценки риска. Существенную роль в оценке лавинной опасности играют численные модели и специализированные программные комплексы, позволяющие воспроизводить динамику снежных масс и прогнозировать их взаимодействие с рельефом и инженерными сооружениями.

В последние десятилетия развитие вычислительных технологий и методов численного моделирования привело к созданию целого ряда специализированных программных решений

для обеспечения эффективного прогнозирования, анализа лавинных процессов и повышения эффективности мер по снижению риска лавинной опасности. Эти системы отличаются математическим аппаратом и функциональными возможностями, а также особенностями адаптации под конкретные природные условия регионов, где они применяются.

Разнообразие реализованных математических моделей и прикладных функций привело к разработке целого спектра программных продуктов поддержки моделирования лавинных процессов как в зарубежной, так и в отечественной практике.

При этом при оценке возможностей таких программных комплексов важно учитывать, какие именно характеристики позволяют считать их полноценным инструментом для описания лавинных процессов, а какие остаются ограничениями. В данном аспекте особое значение при анализе программных комплексов имеет поддержка моделирования в трёхмерном пространстве, которая позволяет учитывать распространение лавины не только вдоль склона, но и в поперечном направлении, а также изменения по высоте потока. Такой подход даёт возможность более реалистично воспроизводить фронтальную и вертикальную структуру лавины, что особенно важно при оценке распределённых нагрузок на сооружения. Именно трёхмерные модели должны составлять основу современных программ поддержки лавинных расчётов, поскольку они отражают сложный пространственный характер движения снежных масс значительно лучше, чем классические одномерные и двумерные схемы.

Немаловажное значение имеют и параметры, определяющие реалистичность воспроизведения динамики снежной массы и корректность прогноза воздействия на объекты инфраструктуры, поскольку именно они напрямую связаны с практическими задачами обеспечения безопасности. Для горных районов ключевой является не только оценка вероятности схода лавины, но и прогноз её конкретных характеристик: скорости, давления, дальности выброса, структуры потока. От этих показателей зависит степень угрозы для зданий, транспортных коммуникаций и защитных сооружений. Если программный комплекс не поддерживает учёт пространственной неоднородности потока или распределение нагрузок на препятствия, то результаты оказываются лишь усреднёнными и недостаточными для инженерного проектирования и планирования защитных мероприятий.

Таким образом, функционал, связанный с поддержкой моделирования в трёхмерном пространстве, учётом локальных свойств снежной массы и расчётом распределённых нагрузок, рассматривается как наиболее значимый при анализе программных комплексов для моделирования лавинных процессов, а его отсутствие указывает на ограничения и снижает прикладную ценность программных решений.

Цель исследования – провести сравнительный анализ возможностей современных специализированных программных продуктов для моделирования динамики снежных лавин и их взаимодействия со строениями и по результатам проведенной комплексной оценки разработать программный комплекс для трёхмерного (3D) численного моделирования динамики снежных лавин на основе модифицированного метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH), обеспечивающий реалистичное воспроизведение фронтальной и вертикальной структуры лавины и точную оценку распределённых нагрузок на сооружения.

Научная новизна исследования заключается в следующем.

Предложен оригинальный подход к моделированию динамики снежных лавин, основанный на объемном (3D) учёте их распространения (вертикальная и поперечная составляющие распространения лавины).

Обеспечен качественный переход от упрощенных моделей к объемным при моделировании динамики снежных лавин, что существенно повышает точность расчета нагрузок и оптимизации защитных противолавинных конструкций для обоснования выбора мероприятий по повышению живучести объектов инфраструктуры.

Разработан оригинальный программный комплекс для трёхмерного (3D) численного моделирования динамики снежных лавин на базе метода гидродинамики сглаженных частиц.

Модели и методы исследования

При моделировании движения снежной лавины особое внимание уделяется учёту сложного горного рельефа и интеграции моделей с геоинформационными системами для оперативного прогнозирования и защиты транспортных коридоров.

Среди наиболее востребованных зарубежных разработок можно выделить систему AVAL-1D (One-dimensional numerical dense and powder snow avalanche dynamic model), разработанную в Швейцарском институте снеголавинных исследований (SLF, Давос) и представленную в 2000 г. Система была создана как дополнение к классической модели Вельми–Зальма [4] и ориентирована на практическое применение при прогнозировании лавинной опасности [5].

Программа включает два основных вычислительных модуля: FL-1D для мокрых лавин и SL-1D для сухих пылевых лавин. Первый представляет собой квазиодномерную гидравлическую модель, усредненную по глубине. Второй описывает движение двухслойной лавины – плотного нижнего и пылевого верхнего слоя.

Программа позволяет с приемлемой точностью моделировать движение лавины в одномерном пространстве, определять дальность выброса, скорость, силу удара и высоту лавинного потока. Результаты верификации показывают, что модель в целом воспроизводит наблюдаемые параметры движения лавины, однако точность расчётов может меняться в зависимости от типа лавины и характера рельефа [5, 6]. Недостатком AVAL-1D является невозможность моделирования воздействия на сооружения и учет сложного рельефа, что ограничивает ее инженерную применимость.

Дальнейшее развитие швейцарской школы моделирования привело к созданию программы ELBA (Energy Line Based Avalanche) [7]. В отличие от AVAL-1D, она имеет двумерную структуру и позволяет исследовать перераспределение снежной массы по площади.

Применение ELBA ориентировано на определение зон поражения и распределение лавинных отложений. Для удобства визуализации программа интегрирована в среду ArcGIS, что делает её удобной для картографических и инженерных приложений. По результатам испытаний в ряде работ отмечается удовлетворительная точность прогнозирования зон поражения, хотя конкретные значения ошибок зависят от условий рельефа и используемых данных [8, 9]. ELBA, как и AVAL-1D, не рассчитывает смещение и деформацию сооружений, ограничивая свою сферу применения задачами прогнозирования лавинной активности.

Австрийская разработка SAMOS (Snow Avalanche MOdelling and Simulation) появилась в 1999 г. и изначально предназначалась для моделирования сухих лавин [10]. Программа могла работать как в двумерном, так и в трёхмерном режимах. Позднее в 2007 г. появилась усовершенствованная версия SAMOS-AT, которая стала стандартом для инженерных расчетов в Австрии. Главным преимуществом SAMOS-AT стало внедрение двухфазной модели, учитывающей баланс массы и импульса для плотного и пылевого слоя лавины. Дополнительно был интегрирован метод сглаженных частиц (SPH), что позволило учитывать турбулентное взаимодействие снежных масс и повысило точность расчетов. Верификация показала, что программа способна достаточно точно воспроизводить основные динамические характеристики лавины, включая скорость потока, траекторию движения и величину давления [11]. Вместе с тем, как и многие другие модели, SAMOS-AT не рассматривает локальные деформации сооружений, что ограничивает её применение в задачах детального инженерного анализа.

Следует отметить, что по состоянию на сегодня одной из самых востребованных систем является RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation), созданная в Швейцарии¹. В отличие от более ранних моделей, RAMMS учитывает рельеф в трех измерениях и позволяет моделировать широкий спектр процессов: лавины, оползни, селевые потоки. В основе RAMMS лежит двумерная модель, усредненная по глубине, но работающая на цифровых моделях рельефа (ЦМР). Важным преимуществом является возможность калибровки коэффициентов трения по данным наблюдений, что позволяет адаптировать модель под конкретные регионы.

¹ URL: <http://ramms.slf.ch/ramms/> (дата обращения: 12.02.2026)

Система активно применяется не только в Швейцарии, но и в России (Хибины, Приэльбрусье). Проверка расчётов по данным наблюдений показала, что программа обеспечивает высокую точность прогноза скорости потока и дальности выброса, что делает RAMMS одной из наиболее надёжных современных систем [12]. Тем не менее, модель не учитывает угловое смещение зданий, неравномерную нагрузку на конструкции и локальные деформации фасадов. Для наглядности основные характеристики зарубежных программных комплексов сведены в таблицу, где представлены ключевые параметры моделей, а также их особенности и ограничения реализации (таблица).

Таблица

**Ключевые характеристики и ограничения программных продуктов
поддержки лавинных процессов**

Наименование программного продукта	Ключевые характеристики и ограничения
AVAL-1D	Характеристики: одномерная модель лавин (мокрых и сухих); включает модули FL-1D и SL-1D; рассчитывает скорость, высоту, давление и дальность выброса. Ограничения: не учитывает сложный рельеф и боковое распространение лавины; давление определяется усреднённо по высоте; нет оценки воздействия на сооружения из-за одномерной упрощённой методологии.
ELBA	Характеристики: двумерная модель лавин; позволяет анализировать перераспределение снежной массы по площади; интегрирована в среду ArcGIS для картографических приложений. Ограничения: ограничена двумерным описанием лавинного процесса; не моделирует смещение и деформацию сооружений; не рассчитывает локальное распределение давления; точность прогноза зависит от качества входных данных
SAMOS-AT	Характеристики: может функционировать как в двумерном (снежная лавина как однородная масса сухого снега), так и в трёхмерном режиме (снежная масса неоднородна); используется метод сглаженных частиц (SPH) для учёта турбулентности и коэффициенты жесткости. Ограничения: несмотря на наличие трёхмерного режима, его применение ограничено и требует значительных вычислительных ресурсов; не моделирует локальные деформации и неравномерное давление на сооружения; коэффициенты жёсткости принимаются постоянными
RAMMS	Характеристики: двумерная модель; использует цифровые модели рельефа; применяется для лавин, оползней, селей; поддерживает калибровку коэффициентов по наблюдениям; активно используется в Европе и России. Ограничения: двумерная модель на трёхмерном рельефе (в лавине не моделируется внутреннее распределение плотности, скорости и давления по вертикали); не учитывает угловое смещение и локальные деформации зданий; ограничена в анализе распределённой нагрузки на конструкции

Сравнительный анализ показывает, что каждая из рассмотренных программных систем имеет свои сильные стороны и ограничения, связанные с выбранным математическим аппаратом и областью применения. Также следует отметить, что большинство зарубежных программных комплексов основаны на одномерных или двумерных схемах, в которых вертикальная структура снежного потока описывается усреднённо.

Необходимо отметить, что такой подход позволяет решать задачи прогнозирования дальности выброса и зон поражения, однако имеет ограничения при инженерных расчётах, где требуется учёт локальных нагрузок и детальная пространственная динамика. В связи с этим особый интерес представляют программные решения поддержки моделирования в трёхмерном пространстве, которые позволяют учитывать внутреннюю структуру лавины и её взаимодействие с объектами инфраструктуры более реалистично.

Проблемно-ориентированный комплекс программ трёхмерной модели движения, взаимодействия снежной массы со строениями и анализа результатных данных компьютерной симуляции схода снежной лавины позволяет прогнозировать объём, траекторию движения, разрушительное воздействие снежной лавины на строения в зоне транзита лавины, а также анализировать полученные данные [13–15].

Математическая основа программного комплекса опирается на модифицированный метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH). В отличие от стандартной реализации метода сглаженных частиц (SPH), используемой, например, в комплексе SAMOS-AT, в предлагаемом подходе реализован ряд модификаций, направленных на повышение устойчивости вычислений и адаптацию модели к физическим свойствам снежной массы.

В вычислительных экспериментах классическая функция сглаживания $W(q, h)$ нами была заменена на гиперболическую, которая обладает положительными производными второго порядка, что обеспечивало плавное изменение градиента ядра. В результате такой модификации, при сближении частиц возникает корректная сила отталкивания, предотвращающая их нефизическое «слипание», а при увеличении расстояния отсутствуют резкие скачки сил. Таким образом, модификация ядра сглаживания повысила устойчивость расчёта и обеспечила реалистичное воспроизведение структуры снежного потока. Кроме того, в модели реализован адаптивный механизм задания параметров взаимодействия частиц на основе локальной плотности снежной массы. Плотность каждой частицы вычисляется по классической формуле SPH как взвешенная сумма масс соседних частиц с использованием функции сглаживания. При этом плотность не интерполируется напрямую, а определяется как результат суммирования вкладов соседних частиц, что отражает локальные процессы уплотнения и разрежения снежной массы.

Полученное значение плотности используется как промежуточный параметр для классификации состояния снега (рыхлый, влажный, плотный). В зависимости от диапазона плотности автоматически выбираются безразмерные коэффициенты упруго-вязкого взаимодействия частиц. Такой подход позволяет учитывать изменение механических свойств снежной массы в процессе движения лавины без введения сложных реологических зависимостей и обеспечивает адаптацию модели к различным типам снега.

В отличие от ряда существующих решений, таких как SAMOS-AT и RAMMS [12, 16, 17], где коэффициенты взаимодействия и трения, как правило, задаются постоянными или подбираются на этапе калибровки и не изменяются в ходе расчёта, в предложенной модели реализовано их динамическое изменение. Это позволяет более корректно описывать переходы между различными режимами поведения снежной массы, включая разрыхление, уплотнение и формирование ударных фронтов.

Таким образом, предложенная модификация метода SPH отличается использованием гиперболической функции сглаживания с устойчивыми производными, адаптивным определением параметров взаимодействия частиц на основе локальной плотности и динамическим изменением коэффициентов модели в процессе расчёта.

На основе описанной модификации метода SPH формируется дискретное представление снежной массы в виде системы взаимодействующих снежных частиц.

В рамках предложенного оригинального подхода снежная масса представляется совокупностью одинаковых шарообразных частиц фиксированного диаметра d_c . Каждая частица характеризуется набором переменных, позволяющих однозначно задать её положение и движение в пространстве. Для этого используется: три координаты центра частицы (x_i, y_i, z_i) и три проекции вектора скорости частицы (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}).

Координаты центра определяют текущее положение частицы в трёхмерной области моделирования. Их отслеживание необходимо для того, чтобы воспроизводить траекторию движения лавины, фиксировать взаимодействие с поверхностью склона и строениями, а также вычислять распределение снежной массы в пространстве.

Проекции скорости показывают, с какой интенсивностью частица перемещается по каждой из координатных осей. Это позволяет рассчитать направление и величину движения, определить ускорение, ударные нагрузки. Отслеживание скоростей по трём осям необходимо для того, чтобы воспроизводить динамическое развитие лавины: ускорение на крутых участках склона, замедление при встрече с препятствиями, расслоение потока и образование ударных фронтов.

Взаимодействие элементов снега друг с другом и с поверхностью склона описывается вязкоупругой моделью. Такой подход позволяет учесть основные механические свойства снежной массы: плотность, коэффициенты трения со склоном и между элементами, а также жёсткость контактов между частицами и поверхностью горного склона [14].

Необходимо отметить, что гиперболическая функция имеет положительные производные второго порядка, что означает, что при сближении частиц возникает сила отталкивания, предотвращающая нереалистичное «слипание» частиц, а при увеличении расстояния не создаётся резких скачков сил.

Результаты исследования и их обсуждение

Приведенные особенности модели были положены в основу программного комплекса, позволяющего анализировать поведение снежной массы на горном склоне и прогнозировать объем лавины, траекторию движения и характер разрушительного воздействия на инфраструктурные объекты. В ходе компьютерного эксперимента имитируется образование лавины из заданного объема снежной массы. Пользователь задаёт начальные параметры: количество частиц, диаметр частицы, массу частицы, параметры сооружения (рис. 1).

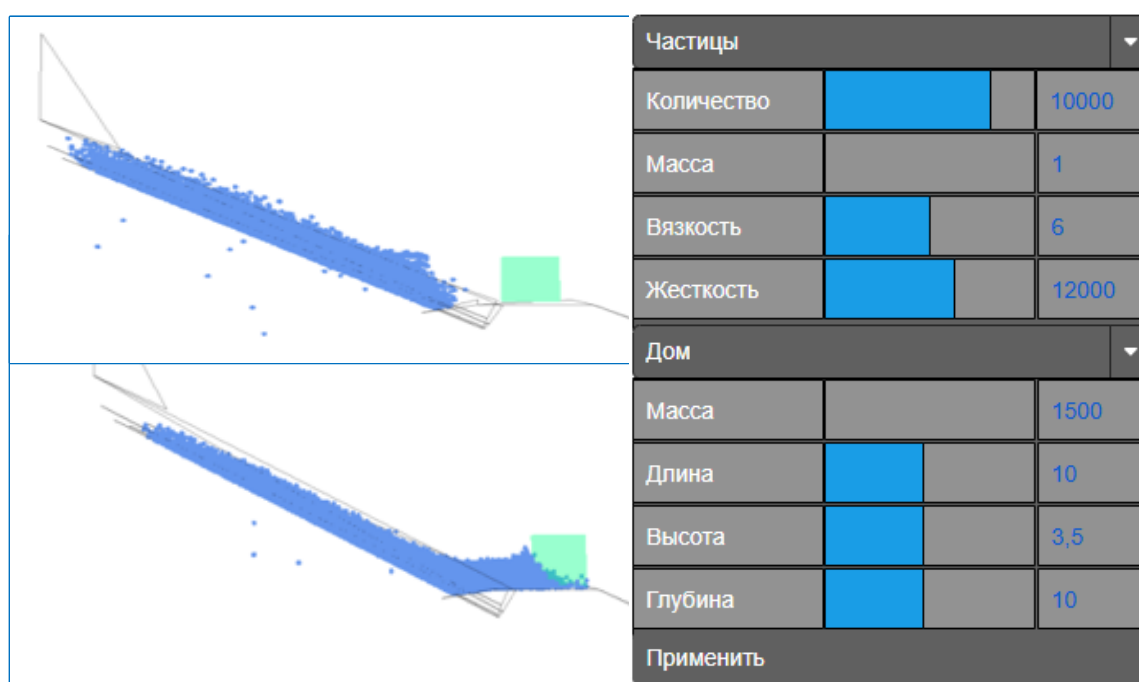


Рис. 1. Визуализация динамики снежной лавины и ее столкновения со строениями

На начальном этапе частицы случайным образом распределяются в заданной геометрической форме, расположенной в верхней части области моделирования. В процессе интегрирования уравнений движения снежная масса оседает на поверхность, формирует неподвижный слой, а затем начинает двигаться вниз по склону с ускорением. По мере движения меняется положение снежной массы во времени t , и на определённом этапе происходит столкновение со строением.

В ходе численного эксперимента характер взаимодействия лавины с объектом зависит от величины действующих сил. Если результирующее давление превышает силу статического трения между основанием здания и поверхностью склона, сооружение срывается с места и начинает перемещаться поступательно, что выражается в изменении его координат. В тех случаях, когда статическое трение удерживает объект, но переданный лавиной момент импульса оказывается достаточным, возможны вращение или опрокидывание строения [14].

Функционально программа позволяет структурировать полученные в ходе расчета динамических характеристик снежной массы параметры, например, скорость элементов, координаты в трехмерном пространстве, и отображать их в необходимом для пользователя виде [15].

Кроме того, программная реализация позволяет получать количественные данные о распределении нагрузок. В частности, расчёт давления на строения даёт возможность выявить не только суммарное воздействие потока, но и его распределение по высоте и ширине конструкции (рис. 2).

Такой подход обеспечивает более точную оценку характера разрушений и служит основой для проектирования защитных мер.

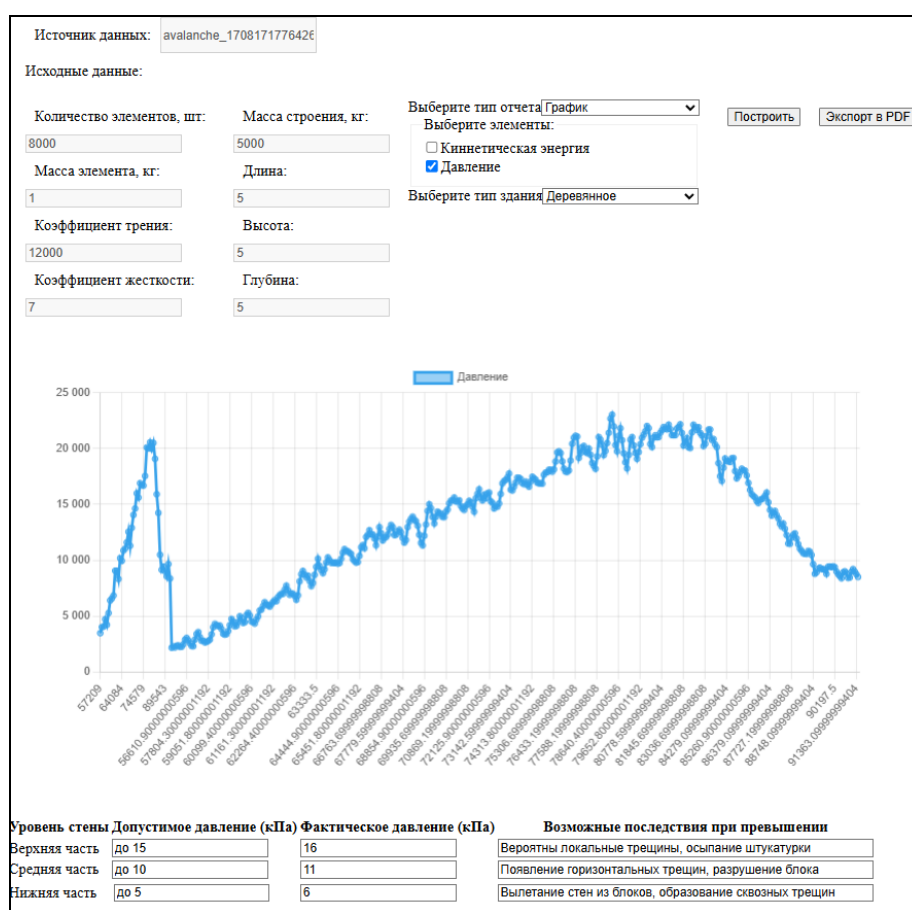


Рис. 2. Визуализация анализа результатных данных схода снежной лавины и ее столкновения со строениями

Для подтверждения адекватности разработанной модели выполнена её количественная верификация на основе сопоставления результатов численного моделирования с реальными статистическими данными сходов лавин в районе г. Норильска. В рамках компьютерного эксперимента воспроизводили взаимодействие снежной массы с группой зданий, для которых по фото- и видеоматериалам была восстановлена карта смещений и поворотов сооружений.

Модель позволила получить временные зависимости давления и кинетической энергии снежной массы, а также определить итоговое положение зданий после воздействия лавины.

Сравнительный анализ показал, что рассчитанные значения смещений хорошо согласуются с натурными данными: средняя относительная погрешность определения перемещений зданий составила порядка 6–8 % (по метрике MAPE), при этом абсолютная ошибка не превышала 1,0–1,5 м. Полученные результаты свидетельствуют о корректности воспроизведения динамики взаимодействия лавины со строениями [19].

Дополнительно установлено, что точность определения смещений в разработанной модели в 2–3 раза выше по сравнению с типовыми двумерными решениями, реализованными в таких программных комплексах, как SAMOS-AT и RAMMS, для которых характерна погрешность порядка 10–25 % при оценке аналогичных параметров [19].

Повышение точности обусловлено использованием трёхмерного представления снежной массы и учётом локальных взаимодействий частиц, что позволяет корректно воспроизводить такие эффекты, как неравномерное распределение давления, экранирование зданий и их угловое смещение, не учитываемые в упрощённых моделях.

Заключение

Таким образом, выполнен обзор возможностей современных отечественных и зарубежных программных пакетов для моделирования лавинных потоков. Особо отмечено, что точность определения смещений в разработанной модели в 2–3 раза выше по сравнению с типовыми двумерными решениями, реализованными в SAMOS-AT и RAMMS при оценке аналогичных параметров.

Предложено модифицировать метод сглаженных частиц путем замены классической функции сглаживания $W(q,h)$ на гиперболическую, обладающую положительными производными второго порядка. Установлено, что в результате такой модификации. Таким образом, модификация ядра сглаживания повысила устойчивость расчёта (при сближении частиц возникает корректная сила отталкивания, предотвращающая их нефизическое «слипание», а при увеличении расстояния отсутствуют резкие скачки сил) и обеспечила реалистичное воспроизведение структуры снежного потока.

Показаны возможности совместного применения трёхмерных моделей и метода сглаженных частиц (SPH) для повышения точности воспроизведения динамики снежных лавин и распределения их нагрузок на объекты инфраструктуры. Предложен оригинальный подход к моделированию динамики снежных лавин, в отличие от существующих обеспечивающий качественный переход к объемному (3D) моделированию и учитывающий поперечное и вертикальное распространение лавины, что позволяет повысить точность расчета силовых нагрузок, оптимизировать защитные противолавинные конструкции и обосновать выбор мероприятий по повышению живучести объектов инфраструктуры.

Список источников

1. Кадастр лавинной опасности территории ВТРК «Мамисон» (Северная Осетия – Алания) / А.Х. Аджиев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. 2024. № 3 (223). С. 39–47. DOI: 10.18522/1026-2237-2024-3-39-47
2. Викулина М.А. Лавинная опасность и риск в Хибинах в условиях развития рекреации в начале XXI века // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. № 3. С. 276–287. DOI 10.34753/HS.2022.4.3.276
3. Гулевич В.П., Манзий Д.Д. Учет снежности при оценке лавинной активности в малоизученных горных районах (на примере Прибайкалья) // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 1 (21). С. 50–63. DOI 10.21285/2500-1582-2021-1-50-63

4. Bartelt P., Salm B., Gruber U. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining // *Journal of Glaciology*. 1999. № 45 (150). P. 242–254.
5. Christen M., Bartelt P., Gruber U. AVAL-1D: an avalanche dynamics program for the practice // *Proceedings of the International Congress «Interpraevent 2002 in the Pacific Rim»*. 2002. Vol. 2. P. 715–725.
6. Bocchiola D., Rosso R. Application of a regional approach for hazard mapping at an avalanche site in northern Italy // *Advances in Geosciences*. 2008. Vol. 14. P. 201–209. DOI: 10.5194/adgeo-14-201-2008
7. Volk G., Kleemayr K. Lawinensimulationsmodell ELBA // *Wildbach- und Lawinenverbau*. 1999. Vol. 138. P. 23–32.
8. Aydın A. Comparing the performance of base map scales in GIS-based avalanche simulation: a case study from Palandöken, Turkey // *Environmental Earth Sciences*. 2010. № 61. P. 1467–1472.
9. Using tree-ring signals and numerical model to identify the snow avalanche tracks in Kastamonu, Turkey / N. Köse [et al.] // *Natural Hazards*. 2010. № 54. P. 435–449.
10. Sailer R., Rammer L., Sampl P. Recalculation of an artificially released avalanche with SAMOS and validation with measurements from a pulsed Doppler radar // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2002. № 2. P. 211–216.
11. Sampl P., Zwinger T. Avalanche simulation with SAMOS // *Annals of Glaciology*. 2004. Vol. 38. P. 393–398.
12. Турчанинова А.С. Определение зон зарождения и оценка динамических характеристик снежных лавин: дис. ... канд. географ. наук. М.: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2013. 175 с.
13. Лентяева Т.В. Программная реализация трехмерной модели динамики снежной массы // *Вестник Воронежского института ФСИИ России*. 2023. № 3. С. 104–111.
14. Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В. Моделирование движения снежной лавины // *Технологии техносферной безопасности*. 2025. № 1 (107). С. 116–133. DOI: 10.25257/TTS.2025.1.107.116-133
15. Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В. Модель и алгоритм взаимодействия снежной лавины со строениями // *Технологии техносферной безопасности*. 2024. № 1 (103). С. 152–163. DOI: 10.25257/TTS.2024.1.103.152-163
16. Sampl P., Zwinger T. Avalanche simulation with SAMOS // *Annals of Glaciology*. 2004. Vol. 38. P. 393–398. DOI: 10.3189/172756404781814780
17. Christen M., Bartelt P., Gruber U. Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. Vol. 63. № 1–2. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.004
18. Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В. Компьютерное моделирование воздействий снежной лавины на объекты инфраструктуры в условиях чрезвычайной ситуации // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2025. № 1 (73). С. 30–40. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-30-40

References

1. Kadastr lavinnoj opasnosti territorii VTRK «Mamison» (Severnaya Osetiya – Alaniya) / A.H. Adzhiev [i dr.] // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Ser.: Estestvennye nauki*. 2024. № 3 (223). S. 39–47. DOI: 10.18522/1026-2237-2024-3-39-47
2. Vikulina M.A. Lavinnaya opasnost' i risk v Hibirinah v usloviyah razvitiya rekreacii v nachale XXI veka // *Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya*. 2022. T. 4. № 3. S. 276–287. DOI: 10.34753/HS.2022.4.3.276

3. Gulevich V.P., Manzij D.D. Uchet snezhnosti pri ocenke lavinnoj aktivnosti v maloizuchennyh gornyh rajonah (na primere Pribajkal'ya) // HKHI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. T. 6. № 1 (21). S. 50–63. DOI 10.21285/2500-1582-2021-1-50-63
4. Bartelt P., Salm B., Gruber U. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining // Journal of Glaciology. 1999. № 45 (150). P. 242–254.
5. Christen M., Bartelt P., Gruber U. AVAL-1D: an avalanche dynamics program for the practice // Proceedings of the International Congress «Interpraevent 2002 in the Pacific Rim». 2002. Vol. 2. P. 715–725.
6. Bocchiola D., Rosso R. Application of a regional approach for hazard mapping at an avalanche site in northern Italy // Advances in Geosciences. 2008. Vol. 14. P. 201–209. DOI: 10.5194/adgeo-14-201-2008
7. Volk G., Kleemayr K. Lawinensimulationsmodell ELBA // Wildbach- und Lawinenverbau. 1999. Vol. 138. P. 23–32.
8. Aydin A. Comparing the performance of base map scales in GIS-based avalanche simulation: a case study from Palandöken, Turkey // Environmental Earth Sciences. 2010. № 61. P. 1467–1472.
9. Using tree-ring signals and numerical model to identify the snow avalanche tracks in Kastamonu, Turkey / N. Köse [et al.] // Natural Hazards. 2010. № 54. P. 435–449.
10. Sailer R., Rammer L., Sampl P. Recalculation of an artificially released avalanche with SAMOS and validation with measurements from a pulsed Doppler radar // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2002. № 2. P. 211–216.
11. Sampl P., Zwinger T. Avalanche simulation with SAMOS // Annals of Glaciology. 2004. Vol. 38. P. 393–398.
12. Turchaninova A.S. Opredelenie zon zarozhdeniya i ocenka dinamicheskikh harakteristik snezhnyh lavin: dis. ... kand. geograf. nauk. M.: Mosk. gos. un-t im. M.V. Lomonosova, 2013. 175 s.
13. Lentyaeva T.V. Programmaya realizaciya trekhmernoj modeli dinamiki snezhnoj massy // Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii. 2023. № 3. S. 104–111.
14. Kalach A.V., Solov'ev A.S., Lentyaeva T.V. Modelirovanie dvizheniya snezhnoj laviny // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2025. № 1 (107). S. 116–133. DOI: 10.25257/TTS.2025.1.107.116-133
15. Kalach A.V., Solov'ev A.S., Lentyaeva T.V. Model' i algoritm vzaimodejstviya snezhnoj laviny so stroeniyami // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2024. № 1 (103). S. 152–163. DOI: 10.25257/TTS.2024.1.103.152-163
16. Sampl P., Zwinger T. Avalanche simulation with SAMOS // Annals of Glaciology. 2004. Vol. 38. P. 393–398. DOI: 10.3189/172756404781814780
17. Christen M., Bartelt P., Gruber U. Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 63. № 1–2. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.004
18. Kalach A.V., Solov'ev A.S., Lentyaeva T.V. Komp'yuternoe modelirovanie vozdeystvij snezhnoj laviny na ob'ekty infrastruktury v usloviyah chrezvychajnoj situacii // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 1 (73). S. 30–40. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-30-40

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.11.2025; одобрена после рецензирования: 03.04.2026;
принята к публикации: 29.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 20.11.2025; approved after review: 03.04.2026;
accepted for publication: 29.04.2026

Информация об авторах:

Калач Андрей Владимирович, начальник кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну Воронежского института ФСИН России (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1А); профессор кафедры прикладной математики МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), доктор химических наук, профессор, e-mail: a_kalach@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>, SPIN-код: 2584-7456

Соловьев Александр Семенович, профессор кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну Воронежского института ФСИН России (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1А), доктор технических наук, доцент, e-mail: asoloviev58@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6150-1090>, SPIN-код: 2494-6180

Лентяева Татьяна Владимировна, старший преподаватель МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), e-mail: mtv_ef2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6855-8703>, SPIN-код: 7207-1714

Information about the authors:

Kalach Andrey V., head of the department of information security and protection of information constituting a state secret of the Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia (394072, Voronezh, Irkutskaya str., 1A); professor of the department of applied mathematics of MIREA – Russian technological university (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), doctor of chemical sciences, professor, e-mail: a_kalach@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>, SPIN: 2584-7456

Soloviev Alexander S., professor of the department of information security and protection of information constituting a state secret of the Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia (394072, Voronezh, Irkutskaya str., 1A), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: asoloviev58@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6150-1090>, SPIN: 2494-6180

Lentyaeva Tatyana V., senior lecturer of MIREA – Russian technological university (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), e-mail: mtv_ef2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6855-8703>, SPIN: 7207-1714

Научная статья

УДК 656(1-21):504.3.054:338.14; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-68-79

**РИСК-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
УЩЕРБА ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНО ОПАСНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА
ТРАНСПОРТОМ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ**

✉ Ложкин Владимир Николаевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ vnlojkin@yandex.ru

Аннотация. В аспекте чрезвычайного экологического кризиса глобального масштаба, выражающегося катастрофическим изменением климата, сокращением биологического видового разнообразия флоры и фауны, загрязнением поллютантами окружающей человека воздушной среды его обитания и, как следствие, беспрецедентного роста заболеваемости в густонаселенных индустриальных агломерациях планеты, исследуется вопрос контроля чрезвычайно опасного загрязнения атмосферы городским транспортом по критериям наносимого населению ущерба в Санкт-Петербурге. Контроль осуществляется по индикаторам ожидаемых, «некомпенсируемых» рыночными механизмами «издержек» (ущербов) той части городского населения, которая, не участвуя в организации процессов оказания транспортных услуг и приобретения от этой деятельности прибыли, оказывается наиболее уязвимой в отношении рисков ухудшения условий жизнедеятельности в результате загрязнения атмосферного воздуха. Оригинальные оценочные модели и алгоритмы расчета «внешних издержек» адаптированы к современным подходам государственной их «компенсации», внедренных в отдельных зарубежных странах, с учетом адаптации к реальному техническому состоянию эксплуатируемого городского транспорта и финансово-демографической социальной среды Санкт-Петербурга. Приводятся расчетные оценки чрезвычайного сверхнормативного накопления в воздухе частиц сажи, оксидов серы, азота, углерода и углеводородов. Оценки выражаются в натуральных и денежных показателях, отслеживаемых по негативным эффектам нарушения состояния здоровья, ухудшения качества агропродукции, «порчи» элементов инфраструктуры, потепления климата.

Ключевые слова: городской транспорт, вредные (загрязняющие) вещества, атмосфера, здоровье населения, парниковые газы, климат, чрезвычайная экологическая ситуация, «внешние издержки»

Для цитирования: Ложкин В.Н. Риск-ориентированная методология прогнозирования ущерба от чрезвычайно опасного загрязнения воздуха транспортом в Санкт-Петербурге // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 68–79. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-68-79

Scientific article

A RISK-BASED METHODOLOGY FOR FORECASTING DAMAGES FROM EXTREMELY HAZARDOUS AIR POLLUTION FROM TRANSPORT IN SAINT-PETERSBURG

✉ **Lozhkin Vladimir N.****Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia**✉ vnlojkin@yandex.ru

Abstract. In the context of an extraordinary global environmental crisis, characterized by catastrophic climate change, the decline of biodiversity, the pollution of the human air with pollutants, and, consequently, an unprecedented rise in disease rates in densely populated industrial agglomerations around the world, the issue of monitoring extremely hazardous air pollution from urban transport is examined based on the damage caused to the population in Saint-Petersburg. Monitoring is carried out using indicators of expected «costs» (damages) «uncompensated» by market mechanisms for that portion of the urban population that, by not participating in the organization of transportation services and profiting from these activities, is most vulnerable to the risks of deteriorating living conditions as a result of air pollution. Original assessment models and algorithms for calculating «external costs» are adapted to modern approaches to state «compensation» implemented in certain foreign countries, taking into account the actual technical condition of operating urban transport and the financial, demographic, and social environment of Saint-Petersburg. Estimates are provided for the extreme, excessive accumulation of soot particles, sulfur oxides, nitrogen, carbon, and hydrocarbons in the air. The estimates are expressed in physical and monetary terms, measured by the negative effects of poor health, deterioration in the quality of agricultural products, damage to infrastructure, and global warming.

Keywords: urban transport, harmful substances (pollutants), atmosphere, public health, greenhouse gases, climate, environmental emergency, «external costs»

For citation: Lozhkin V.N. A risk-based methodology for predicting damage from extremely hazardous air pollution from transport in Saint-Petersburg // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 68–79. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-68-79

Введение. Состояние проблемы

Столпами глобальной устойчивости развития цивилизации в актуальной повестке дня, как известно [1, 2], являются проблемы, так называемого, «тройного планетарного кризиса», а именно: изменение климата [3], уменьшение разнообразия видов [4]¹ и загрязнение опасными химическими веществами промышленности окружающей природной среды [5]. Смягчение остроты негативных последствий тройного экологического кризиса на планетарном и региональном уровнях востребовали сочетание междисциплинарных методологических подходов, органично сочетающих политические (административные), технологические (технические) и экономические (в частности, инвестиционные) «инструменты» совместно с анализом последствий ухудшения, к примеру, качества воздушной среды городов на протяжении всего периода использования продуктов, к примеру, транспортных процессов или административных (государственных) политических стратегий [1, 2].

¹ The Rio Declaration on Environment and Development: from The United Nations Conference on Environment and Development. URL: http://www.unesco.org/education/pdf/RIO_E.PDF (дата обращения: 16.04.2026)

Иллюстрацией к отмеченному является, экспериментально засвидетельствованный авторами [5] феномен влияния интенсивности транспорта непосредственно на загрязнение окружающей среды крупного города, выразившийся метаморфозой снижения уровня концентраций NO_2 и бензола по причине административного введения карантина из-за COVID-19, за которым последовало снижение потребности населения в транспортных услугах на весь период его действия в г. Дели (Индия). Исследованиями автора [6] была доказана решающая роль в загрязнении нижнего (приземного) слоя городской атмосферы, отличающемся интенсивным турбулентным перемешиванием в нем «взвешенных» аэрозольных частиц в условиях метеорологического режима стратифицированной атмосферы, или, – образованием «застойных» зон в регионе по причине температурной инверсии и скорости ветра меньше 2 м/с.

Из законов энергодинамики рабочих процессов тепловых транспортных двигателей [7] в исследовании [8], на примере улично-дорожной сети Санкт-Петербурга, расчетным путем было показано, что экстремальные загрязнения воздушной среды поллютантами и парниковыми газами носят ярко выраженный, локальный характер, а на оздоровление окружающей среды весомое положительное влияние оказывает установка на муниципальные автобусы каталитических нейтрализаторов авторской [9] конструкции с рекуперацией тепла отработавших газов (ОГ). Разработке технологий производства и испытаний перспективных термически прочных алюминиевых сплавов для корпусных деталей таких востребованных в автомобильной промышленности устройств, как правило, сложной геометрической формы уделяется сегодня повышенное внимание [10].

Процитированными ранее исследованиями авторов г. Дели в Индии [5] была установлена (оказавшейся закономерной) связь уровня концентраций поллютантов и парниковых газов в ОГ транспортных средств с видом рабочего процесса двигателя (дизельный, бензиновый), а также положительное влияние электромобилей на оздоровление городской среды в местах интенсивной эксплуатации городского транспорта (ГТ). Ученые Московского автомобильно-дорожного университета (МАДИ) в работе [7] доказали перспективность решения анализируемой эколого-энергетической проблемы комбинированных поршневых дизельных двигателей путем аккумулирования под высоким давлением энергии впрыскивания в цилиндры топлива.

В европейских государствах наряду с внедрением программы «Copert methodology», рассмотренной в авторской работе [11], «бремя» воздействия на горожан выбросов ЗВ от ГТ стало нейтрализоваться налоговой практикой с помощью экономико-финансовых инструментов оценки «внешних издержек»². «Внешние издержки» – это экологические ущербы от выброса вредных (загрязняющих атмосферу) веществ (ЗВ), компенсируемые администрацией, по сути, в принудительном порядке. В чрезвычайно опасных ситуациях воздействия ЗВ ГТ на население и объекты критической инфраструктуры «западный» опыт³ стал востребован и в Санкт-Петербурге [12], так как компенсация экологических ущербов, наносимых населению ГТ, не попадает в сферу регулирования рыночными механизмами. Для Санкт-Петербурга проблема выбросов ГТ поллютантов [8, 11, 12], аналогично городам мира [5], на рубеже 2000 г. стала особо актуальной. В связи с обострением проблемы углеродной нейтральности актуализировались как вопросы учета CO_2 , метана CH_4 от колесных транспортных средств [2], так и, опосредованно, от тепловых электростанций, – в эквиваленте расходуемой электрической энергии [10] электрическим ГТ, а именно, троллейбусами, трамваями, наземными электричками и подземными электропоездами метрополитена [11, 12]. Изложению результатов данных исследований посвящена статья.

² Проект «Оценка внешних издержек функционирования транспорта в Санкт-Петербурге» («External costs of transport in St. Petersburg»), поддержанный Министерством транспорта Дании и Комитетом по транспорту Правительства Санкт-Петербурга, 1999–2003

³ Проект «Управление качеством воздуха в странах Восточной Европы» («Air Quality Governance in the ENPI East Countries»), поддержанный Европейской Комиссией (EuropeAid/129522/C/SER/Multi; Contract № 2010/232-231) и Министерством природных ресурсов Российской Федерации, 2011–2014

Объекты и методология исследований

Объектами исследования были загрязнители (ТЧ, NO_x, SO₂, CO, HC – не менее 95 %) и парниковые газы (CO₂, CH₄), поступающие и загрязняющие воздушную среду Санкт-Петербурга при эксплуатации всех видов наземного и подземного ГТ (автотранспорт, трамваи, троллейбусы, электропоезда, в том числе, метрополитена, кроме водного транспорта). Объемы выбросов ЗВ от электрического ГТ оценивались по тем же загрязнителям атмосферы тепловых электростанций, генерирующих в эквиваленте расходуемой конкретным видом ГТ электроэнергию путем сжигания природного газа [11].

Методика расчета ущерба, причиняемого населению, объектам городской инфраструктуры, агропромышленному комплексу, лесному и парковому хозяйствам и воздействия на климат твердыми частицами, углеводородами, оксидами серы и азота, угарным и парниковыми газами, как производных работы ГТ, выполняется по показателям ожидаемых «некомпенсируемых внешних издержек» [11]. На рис. 1 представлена схема маршрутизации отслеживаемого эффекта негативного влияния загрязнения атмосферы ГТ. Особенностью методологии расчета ущерба, испытываемого горожанами, выполняется в соответствии с подходом учета «некомпенсируемых рыночными механизмами» [11] издержек от загрязнения атмосферного воздуха загрязнителями и парниковыми газами (преимущественно, CO₂, CH₄) в результате функционирования ГТ [12]. Решение данной проблемы, по положительному опыту некоторых зарубежных стран [2, 5], детально проанализированного в работе [11], предполагает «вмешательство» городской администрации в экономическое «рыночное» регулирование транспортных процессов.

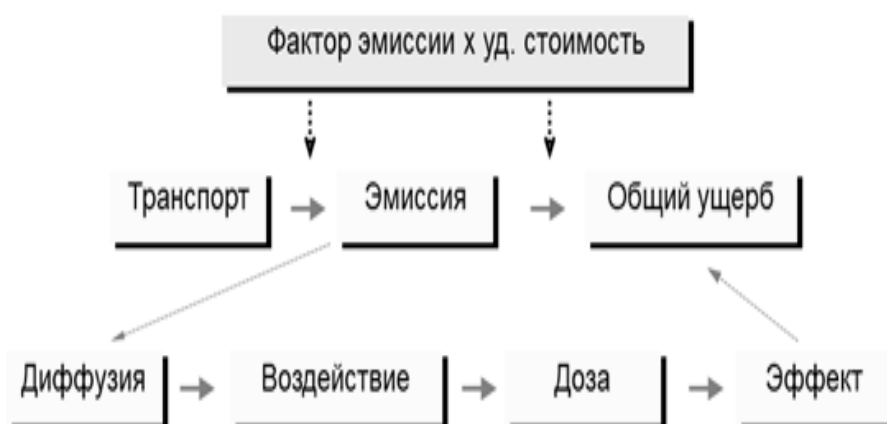


Рис. 1. Схема маршрута отслеживания негативного эффекта от выбросов ГТ

Оно направлено на «смягчение» рисков сверхнормативного токсического, канцерогенного, климатического и инфраструктурного разрушающего воздействия атмосферных загрязнителей ГТ, выражаемых в натуральных и монетарных показателях. Расчетные исследования проведены для альтернативных гипотетических сценариев, предполагающих внедрение Администрацией Санкт-Петербурга мероприятий реформирования ГТ и перевозочных процессов, направленных на «оздоровление» воздушной среды. При этом монетарное выражение ущерба от ЗВ транспорта выражается в удельных показателях отношения издержек в рублях/Евро на единицу объема/массы эмитируемого в атмосферу загрязнителя или парникового газа, а негативное воздействие загрязнителя отслеживается по доказанным на сегодняшний день наукой и практикой связям [6] (рис. 2).

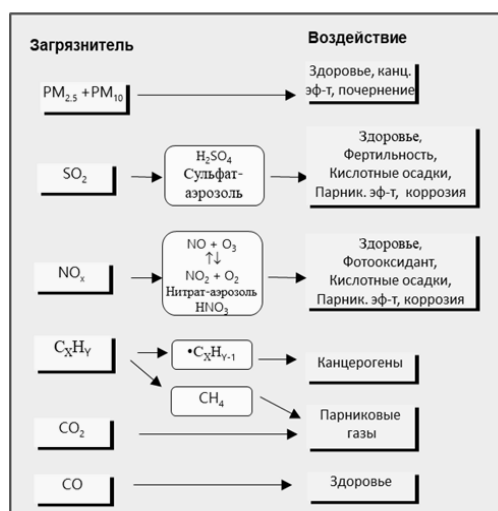


Рис. 2. Связь химических загрязнителей с отслеживаемыми негативными воздействиями

Если отмеченное резюмировать, оригинальной особенностью авторского подхода отслеживания специфики негативных эффектов воздействия (правая часть рис. 2) от химических загрязнителей атмосферного воздуха (левая часть рис. 2), является их разнообразие: здоровье горожан (токсичность CO и фото-оксидантов $NO + O_3 \rightleftharpoons NO_2 + O_2$, последние образуются в верхних слоях атмосферы под воздействием солнечной радиации, канцерогенез и ослабление детородных функций молодых женщин – «фертильности» от воздействия полициклических углеводородов C_xH_{y-1} и других ЗВ, в частности, твердых частиц проникающе-опасных размеров $PM_{2.5}$ и PM_{10} , отравление «легким смогом» O_3 – озоном), потеря урожайности агрономических культур в результате закисления почвы сульфат- и нитрат-аэрозолями, содержащими H_2SO_4 и HNO_3 – «кислотные осадки», «почернение» зданий и объектов архитектуры сажей $PM_{2.5}$ и PM_{10} , химическая коррозия металлоконструкций водными растворами H_2SO_4 и HNO_3 , изменение климата от поступления в атмосферу «парниковых газов» CO_2 и CH_4 .

Алгоритмизация расчета издержек (рис. 3) от работы ГТ выполнялась с использованием программы «Corpert methodology» по трем этапам на основе данных «объема движения», эквивалентного производимой ГТ работе.

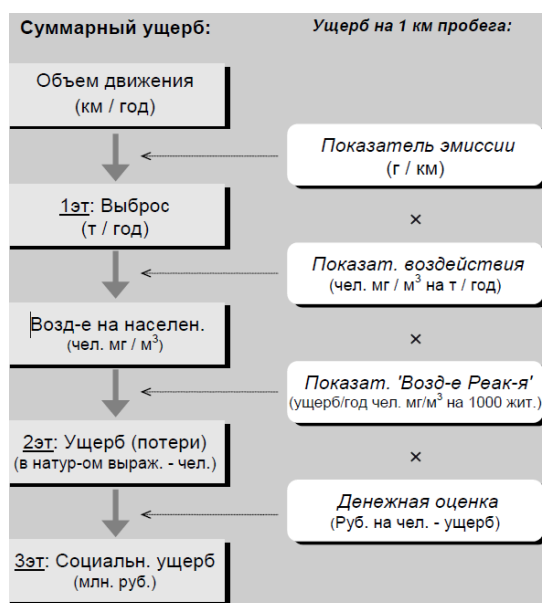


Рис. 3. Этапы определения внешних стоимостных издержек от ЗВ по объемам работы ГТ

На третьем этапе ущерб в натуральных единицах выражения переводится в стоимостные издержки для населения. Результирующий стоимостной ущерб от загрязнения атмосферного воздуха ГТ оценивался с использованием ущерба, приходящегося на 1 км пробега по видам ГТ (рис. 4).

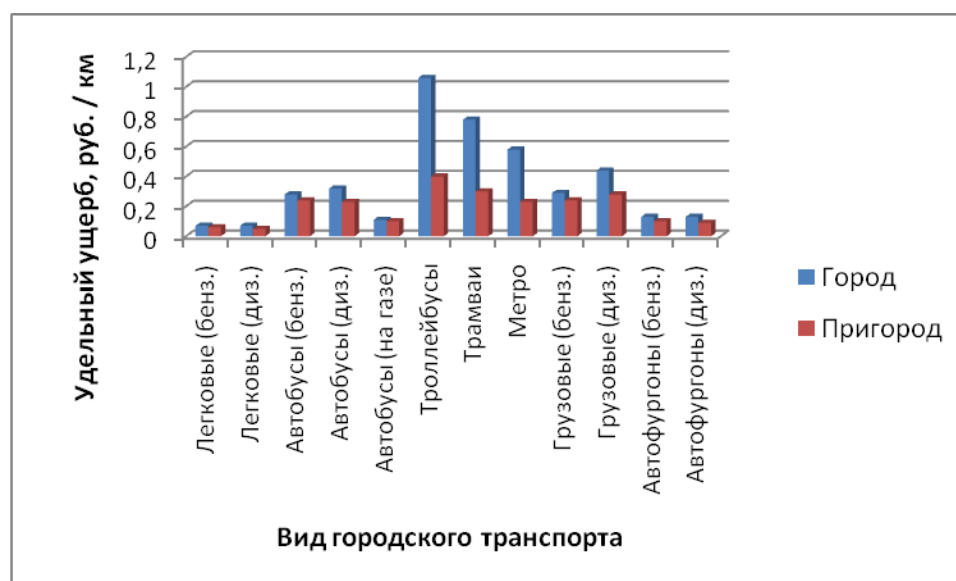


Рис. 4. Стоимостное выражение ущерба от загрязнения атмосферного воздуха, приходящегося на 1 км пробега ГТ

Существенные отличия ГТ с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС) от электрического ГТ (рис. 4) могут найти объяснение (если не принимать во внимание то, что данные по расходованию электроэнергии для электрического транспорта оценивались по ее «списанию»):

- относительно топочного более высоким термическим коэффициентом полезного действия (КПД) организации рабочего процесса сгорания поршневых двигателей;
- значимыми механическими потерями мощности сопротивления качения троллейбуса в сравнении с рельсовым наземным и подземным ГТ;
- использованием геометрии профилирования рельсового полотна в метрополитене таким образом, чтобы задействовать силу земного притяжения для торможения поезда перед остановкой и разгона при наборе скорости.

В последнем алгоритмическом действии (рис. 3) «отслеживается» негативный ущерб от загрязнения атмосферы выбросами химических веществ от ГТ (рис. 1). По основным направлениям этого воздействия (рис. 2) путем оценки максимального и минимального отклонений численных характеристик уточняется и степень, неизбежная по причине «остаточной» неопределенности расчетов, значимость отслеживаемых критериев негативного воздействия. С полной версией авторской методики можно познакомиться по монографиям [11, 12].

Результаты изысканий

Наносимый экологический ущерб от загрязнения воздушной среды Санкт-Петербурга работающим ГТ оценивался по результатам численных оценок:

- годового выброса ЗВ в соответствии с адаптированной европейской методологией «Copert methodology» для гипотетических сценариев, планируемого городской Администрацией, совершенствования подвижного состава и развития муниципальных перевозочных процессов [5, 7, 8];

– ожидаемых, некомпенсируемых населению, «внешних издержек» от загрязнения атмосферы ЗВ выбросами транспорта, как следствие, разрушения зданий и стальных металлоконструкций из-за покрытия агрессивной сажей и коррозии; потери урожайности/продуктивности в сельском, лесном и животноводческом хозяйствах; глобального потепления климата от парниковых газов.

В сравнении с базовой ситуацией, сложившейся в Санкт-Петербурге к 2010 г. и характеризовавшейся существенной долей в парке автотранспорта 2-го экологического класса, оценивались, с высокой долей вероятной ожидаемости, движения к «европейской» модели реформирования ГТ [2, 4, 6], четыре гипотетических сценария на 2030 г., а именно:

1 – работа ГТ с непрерывным ростом в парке автотранспорта к 2012 г. доли автобусов, работающих на сжатом природном газе, с постепенным доведением этой доли до 1,5–3 % (принят за «базовый» сценарий);

2 – при сохранении тенденции с природным газом по п. 1, резко возросшей уже к 2012 г., – доведение его доли на муниципальных автобусах к 2030 г. до 30 %, с ростом в парке всего автотранспорта автомобилей, работающих на топливе 4, 5, 6 экологических классов, до 54–56 %;

3 – вместе с тенденциями по п. 1 доведение доли автотранспорта, работающего на сжатом природном газе, до 11 %, и увеличение доли пассажиров, перевозимых общественным транспортом, до 12 % при соответствующем сокращении пассажиров на индивидуальном ГТ;

4 – перевод всего автотранспорта на двигатели 6-го экологического класса при его обеспечении и моторным топливом соответствующего качества.

Методология информационного процесса мониторинга/прогнозирования загрязнения воздушной среды выбросами от ГТ и их негативного воздействия на население позволила оценить эффективность ранее отмеченных мероприятий по охране окружающей среды Санкт-Петербурга на перспективу до 2030 г.

В табл. 1 и на рис. 5 показан расчетный прогноз уменьшения к 2030 г. выбросов ГТ, включая с электрическим приводом и издержками от изменения климата⁴, вредных (загрязняющих) веществ для четырех рассматриваемых сценариев (по массе и в процентах по отношению к базовому сценарию – 2012 г.).

Таблица 1

**Уменьшение выбросов ГТ вредных веществ в атмосферу Санкт-Петербурга
в сумме к 2030 г. при четырех сценариях в сравнении с базовым сценарием, в тыс. т.**

Вещество	Сценарий			
	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
ТЧ	34	74	120	237
NO _x	1 146	115	9 925	12 808
CO	318	2 770	2 800	2 805
CH	14 176	27 087	125 730	131 607
CO ₂	1 908	3 610	20 569	20 959
SO ₂	123 531	194 618	1 141 988	1 309 469

Анализ данных прогноза позволяет сделать следующие выводы:

– внедрение автобусов, использующих газ в качестве моторного топлива (сценарий 1), с доведением их доли до 50 % от общего числа всех действующих автобусов, способно привести к уменьшению выбросов всех рассматриваемых в настоящей работе ЗВ на 3 % – 10 %;

⁴ Об ограничении выбросов парниковых газов: Федер. закон от 2 июля 2021 г. № 296-ФЗ (принят Государственной Думой 1 июня 2021 г., одобрен Советом Федерации 23 июня 2021 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

– анализ «чувствительности», выполненный в отношении сценария 1, показывает, что, если непрерывно увеличивать долю автобусов, работающих на природном газе, вплоть до 100 %, то и в предельном варианте, данная мера приведет к уменьшению массы выбросов загрязняющих веществ на 6 % – 20 %;

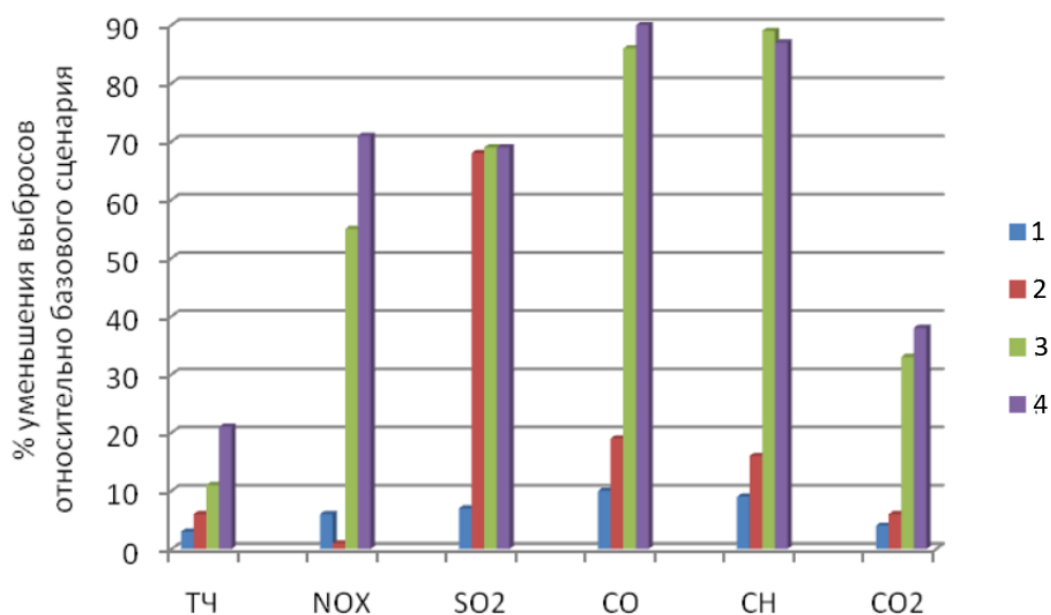


Рис. 5. Уменьшение выбросов ГТ ЗВ к 2030 г. легковыми автомобилями, автофургонами, автобусами, грузовыми автомобилями, трамваями, троллейбусами и поездами метрополитена при реализации четырех сценариев развития транспортной ситуации в Санкт-Петербурге

– внедрение экологически чистых топлив (сценарий 2) может обеспечить двукратное, по сравнению со сценарием 1, сокращение массы выбросов ТЧ, СО и СН, что соответствует уменьшению общей массы выбросов примерно на 20 %;

– значения массы выбросов NOx для базового сценария и для сценария 2 практически одинаковы. Указанный результат обусловлен предположением об увеличении выбросов от автотранспорта, работающего на бензине, при одновременном уменьшении выбросов от дизельных автомобилей;

– внедрение топлив 4-5 экологических классов (сценарий 2) позволяет сократить выбросы SO₂ примерно на две трети. Однако, несмотря на высокую опасность выброса SO₂, его доля от общей массы выбросов ЗВ транспортных средств составляет сравнительно малую часть;

– внедрение требований к токсичности ОГ автотранспорта 4-6 – экологических классов (сценарии 3 и 4) не отразится существенно на сокращении выбросов SO₂ в сравнении с сценарием 2;

– реализация сценария 3 может привести к значительному сокращению выбросов NOx, СО и СН. Это произойдет, главным образом, вследствие введения требований 4-5 – экологических классов, устанавливающих строгие ограничения относительно выбросов указанных веществ. Расчеты показывают, что сокращение выбросов NOx может составить порядка 60 %, СО и СН – 90 % – 95 %;

– уменьшение выбросов ТЧ в результате реализации сценария 3 может достигнуть около 10 %. Следует, однако, обратить внимание на то, что основной причиной этого служит большая масса выбросов, отнесенная в модели на долю транспортных средств, работающих на электроэнергии. Тем не менее для Санкт-Петербурга такое сокращение выбросов ТЧ от автомобилей станет вполне ощутимым, поскольку электростанции, на долю которых приходится значительная часть выбросов, расположены далеко за пределами густонаселенной части города;

– наибольшая разница между сценариями 3 и 4 заключается в выбросах ТЧ (на 20 %) и NO_x (на 80 %). Такое положение обусловлено влиянием внедрения норм требований 4-5 – экологических классов (регенерируемые фильтры и селективный катализ [2, 4, 9]);

– незначительное уменьшение выбросов CO₂ характерно для сценариев 1 и 2, а сценарии 3, 4 приведут уже к 40 % сокращения «главного» парникового газа. В целом автомобили, технические характеристики которых соответствуют требованиям 4-6 – экологических классов, имеют более низкие удельные показатели выбросов CO₂, чем транспортные средства по 1-му экологическому классу, присутствие которых пока обнаруживается в парке Санкт-Петербурга. Снижения выбросов CO₂ можно ожидать по причине наблюдаемого интереса пользователей к гибридным их конструкциям.

Ожидаемого в перспективе сокращения экологического ущерба по четырем вероятным сценариям организации транспортных процессов в Санкт-Петербурге к 2030 г. в сравнении можно достичь путем внедрения предусмотренных Администрацией мероприятий (рис. 6). Апробированный на модели города Санкт-Петербурга, новый информационный процесс мониторинга эколого-энергетической безопасности ГТ разработан на основе выявленных закономерных связей технического состояния ГТ с его экологическими свойствами, которые в эксплуатации предпочтительно оценивать по соблюдению в городе предельно допустимых концентраций (ПДК) ЗВ.

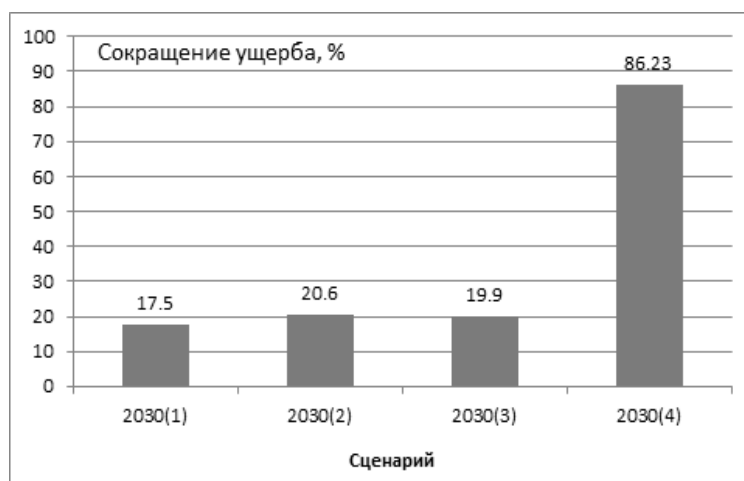


Рис. 6. Ожидаемое к расчетному 2030 г. сокращение ущерба по четырем сценариям, в сравнении

Соблюдения ПДК можно добиваться путем управления транспортными процессами через экономические «рычаги», например, «дифференциации налогов», основанной на готовности к ней горожан, в конечном итоге – не мириться с угрозами загрязнения воздушной среды, приводящей к смертности и заболеваемости, разрушению городской инфраструктуры, потери урожайности и продуктивности в сельском и лесном хозяйствах, а также, непосредственно связанной с этими явлениями, глобальными изменениями климата.

Заключение

Разработана методология прогнозирования ущерба от чрезвычайно-опасного загрязнения воздуха (ТЧ, NO_x, SO₂, CO, HС, CO₂, CH₄) городским транспортом в Санкт-Петербурге, которая дает возможность на оригинальной информационно-технологической платформе [1, 6, 8, 9, 10, 11, 12] производить оценки в натуральных и монетарных показателях негативного воздействия на население (через заболеваемость), объекты городской инфраструктуры (через коррозию металлоконструкций), агро-промышленные комплексы (через снижение урожайности и продуктивности животноводства), – как совокупного результата, одновременно, функционирующего ГТ таких видов, как: автотранспортные средства, трамваи, троллейбусы, поезда электричек и метрополитена.

Список источников

1. Ложкин В.Н. Сацук И.В. Научное обоснование методов снижения углеродного следа и достижения климатической нейтральности парка пожарных автомобилей как источника экологической нагрузки // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 4 (76). С. 227–238. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-227-238
2. Life-cycle assessment to guide solutions for the triple planetary crisis / S. Hellweg [et al.] // Nature reviews earth: & environment: springernature. 2023. Vol. 4. Iss. 7. P. 471–486. DOI: 10.1038/s43017-023-00449-2
3. Abatzoglou J.T., Williams A.P., Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices // Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46. P. 326–336. DOI: 10.1029/2018GL080959
4. Ложкина О.В., Мальчиков К.Б. Сравнительный анализ пробеговых выбросов автомобилей на различных видах топлива при дорожных заторах // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 2 (103). С. 133–143. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-2-133-143
5. Kaushik N., Das R.M. Investigation of NO_x and related secondary pollutants at Anand Vihar, one of the most polluted area of Delhi // URBAN CLIMATE, ELSEVIER. 2023. Vol. 52. DOI: 10.1016/j.uclim.2023.1017476
6. Ложкин В.Н. О влиянии физического состояния атмосферы на опасное загрязнение воздуха поллютантами транспорта и промышленности в Санкт-Петербурге // Транспорт РФ. 2025. № 5 (120). С. 68–72.
7. Применение интегрированного расчетно-экспериментального комплекса для разработки и доводки рабочих процессов дизеля с аккумуляторной топливной системой / М.Г. Шатров [и др.] // Двигателестроение. 2022. № 1 (287). С. 32–44.
8. Ложкина О.В., Мальчиков К.Б. Мониторинг и прогнозирование опасного загрязнения воздуха маломерными судами и автотранспортом // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2025. № 1 (80). С. 55–62.
9. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Catalytic converter with storage device of exhaust gas heat for city bus // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. P. 412–417. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.067.1
10. Study on Constitutive Model and Fracture Criterion of 7075 Aluminum Alloy at High Temperature / Z. Wang [et al.] // J. of Materi Eng and Perform. 2025. № 34. P. 11151–11161. DOI: 10.1007/s11665-024-09986-3
11. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Информационные процессы в управлении комплексной безопасностью транспорта: стратегическое планирование и моделирование: монография / под общ. ред. Б.В. Гавкалюка. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 164 с.
12. Природные ресурсы в новой экономической модели: монография / Ю.В. Зворыкина [и др.] / под ред. Ю.В. Зворыкиной. М.: МГРИ; ООО Издательский дом «Наука», 2024. 268 с. DOI: 10.18184/978-5-6050437-7-5.2024.268

References

1. Lozhkin V.N. Sacuk I.V. Nauchnoe obosnovanie metodov snizheniya uglerodnogo sleda i dostizheniya klimaticheskoy nejtral'nosti parka pozharnyh avtomobilej kak istochnika ekologicheskoy nagruzki // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 4 (76). S. 227–238. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-227-238
2. Life-cycle assessment to guide solutions for the triple planetary crisis / S. Hellweg [et al.] // Nature reviews earth: & environment: springernature. 2023. Vol. 4. Iss. 7. P. 471–486. DOI: 10.1038/s43017-023-00449-2
3. Abatzoglou J.T., Williams A.P., Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices // Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46. P. 326–336. DOI: 10.1029/2018GL080959

4. Lozhkina O.V., Mal'chikov K.B. Sravnitel'nyj analiz probegovyh vybrosov avtomobilej na razlichnyh vidah topliva pri dorozhnyh zatorah // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2024. № 2 (103). S. 133–143. DOI: 10.23968/1999–5571–2024–21–2–133–143
5. Kaushik N., Das R.M. Investigation of NO_x and related secondary pollutants at Anand Vihar, one of the most polluted area of Delhi // URBAN CLIMATE, ELSEVIER. 2023. Vol. 52. DOI: 10.1016/j.uclim.2023.1017476
6. Lozhkin V.N. O vliyanii fizicheskogo sostoyaniya atmosfery na opasnoe zagryaznenie vozduha pollyutantami transporta i promyshlennosti v Sankt-Peterburge // Transport RF. 2025. № 5 (120). S. 68–72.
7. Primenenie integrirovannogo raschetno-eksperimental'nogo kompleksa dlya razrabotki i dovodki rabochih processov dizelya s akkumulyatornoj toplivnoj sistemoy / M.G. Shatrov [i dr.] // Dvigatelsestroenie. 2022. № 1 (287). S. 32–44.
8. Lozhkina O.V., Mal'chikov K.B. Monitoring i prognozirovaniye opasnogo zagryazneniya vozduha malomernymi sudami i avtotransportom // Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2025. № 1 (80). S. 55–62.
9. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Catalytic converter with storage device of exhaust gas heat for city bus // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. P. 412–417. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.067.1
10. Study on Constitutive Model and Fracture Criterion of 7075 Aluminum Alloy at High Temperature / Z. Wang [et al.] // J. of Materi Eng and Perform. 2025. № 34. P. 11151–11161. DOI: 10.1007/s11665-024-09986-3
11. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Informacionnye processy v upravlenii kompleksnoj bezopasnost'yu transporta: strategicheskoe planirovaniye i modelirovaniye: monografiya / pod obshch. red. B.V. Gavkalyuka. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 164 s.
12. Prirodnye resursy v novoy ekonomicheskoy modeli: monografiya / Yu.V. Zvorykina [i dr.] / pod red. Yu.V. Zvorykinoy. M.: MGRI; OOO Izdatel'skij dom «Nauka», 2024. 268 s. DOI: 10.18184/978-5-6050437-7-5.2024.268

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 21.04.2026; одобрена после рецензирования: 05.05.2026;
принята к публикации: 26.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 21.04.2026; approved after review: 05.05.2026;
accepted for publication: 26.05.2026

Информация об авторах:

Ложкин Владимир Николаевич, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6381-0519>, SPIN-код: 9496-2451

Information about the authors:

Lozhkin Vladimir N., professor of the department of fire and emergency rescue equipment and automotive facilities of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6381-0519>, SPIN: 9496-2451

Научная статья

УДК 53.089.6+352/354-1; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-80-90

КОМПЛЕКСНАЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В МЧС РОССИИ

Гарелина Светлана Александровна;

✉ Любкин Роман Николаевич;

Сысоев Денис Олегович.

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Россия

✉ r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru

Аннотация. Представлена комплексная риск-ориентированная методика планирования и организации поверки средств измерений в системе МЧС России. Методика направлена на минимизацию совокупных потерь, включающих прямые затраты и потенциальный ущерб от временного вывода приборов из эксплуатации. Разработана модульная структура, объединяющая аналитические, логистические и экономические модели, обеспечивающая системный и воспроизводимый подход к управлению поверочными ресурсами. В неё входят пять взаимосвязанных модулей: приоритизация территориальных объектов, оптимизация маршрутов подвижных метрологических лабораторий, распределение средств измерений между каналами поверки, оптимизация поверки приборов радиационного мониторинга и оценка целесообразности расширения поверочных мощностей. Для анализа эффективности предложены количественные критерии, отражающие предотвращённые потери и уровень бюджетной отдачи. Применение предложенной методики позволяет учитывать реальное распределение рисков и ресурсных ограничений, обеспечивая научно обоснованное планирование поверок, рациональное использование бюджета и повышение надёжности функционирования измерительных комплексов. Результаты исследования могут быть использованы при разработке программ метрологического обеспечения, совершенствовании системы технического контроля и формировании стратегий развития инфраструктуры поверочных лабораторий.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, риск-ориентированный подход, поверка, оптимизация, радиационный мониторинг, подвижная метрологическая лаборатория, бюджетная эффективность

Для цитирования: Гарелина С.А., Любкин Р.Н., Сысоев Д.О. Комплексная риск-ориентированная методика обоснования рациональных параметров системы организации поверки средств измерений в МЧС России // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 80–90. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-80-90

Scientific article

COMPREHENSIVE RISK-BASED METHODOLOGY JUSTIFICATIONS OF RATIONAL PARAMETERS SYSTEMS FOR THE ORGANIZATION OF VERIFICATION OF MEASURING INSTRUMENTS IN EMERCOM OF RUSSIA

Garelina Svetlana A.;

✉ Lyubkin Roman N.;

Sysoev Denis O.

✉ r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru

Abstract. A comprehensive risk-based methodology for planning and organizing the verification of measuring instruments in the EMERCOM of Russia system is presented. The technique is aimed at minimizing cumulative losses, including direct costs and potential damage from temporary decommissioning of devices. A modular structure has been developed that combines analytical, logistical and economic models, providing a systematic and reproducible approach to the management of verification resources. It includes five interrelated modules: prioritization of territorial facilities, optimization of routes for mobile metrological laboratories, distribution of measuring instruments between verification channels, optimization of verification of radiation monitoring devices, and assessment of the feasibility of expanding verification capacities. To analyze the effectiveness, quantitative criteria are proposed that reflect the prevented losses and the level of budget return. The application of the proposed methodology makes it possible to take into account the real distribution of risks and resource constraints, ensuring scientifically sound planning of checks, rational use of the budget and improving the reliability of measuring systems. The results of the research can be used in the development of metrological support programs, improvement of the technical control system and formation of strategies for the development of the infrastructure of verification laboratories.

Keywords: metrological support, risk-based approach, verification, optimization, radiation monitoring, mobile metrological laboratory, budgetary efficiency

For citation: Garelina S.A., Lyubkin R.N., Sysoev D.O. Comprehensive risk-based methodology justifications of rational parameters systems for the organization of verification of measuring instruments in EMERCOM of Russia // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 80–90. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-80-90

Введение

Метрологическое обеспечение [1] в системе МЧС России является неотъемлемой частью поддержания технической готовности аварийно-спасательных подразделений и систем радиационного мониторинга¹. Более 90 % парка средств измерений (СИ) в территориальных органах и учреждениях (ТОиУ) составляют приборы давления и вакуума (около 80 %), радиационного излучения и ядерных констант (около 10 %). Исправность этих СИ критически важна для обеспечения готовности как аварийно-спасательного оборудования, так и системы наблюдения за радиационной обстановкой [2]. СИ, входящие в состав технического оснащения аварийно-спасательных подразделений, непосредственно обеспечивают выполнение работ при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) [3]. Их временная недоступность снижает общую оперативную готовность и увеличивает время реагирования. СИ, обеспечивающие работу сети радиационного мониторинга, формируют территориальный охват

¹ Об обеспечении единства измерений»: Федер. закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2008

измерений. Их изъятие приводит к уменьшению плотности наблюдений и, как следствие, повышает риск пропуска опасных изменений радиационной обстановки.

Действующая система поверок в МЧС России сочетает работу подвижных метрологических лабораторий (ПМЛ) и стационарных центров – ФКУ «Центр материально-технического и метрологического обеспечения МЧС России» (Центр МТМО) и аккредитованных коммерческих лабораторий². ПМЛ выполняют поверку на местах эксплуатации СИ давления и вакуума, однако их производительность ограничена временем командировок и транспортной доступностью. Поэтому часть приборов, включая средства радиационного контроля и неохваченные ПМЛ СИ давления и вакуума, направляется в стационарные центры, где цикл изъятия, поверки и возврата занимает от нескольких недель до месяцев.

Таким образом, поверочный процесс сам по себе становится фактором риска, поскольку временное изъятие части СИ из эксплуатации повышает потенциальный ущерб от возможных ЧС из-за снижения доступности приборов. В этих условиях возникает необходимость минимизации совокупных потерь – затрат на поверочный цикл и потенциального ущерба, связанного с простоем СИ. Решение данной задачи требует перехода к риск-ориентированной интегрированной системе поверок, обеспечивающей оптимальный баланс между затратами и возможным ущербом при ограниченных ресурсах. На этой основе разработана комплексная методика обоснования рациональных параметров организации поверки СИ, объединяющая аналитические, логистические и экономические аспекты в единую структуру, направленную на повышение эффективности метрологического обеспечения МЧС России.

Методы исследований

Система организации поверки СИ рассматривается как управляемый объект, в котором совокупные потери зависят от организационных решений, доступных ресурсов и характеристик каналов поверки. Цель исследования – минимизация совокупных потерь P системы организации поверки СИ:

$$P = Z + U,$$

где Z – прямые затраты на поверочный цикл (для ТОиУ включающие только транспортные расходы при поверке в Центре МТМО, и полную стоимость поверки при обращении в коммерческие лаборатории); U – ожидаемый (потенциальный) ущерб от временного вывода приборов из эксплуатации.

При этом риск ЧС R в контексте методики рассматривается как произведение вероятности возникновения неблагоприятного события на величину потенциального ущерба. Риск ЧС для каждого ТОиУ определяет его приоритет при планировании поверок и распределении ресурсов.

Для количественной оценки потенциального ущерба U при временном выводе приборов из эксплуатации применяются две модели, отражающие специфику разных подсистем метрологического обеспечения.

1. Экспоненциальная модель для СИ, использующихся при аварийно-спасательных работах [4, 5]. Ущерб при временном выводе СИ из эксплуатации увеличивается с ростом продолжительности их простоя и описывается зависимостью:

² Об утверждении Руководства по обеспечению единства измерений в Министерстве Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: приказ МЧС России от 30 нояб. 2021 г. № 833 // МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/normativnye-pravovye-akty-mchs-rossii/6510> (дата обращения: 17.08.2025)

$$U_{\text{ACP}} = Y e^{\alpha \omega T \frac{mM}{m-1}}, \quad (1)$$

где Y – потенциальный ущерб при полной работоспособности комплекса СИ, руб./год; $\alpha = 0,046$ 1/ч – эмпирический показатель чувствительности ущерба к времени простоя; ω – частота ЧС, 1/мес.; $T = 1$ год – расчётный период; M – средняя длительность поверки одной партии, мес.; m – число партий отправки приборов на поверку.

2. Степенная модель для сетей радиационного мониторинга³. Для стационарных постов радиационного контроля снижение охвата сети приводит к ускоренному росту ущерба [6], который адекватно описывается степенной зависимостью:

$$U_{\text{мон}} = \frac{B_{\text{max}} M}{T} \left(\frac{1}{m} \right)^{\gamma}, \quad (2)$$

где B_{max} – ущерб при полном отсутствии функционирования сети мониторинга, руб.; γ – показатель нелинейности (чувствительность системы к одновременному выводу нескольких постов).

В основу построения методики положены следующие принципы:

1) Риск-ориентированность – приоритет предоставляется ТОиУ с наибольшими значениями R_j , отражающими интегральный риск возникновения ЧС на территории объекта по соответствующему виду СИ, с учётом возможного ущерба для населения, инфраструктуры и критически важных систем контроля.

2) Ресурсная сбалансированность – решения принимаются с учётом ограничений по бюджету B_{Σ} , поверочной мощности ПМЛ ($N_{\text{ПМЛ}}$) и времени поверочного цикла.

3) Иерархичность – методика основана на модульной структуре и включает несколько функциональных уровней, каждый из которых решает строго определённую частную задачу. Уровни выстроены в логическую последовательность, что обеспечивает системность и поэтапность формирования решений.

4) Замкнутость управления – методика предусматривает использование механизмов обратной связи: результаты выполнения последующих этапов позволяют корректировать параметры предыдущих шагов. Такой подход обеспечивает адаптацию системы к изменяющимся условиям, вариативности исходных данных и неравномерности ресурсной нагрузки.

Совокупные затраты на метрологическое обеспечение ограничиваются бюджетом B_{Σ} , включающим обязательную и вариативную части:

$$B_{\Sigma} = B_{\text{min}} + \Delta B, \quad (3)$$

где B_{min} – минимально необходимый бюджет для обеспечения поверки всего комплекса СИ в Центре МТМО (включая эксплуатацию действующих ПМЛ и фонд оплаты труда персонала), руб.; ΔB – дополнительные средства, направляемые на реализацию оптимизационных решений в рамках модулей методики, руб.

Оптимизация распределения дополнительных средств между модулями формулируется как задача максимизации предотвращённых потерь:

$$\sum \Delta P_i x_i \rightarrow \max, \text{ при } \sum \Delta Z_i x_i \leq \Delta B, x_i \in [0, 1], \quad (4)$$

³ ГОСТ Р 51901.16–2017. Менеджмент риска. Повышение надежности. Статистические критерии и методы оценки (введ. взамен ГОСТ Р 51901.16–2005 (МЭК 61164:1995), дата введения: 2017-09-12 № 1059-ст.). М.: Изд-во «Стандартинформ», 2017. 40 с.

где ΔP_i – предотвращённые совокупные потери при реализации i -го модуля, руб.; ΔZ_i – дополнительные затраты, требуемые для его реализации, руб.; x_i – доля реализации модуля (0 – не реализован, 1 – реализован полностью).

Для оценки результативности каждого решения вводится интегральный показатель отдачи бюджета:

$$\rho_i = \Delta P_i / \Delta Z_i, \quad (5)$$

характеризующий предотвращённые потери на каждый рубль дополнительных затрат.

Показатель ρ_i используется как критерий распределения бюджета при интеграции модулей и позволяет упорядочить решения по их эффективности.

На основе изложенных принципов, моделей (1) – (2) и зависимостей (3) – (5) построена модульная структура комплексной методики, включающая пять взаимосвязанных блоков. Каждый модуль решает отдельную задачу – приоритизацию ТООУ (I), маршрутизацию ПМЛ (II), распределение по стационарным каналам поверки (III – IV) и оценку целесообразности расширения мощностей ПМЛ (V). Эти блоки формируют последовательный и адаптивный цикл управления, направленный на минимизацию совокупных потерь системы метрологического обеспечения МЧС России при заданных ресурсных ограничениях.

Результаты исследования и их обсуждение

Модуль I. Риск-ориентированная приоритизация ТООУ для обслуживания ПМЛ.

Назначение: Определение перечня ТООУ_I, подлежащих обслуживанию ПМЛ в первую очередь. Отбор выполняется по величине риска R_j при ограничении поверочной мощности $N_{ПМЛ}$, что обеспечивает максимальное использование её ресурса.

Исходные данные: R_j ; N_{1j} – количество СИ давления и вакуума; $N_{ПМЛ}$.

Алгоритм работы:

1. ТООУ ранжируются по величине R_j и разбиваются на ранги: $P1 \rightarrow P2 \rightarrow P3$ с шагом $\Delta R = (R_{\max} - R_{\min})/3$.

2. Отбор начинается с ранга $P1$: в план включаются объекты по убыванию R_j до выполнения условия $\sum_j N_{1j} \leq N_{ПМЛ}$.

3. При превышении мощности ПМЛ производится замена наиболее объёмного ТООУ на менее ресурсоёмкий для минимизации $|\sum_j N_{1j} - N_{ПМЛ}| \rightarrow \min$.

Результаты и выходные параметры:

1) Перечень ТООУ_I, включённых в план обслуживания ПМЛ.

2) Объёмы поверяемых СИ $N_{1I}(ТООУ_I)$.

3) Предотвращённые совокупные потери:

$$\Delta P_I = R_0 - R_I - \Delta Z_I,$$

где R_0 – риск при нерациональном (территориальном) распределении выездов ПМЛ, когда планирование выполняется по географическому принципу (метод ближайшего соседа) без учёта уровней риска и приоритетности объектов; R_I – риск после применения риск-ориентированного отбора ТООУ с учётом поверочной мощности ПМЛ; ΔZ_I – дополнительные транспортные затраты, возникающие вследствие увеличения средней длины маршрутов при переходе от территориального принципа планирования к риск-ориентированному.

Таким образом, модуль I формирует оптимальный перечень ТООУ, обеспечивающий максимальное снижение совокупных потерь при заданной мощности ПМЛ. Полученные данные служат исходными для модулей маршрутизации и бюджетной оптимизации.

Модуль II. Оптимизация маршрутов ПМЛ.

Назначение: Определение оптимальной последовательности выездов ПМЛ для минимизации суммарного времени маршрутизации и транспортных затрат при сохранении нормативной загрузки и ограниченного времени командировки β .

Исходные данные: координаты ТООУ_I (x_j , y_j); t – время поверки СИ; v – скорость передвижения ПМЛ; β ; N_{1j} ; $N_{\text{ПМЛ}}$.

Алгоритм работы:

1. Формируется матрица расстояний $L_{ij} = ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{0.5}$ и соответствующая матрица времён переходов $T_{ij} = L_{ij}/v$.

2. Начальный маршрут строится жадным методом [7, 8] – последовательным выбором ближайшего неотмеченного ТООУ_I.

3. Оптимизация маршрута выполняется методом имитации отжига [9, 10], минимизируя:

$$T_{\text{год}} = \sum_{k=1}^K T_k = \sum_{k=1}^K (\sum_{i,j} T_{ij} + \sum_j N_{1j}^k t),$$

при ограничениях на длительность каждой командировки $T_k \leq \beta$, $\sum_j N_{1j}^k \leq N_{\text{ПМЛ}}$, где k – индекс командировки.

4. При наличии временного резерва включаются дополнительные объекты ДТОУ следующего ранга.

Результаты и выходные параметры:

1) Оптимальная последовательность маршрутов ПМЛ и уточнённый перечень обслуживаемых объектов ТООУ_{II} = ТООУ_I + ДТОУ.

2) Уточнённые объёмы поверяемых ПМЛ СИ $N_{\text{II}}(\text{ТООУ}_{\text{II}})$.

3) Суммарное оптимизированное годовое время маршрутизации $T_{\text{год}}$.

4) Предотвращённые совокупные потери:

$$\Delta P_{\text{II}} = (R_I - R_{\text{II}}) - \Delta Z_{\text{доб}},$$

где R_{II} – риск после оптимизации маршрута и включения дополнительных ДТОУ; $\Delta Z_{\text{доб}}$ – дополнительные затраты на маршрут, связанные с доббором ДТОУ.

Таким образом, модуль II обеспечивает рациональное использование поверочного ресурса ПМЛ, позволяя за счёт оптимизации маршрутов увеличить охват ТООУ без роста годовых затрат и поддерживать минимальный уровень совокупных потерь в системе метрологического обеспечения МЧС России. Оставшаяся часть СИ, не охваченная поверкой ПМЛ, передаётся на обработку в Модуль III, где выполняется их распределение между стационарными каналами поверки с учётом бюджетных и временных ограничений.

Модуль III. Распределение неохваченных ПМЛ СИ между каналами поверки.

Назначение: Оптимизация распределения СИ, не охваченных поверкой ПМЛ, между стационарными каналами поверки, при условии, что бюджет ΔZ_{III} представляет собой лимит средств, выделенных на оплату коммерческих поверок. Оптимизация выполняется с учётом установленной пропускной способности каналов и заданной длительности поверочного цикла.

Исходные данные: N_{III} ; M ; ΔZ_{III} ; ω_j ; T .

Алгоритм работы:

1. Бюджет ΔZ_{III} распределяется между ТООУ пропорционально риску R_j : $\Delta Z_{\text{III}j} = \Delta Z_{\text{III}} R_j / \sum_j R_j$.

2. Для каждого ТООУ формируется функция совокупных потерь:

$$P(m) = Z_1 + Z_2 m,$$

где $Z_1 = Ye^{\alpha\omega T \frac{mM}{m-1}}$ – функция, отражающая ожидаемый ущерб от временного вывода СИ из эксплуатации (2); Z_2m – прямая составляющая затрат, включающая стоимость поверки и транспортировки одной партии СИ.

3. Оптимальное число партий m^* определяется из условия $dP/dm = 0$, что дает:

$$e^{\alpha\omega T \frac{mM}{m-1}} \frac{mM - M(m-1)}{(m-1)^2} = \frac{Z_2}{Z_1\alpha\omega T}.$$

4. Сравниваются совокупные потери при поверке в Центре МТМО и в коммерческих лабораториях: выбирается вариант с минимальным $P(m^*)$, при условии $Z_{kj} \leq \Delta Z_{III}$, где Z_{kj} – затраты на поверку и транспортировку в коммерческом канале.

Если приоритет поверки установлен за коммерческим каналом, но условие $Z_{kj} \leq \Delta Z_{III}$ не выполняется (то есть стоимость поверки превышает выделенный лимит), часть приборов направляется в коммерческий канал в объёме $N_k = \Delta Z_{III}/Z_{kj}$, а оставшиеся СИ – Центр МТМО.

Результаты и выходные параметры:

1) Распределение СИ по каналам поверки (Центр МТМО и/или коммерческие метрологические лаборатории).

2) Оптимальные значения m^* для каждого канала поверки.

3) Предотвращённые совокупные потери $\Delta P_{III} = P_{base} - P_{III}$, где P_{base} – совокупные потери при базовом (нерациональном) распределении СИ между каналами поверки, включающем стандартное деление (как правило, на две партии) и типовые транспортные расходы; P_{III} – совокупные потери после оптимизации распределения каналов поверки с учётом бюджетных ограничений и рационального числа партий.

Таким образом, модуль III обеспечивает оптимальное распределение СИ между каналами поверки с учётом бюджета и длительности поверочного цикла, минимизируя суммарные потери. Полученные результаты напрямую влияют на последующее распределение бюджетных средств между направлениями метрологического обеспечения и учитываются при формировании общей структуры финансирования в рамках интегрированной системы планирования.

Модуль IV. Оптимизация поверки СИ радиационного мониторинга.

Назначение: Оптимизация распределения приборов радиационного контроля (АСМЧС и КСМ-ЗН) между каналами поверки при ограниченном бюджете ΔZ_{IV} .

Исходные данные: N_{2j} – число СИ радиационного мониторинга; M ; ΔZ_{IV} ; γ ; T .

Алгоритм работы:

Пункты 1 – 4 аналогичны описанным в Модуле III, за исключением формы функции ущерба. Вместо экспоненциальной зависимости (2) используется степенная модель (3).

Оптимальное число партий определяется из условия минимума совокупных потерь:

$$m^* = (B_{max}(M/T)(p-1)/Z_2)^{1/p}.$$

Результаты и выходные параметры:

1) Распределение СИ радиационного контроля по каналам поверки (Центр МТМО и/или коммерческие лаборатории).

2) Оптимальные значения m^* для каждого канала поверки.

3) Предотвращённые совокупные потери $\Delta P_{IV} = P_{base} - P_{IV}$, где P_{base} – совокупные потери при базовом (нерациональном) распределении СИ между каналами поверки, включающем стандартное деление (как правило, на две партии) и типовые транспортные расходы; P_{IV} – совокупные потери после оптимизации распределения каналов поверки с учётом бюджетных ограничений и рационального числа партий.

Таким образом, модуль IV сохраняет общую структуру модуля III, но учитывает специфику радиационных сетей. Реализация модуля позволяет определить оптимальное число партий и объём поверки, при которых сохраняется требуемый охват сети и минимизируются совокупные потери метрологического обеспечения МЧС России.

Модуль V. Расширение поверочных мощностей.

Назначение: Оценка целесообразности увеличения количества ПМЛ за счёт анализа баланса между риском от неохваченных поверкой СИ и совокупными затратами на создание и эксплуатацию новой ПМЛ. Цель модуля – определить, компенсирует ли снижение риска стоимость расширения системы поверки.

Исходные данные: $R_{\text{ост}}$ – суммарный риск (ущерб) по неохваченным ПМЛ СИ; $C_{\text{ПМЛ}}$ – стоимость изготовления и оснащения ПМЛ; $C_{\text{экс}}$ – годовая эксплуатационная стоимость одной ПМЛ; $Z_{\text{марш}}$ – средние транспортные расходы при выполнении маршрутов новой ПМЛ; технические характеристики шасси; ограничения по персоналу и бюджету.

Алгоритм работы:

1. Рассчитываются совокупные затраты на введение дополнительной лаборатории:

$$Z_{\text{ПМЛ}} = C_{\text{ПМЛ}} + C_{\text{экс}} + Z_{\text{марш}}.$$

2. Определяются предотвращённые совокупные потери за счёт расширения:

$$\Delta P_V = R_{\text{ост}} - Z_{\text{ПМЛ}}.$$

3. Расширение признаётся экономически целесообразным при условии: $\Delta P_V > 0$.

Результаты и выходные параметры:

1) Величина предотвращённых совокупных потерь ΔP_V .

2) Решение о целесообразности создания новой ПМЛ.

Таким образом, модуль V завершает комплексную методику и позволяет оценить, оправданы ли инвестиции в создание новой ПМЛ с точки зрения снижения совокупного ущерба от неохваченных поверкой СИ. Он формирует критерий принятия решения о развитии поверочной инфраструктуры и обеспечивает стратегическую устойчивость системы метрологического обеспечения МЧС России.

Заключение

Разработана комплексная риск-ориентированная методика планирования и организации поверки средств измерений в системе МЧС России. Она основана на поэтапном снижении совокупных потерь, включающих прямые затраты и потенциальный ущерб от временного вывода приборов из эксплуатации.

Научная новизна работы заключается в формализации поверочного процесса как управляемой системы с целевой функцией минимизации совокупных потерь и в разработке модульной структуры методики, объединяющей аналитические, логистические и экономические аспекты в единую модель. Впервые предложено использовать риск-ориентированный подход для оптимизации каналов и маршрутов поверки, введены количественные показатели эффективности (предотвращённые потери и интегральный показатель отдачи бюджета), а также реализованы модели оценки ущерба различной природы – экспоненциальная для аварийно-спасательных средств измерений и степенная – для сетей радиационного мониторинга.

В первом модуле разработан механизм риск-ориентированной приоритизации территориальных органов и учреждений, обеспечивающий отбор объектов для обслуживания подвижными метрологическими лабораториями с учётом уровня риска ЧС. Применение данного подхода позволило сформировать перечень приоритетных объектов и снизить ожидаемый ущерб при сохранении производительности лабораторий.

Во втором модуле реализован алгоритм оптимизации маршрутов подвижных метрологических лабораторий по критерию минимизации годового времени маршрутизации и транспортных затрат. Это позволило увеличить охват поверкой без роста затрат и фонда рабочего времени, обеспечив дополнительное снижение совокупных потерь.

Третий модуль обеспечил рациональное распределение средств измерений, не охваченных поверкой подвижных лабораторий, между Центром материально-технического и метрологического обеспечения и коммерческими лабораториями. В рамках модуля использована экспоненциальная зависимость совокупных потерь от времени простоя приборов, что позволило определить оптимальное количество партий для поверки и достичь минимальных потерь при заданных бюджетных ограничениях.

Четвёртый модуль уточняет подход к планированию поверок приборов радиационного мониторинга. Для этой категории средств измерений применена степенная зависимость ущерба от снижения охвата сети, что позволило определить допустимую долю одновременного изъятия приборов и оптимальные объёмы поверки при сохранении требуемого уровня радиационного контроля.

Пятый модуль направлен на оценку целесообразности расширения поверочных мощностей системы. Введён критерий, позволяющий сравнивать потенциальное снижение ущерба от неохваченных поверкой средств измерений с затратами на создание и эксплуатацию новой подвижной метрологической лаборатории. Расширение признано обоснованным, если предотвращённые потери превышают затраты на его реализацию.

Комплексная реализация предложенной методики обеспечивает согласованное и адаптивное управление системой метрологического обеспечения, позволяя эффективно перераспределять ресурсы между её уровнями и минимизировать совокупные потери при существующих ограничениях по времени, бюджету и производительности. Методика пригодна для применения на федеральном, региональном и объектовом уровнях, а её модули могут использоваться как совместно, так и автономно, в зависимости от задач и доступных ресурсов.

Разработанная методика может быть использована в качестве инструмента для планирования поверочных работ, повышения эффективности метрологического обеспечения и развития инфраструктуры поверочных лабораторий в системе МЧС России.

Список источников

1. Земляной К.Г., Глызина А.Э. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. 235 с.
2. Создание автоматизированной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций с радиационным фактором в Брянской области / О.Н. Апанасюк [и др.] // XXI ВЕК. Техносферная безопасность. 2023. № 2. С. 144–155.
3. Аварийно-спасательное оборудование // МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/2131> (дата обращения: 13.01.2026).
4. Основные пути повышения эффективности применения аварийно-спасательных служб при ликвидации чрезвычайных ситуаций: отчёт о НИР (заключительный): Шифр: «Спасатель-00» / рук. работы В.С. Федорук; отв. исп. П.А. Попов. Новогорск, 2000. 29 с.
5. Епихин А.В., Резников В.М. Вероятностная оценка эффективности проведения аварийно-спасательных работ // Технологии гражданской безопасности. 2007. № 3. С. 45–47.
6. Wheatley S., Sovacool B., Sornette D. Of disasters and dragon kings: a statistical analysis of nuclear power incidents and accidents // Risk Analysis. 2017. Vol. 37. № 1. P. 99–115.
7. Совершенный алгоритм. Жадные алгоритмы и динамическое программирование. Сер.: Библиотека программиста. СПб.: Питер, 2020. 256 с.
8. A Comparison of Greedy Algorithm and Dynamic Programming Algorithm // Web of Conferences SHS. URL: https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/pdf/2022/14/shsconf_stehf2022_03009.pdf (дата обращения: 15.11.2025).
9. Метод отжига // Алгоритмика. URL: <https://algorithmica.org/ru/annealing> (дата обращения: 24.03.2025).

10. Delahaye D., Chaimatanan S., Mongeau M. Simulated annealing: From basics to applications / eds. M. Gendreau, J.-Y. Potvin. // Handbook of Metaheuristics. 3rd ed. Cham: Springer, 2019. P. 1–35.

References

1. Zemlyanov K.G., Glyzina A.E. Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya: ucheb. posobie. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2022. 235 s.
2. Sozdanie avtomatizirovannoy sistemy monitoringa chrezvychajnykh situatsiy s radiatsionnym faktorom v Bryanskoj oblasti / O.N. Apanasyuk [i dr.] // XXI VEK. Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2023. № 2. S. 144–155.
3. Avarijno-spasatel'noe oborudovanie // MCHS Rossii. URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/2131> (data obrashcheniya: 13.01.2026).
4. Osnovnye puti povysheniya effektivnosti primeneniya avarijno-spasatel'nykh sluzhbb pri likvidatsii chrezvychajnykh situatsiy: otchyot o NIR (zaklyuchitel'nyj): Shifr: «Spasatel'-00» / ruk. raboty V.S. Fedoruk; otv. isp. P.A. Popov. Novogorsk, 2000. 29 s.
5. Epihin A.V., Reznikov V.M. Veroyatnostnaya ocenka effektivnosti provedeniya avarijno-spasatel'nykh rabot // Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti. 2007. № 3. S. 45–47.
6. Wheatley S., Sovacool B., Sornette D. Of disasters and dragon kings: a statistical analysis of nuclear power incidents and accidents // Risk Analysis. 2017. Vol. 37. № 1. P. 99–115.
7. Sovershennyj algoritm. Zhadnye algoritmy i dinamicheskoe programmirovaniye. Ser.: Biblioteka programmista. SPb.: Piter, 2020. 256 s.
8. A Comparison of Greedy Algorithm and Dynamic Programming Algorithm // Web of Conferences SHS. URL: https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/pdf/2022/14/shsconf_stehf2022_03009.pdf (data obrashcheniya: 15.11.2025).
9. Metod otzhiga // Algoritmika. URL: <https://algorithmica.org/ru/annealing> (data obrashcheniya: 24.03.2025).
10. Delahaye D., Chaimatanan S., Mongeau M. Simulated annealing: From basics to applications / eds. M. Gendreau, J.-Y. Potvin. // Handbook of Metaheuristics. 3rd ed. Cham: Springer, 2019. P. 1–35.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 23.01.2026; одобрена после рецензирования: 10.04.2026;
принята к публикации: 11.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 23.01.2026; approved after review: 10.04.2026;
accepted for publication: 11.05.2026

Информация об авторах:

Гарелина Светлана Александровна, профессор кафедры (механики и инженерной графики) Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), кандидат технических наук, доцент, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN-код: 8591-0495

Любкин Роман Николаевич, преподаватель кафедры эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), e-mail: r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN-код: 9786-4862

Сысоев Денис Олегович, слушатель кафедры оперативного управления мероприятиями РСЧС и ГО Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г.о. Химки, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), e-mail: bangden@mail.ru, SPIN-код: 5545-5060

Information about the authors

Garelina Svetlana A., professor of department of mechanics and engineering graphics of Civil defence academy of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., bld. 1A), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 8591-0495

Lyubkin Roman N., lecturer of the department of the exploitation of transport-technological machines and complexes of Civil defence academy of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., bld. 1A), e-mail r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 9786-4862

Sysoev Denis O., student of department of operational management of emergency situations and civil defense of Civil defence academy of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., bld. 1A), e-mail: bangden@mail.ru, SPIN: 5545-5060

Научная статья

УДК 622.271.6; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-91-101

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ СЕЛЯМИ, ПУТЕМ СОЗДАНИЯ АККУМУЛЯЦИОННЫХ ЗОН И ДОБЫЧЕЙ ИЗ НИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Карпова Жанна Викторовна.

ООО НИПИ «Недра», г. Новочеркасск, Россия.

✉ Яхеев Валерий Васильевич;

Актерский Юрий Евгеньевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ yakvaleri@yandex.ru

Аннотация. Ежегодное селеобразование в поймах горных рек, где сосредоточены наиболее пригодные для хозяйственной деятельности земли, представляет особую опасность. Крупные селевые сбросы перекрывают основное русло реки и создают угрозу затопления значительных территорий, разрушения объектов жизнедеятельности и угрозу жизни людям.

Целью работы является научное обоснование технологии предотвращения чрезвычайных паводковых ситуаций вызванных последствиями селеобразования, связанных с перемещением вниз по течению горных рек твердых стоков, путем создания зон фильтрации и аккумуляции, в которых накапливаются запасы инертных строительных материалов. По завершении паводкового периода из этой зоны организуют добычу инертных материалов с последующим производством строительных материалов и подготовкой выработанного пространства зоны фильтрации и аккумуляции для следующего паводкового сезона.

Обоснована целесообразность отработки высокогорных отвалов Тырныаузского вольфрамомолибденового комбината. Полезное использование техногенного минерального сырья позволят исключить чрезвычайные паводковые ситуации и загрязнение территорий, связанные с техногенным селеобразованием.

Предложенная технология позволяет не только исключить чрезвычайные ситуации, вызванные селями, но и сделать сели созидательным фактором, создающим возобновляемые месторождения инертных строительных материалов.

Ключевые слова: поймы нагорных рек, селеобразование, чрезвычайные ситуации, зона аккумуляции селя, содержание твердого стока, гравийно-валунная составляющая, зона фильтрации твердого стока

Для цитирования: Карпова Ж.В., Яхеев В.В., Актерский Ю.Е. Предотвращение чрезвычайных ситуаций, вызываемых селями, путем создания аккумуляционных зон и добычей из них строительных материалов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 91–101. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-91-101

Scientific article

JUSTIFICATION OF SAFE TECHNOLOGY FOR THE EXPLOITATION OF MOUNTAIN RIVER RESOURCES**Karpova Zhanna V.****LLC NIPI «Nedra», Novocherkassk, Russia.**✉ **Yakheev Valery V.;****Aktersky Yuri E.****Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia**✉ **yakvaleri@yandex.ru**

Abstract. Annual mudflow in the floodplains of mountain rivers, where the most suitable land for economic activity is concentrated, is particularly dangerous. Large mudflows block the main riverbed and pose a threat of flooding of significant territories, destruction of vital facilities and a threat to human life.

The aim of the work is to prevent emergencies related to the movement of solid runoff downstream of mountain rivers, causing mudslides, by creating filtration and accumulation zones in which stocks of inert building materials accumulate. At the end of the flood period, the extraction of inert materials from this zone is organized, followed by the production of building materials and the preparation of the exhausted space of the filtration and accumulation zone for the next flood season.

The feasibility of processing the high-mountain dumps of the Tyrnyauz tungsten-molybdenum plant is substantiated. The beneficial use of technogenic mineral raw materials will allow for the prevention of emergency flood situations and pollution of territories related to technogenic debris flow formation. The proposed technology not only eliminates emergencies caused by debris flows but also turns debris flows into a constructive factor, creating renewable deposits of inert construction materials.

Keywords: floodplains of mountain rivers, gully formation, emergencies, debris accumulation zone, solid flow content, gravel-boulder component, solid filtration zone

For citation: Karpova Zh.V., Yakheev V.V., Aktersky Yu.E. Justification of safe technology for the exploitation of mountain river resources // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 91–101. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-91-101

Введение

В поймах нагорных рек сосредоточены наиболее пригодные для хозяйственной деятельности земли. Территории, прилегающие к руслам рек, имеют важные народно-хозяйственные объекты жизнедеятельности, сельскохозяйственной, транспортной, энергетической инфраструктуры, горнодобывающие предприятия. Одновременно эта зона является экологически наиболее уязвимой. В данной зоне происходит наложение природной составляющей нагрузки на среду и техногенной – результатов жизнедеятельности человека. К природной группе факторов можно отнести регулярное селеобразование в притоках таких рек, как р. Баксан, бассейн которой представляет особую опасность по регулярности, числу и объему селей. В частности, объем грязекаменной массы, попавшей в р. Баксан, 22 июля 2025 г. во время схода селя по Герхожансу, ее правому притоку, специалисты Высокогорного геофизического института (г. Нальчик) оценили в 6–7 млн м³¹.

В паводковый период селевые потоки из многочисленных притоков попадают в основное русло реки. В качестве притоков могут быть как небольшие ручьи, сезонно многократно увеличивающие свой сток, так и более полноводные притоки – источники крупных селевых сбросов. Крупные селевые сбросы перекрывают основное русло реки и создают угрозу затопления значительных территорий, разрушения объектов жизнедеятельности.

¹ Кондратьева Н.В. Ученый: экспертная оценка при проектировании в горах поможет избежать селевых разрушений. URL: <https://tass.ru/nauka/24690547> (дата обращения: 11.02.2026)

Территории, прилегающие к руслам нагорных рек, имеют благоприятный рельеф для концентрации поселений, важных народно-хозяйственных объектов жизнедеятельности, транспортной, энергетической инфраструктуры, предприятий и поэтому весьма уязвимы при возникновении чрезвычайных паводковых ситуаций.

Так, в сентябре 2017 г в результате проливных дождей и сброса около 500 тыс. кубометров воды из высокогорных озер ледника Башкара в притоке р. Баксан – Адыл-Су образовался селя. При сходе селя наблюдались значительные ландшафтные изменения. Произошла подрезка склона обеих сторон русла с уничтожением вековых деревьев, в результате существенно расширилась пойма реки. По сообщению республиканского Главного управления МЧС России, были либо полностью разрушены, либо частично размыты восемь участков федеральной автодороги «Прохладный – Азау», три пешеходных моста, поврежден газопровод высокого давления, потоком унесло несколько автомобилей, ущерб оценивается в несколько десятков миллионов рублей.

Формированию чрезвычайных паводковых ситуаций способствует главная идея существующих селезащитных технологий, суть которой – безопасный режим транспортировки в русло реки селевого потока по специальным сооружениям и дальнейшее производство руслорегулировочных работ с использованием тяжелой строительной техники для повышения транспортирующей способности реки путем удаления из русла реки крупных фракций бульдозерами [1]. Использование тяжелой землеройной техники, транспорта непосредственно в пойме и русле реки является одной из причин загрязнения рек горюче-смазочными материалами. Для ликвидации паводков наносящих ущерб сооружениям и коммуникациям значительная часть руслорегулировочных работ производится в режиме чрезвычайных ситуаций.

Последние годы для г. Тырныауза кроме природного происхождения селевой опасности притоков р. Баксан (Герхожансу и Камык) угрозу представляют техногенные селеобразования из карьерных отвалов в бассейнах рек Большой и Малый Мукулан [2].

Сели природного происхождения вызывают возникновение чрезвычайных паводковых ситуаций, техногенные сели вызывают дополнительно загрязнение поймы рек тяжелыми металлами [3, 4]. То есть в бассейне р. Баксан к повторяемости образования природных селей добавляется повторяемость селей техногенного происхождения имеющих большую экологическую опасность в виде загрязнения окружающей среды. В результате возрастает экологическая уязвимость территорий примыкающих к руслам нагорных рек ниже по течению.

Методы исследования

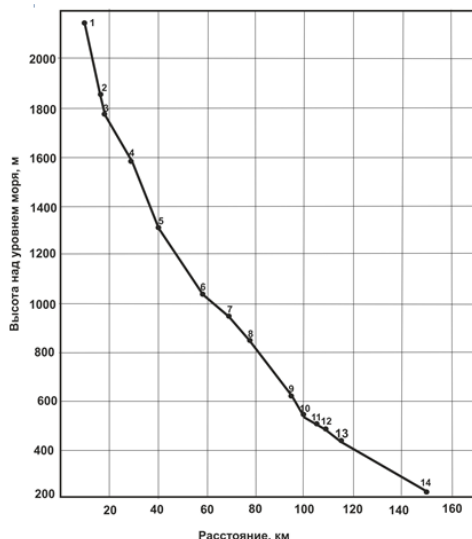
В работе использован комплексный метод исследований, включающий: анализ и научное обобщение теории и практики ликвидации, предотвращения чрезвычайных ситуаций на основе безопасной эксплуатации ресурсов нагорных рек; аналитические, графические методы анализа и расчетов с привлечением математического аппарата и современных систем управления базами данных (СУБД) и языков программирования высокого уровня; экспериментальные исследования; технико-экономический анализ, а также методы математической статистики для обработки получаемых результатов.

Разрушительные свойства селей определяются динамическими параметрами, такими как расход, скорость и плотность селевой массы зависящей от содержания и состава твердого стока [5, 6]. Твердый сток, выход которого составляет от 10 до 70 %, включает крупные камни, мелкозернистые фракции песка и глины. Увеличивающаяся во время паводка транспортирующая способность рек в процесс движения вовлекает наносы. При этом многократно увеличивается транспортирующая способность, растет плотность потока срывающего крупнообломочный материал (самоотмокку).

Высокое содержание твердой фазы обеспечивается скоростью и мощностью потока, которые меняются циклично. При снижении скорости в зонах аккумуляции поток освобождается от наносов. Зона отложения (аккумуляции селя) формируется в расширении (межгорной котловине) и обычно характеризуется уклонами менее 20 %.

Эффективность процесса аккумуляции зависит от транспортирующей способности реки и при ее снижении, зона отложения может формироваться при уклоне 100–150 ‰ [6]. Транспортирующая способность реки меняется от паводковой ситуации и, в свою очередь, зависит от профиля реки.

На рис. 1 и в таблице представлены продольный профиль и параметры русла р. Баксан. Несмотря на значительные средние значения перепадов высотных отметок, даже в верхнем течении реки наблюдается наличие локальных участков межгорной котловины с относительно небольшими уклонами, характерными для зон отложения селя, как например, при слиянии р. Адыл Су.



1 – с. Терскол; 2 – с. Тегенекли; 3 – с. Эльбрус; 4 – с. В. Баксан; 5 – г. Тырнауз; 6 – с. Былым; 7 – с. Бедик; 8 – с. Жанхотеко; 9 – с. Атажукино; 10 – с. Исламей; 11 – с. Дугулугбей; 12 – г. Баксан; 13 – с. Кишпек; 14 – г. Прохладный

Рис. 1. Продольный профиль русла р. Баксан

Таблица

Параметры продольного профиля русла р. Баксан

Населенные пункты	Перепад высот, м	Расстояние, км	Продольный уклон, ‰
с. Терскол – с. Эльбрус	302	18	16,8
с. Эльбрус – с. Верхний Баксан	185	10	18,5
с. Верхний Баксан – г. Тырнауз	283	12	23,5
г. Тырнауз – с. Былым	272	16	17,0
с. Былым – с. Бедик	75	11	6,8
с. Бедик – с. Жанхотеко	100	8	12,5
с. Жанхотеко – с. Атажукино	220	19	11,6
с. Атажукино – с. Исламей	82	6	13,7
с. Исламей – с. Дугулугбей	36	6	6,0
с. Дулугбей – г. Баксан	15	2	7,5
г. Баксан – с. Кишпек	60	7	8,6
с. Кишпек – г. Прохладный	213	36	5,9

В публикациях ряда исследователей отмечаются общие особенности переходных зон от гор к равнинам горных рек Северного Кавказа [7–9].

Процесс переноса наносов в руслах рек горных регионов довольно хорошо изучен у нас в стране и за рубежом [10–14]. Хорошо изучены закономерности изменения русла за счет размыва одних берегов и намыва противоположных, когда намываются выпуклые берега [15–18]. Данные процессы отчетливо проявляются на фоне таяния ледников, когда растет плотность потока, срывающего крупнообломочный материал. В течение паводкового периода, который продолжается около трех месяцев, наблюдаются циклический рост транспортирующей способности горных рек. Сотни тысяч тонн крупнообломочного материала ежегодно перемещаются рекой вниз по течению [6, 7, 10–19] и перекрывают русло реки в предгорной части, вызывая чрезвычайную паводковую ситуацию, требующую очистки русла с применением тяжелой строительной техники. Применяемая технология эксплуатации ресурсов пойм нагорных рек с вынужденным широким использованием режима чрезвычайных ситуаций, руслорегулировочных работ для ликвидации паводков имеет отрицательные экономические и экологические последствия. Кроме значительных материальных затрат река загрязняется горюче-смазочными веществами от использования тяжелой строительной техники и бытовым мусором.

Для решения данной проблемы предлагается технология, направленная на предотвращение чрезвычайных ситуаций, вызываемых селями, путем создания зон аккумуляции валунно-гравийной части твердых стоков и добычей из них строительных материалов [20–22]. В результате графоаналитических исследований данных космической съемки, анализа объемов перемещаемых намывных отложений, учета продольного профиля и размеров поймы реки, обосновано положение зоны фильтрации и аккумуляции твердых стоков. Для выбранного положения зоны фильтрации с использованием методов математической статистики определены годовые величины среднего стока и коэффициент выхода гравийно-валунной составляющей.

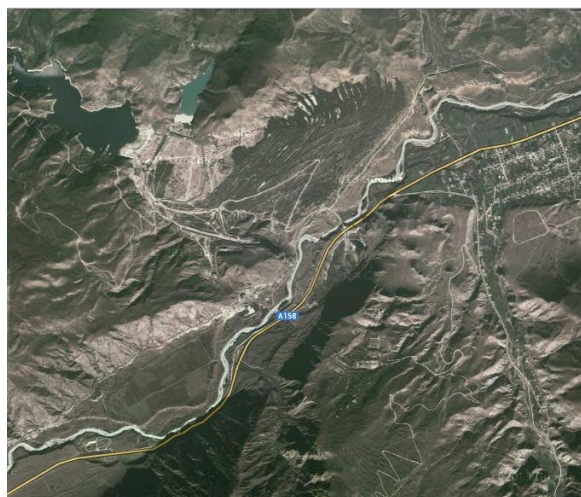


Рис. 2. Космическая съемка участка р. Баксан в районе хвостохранилища с. Былым

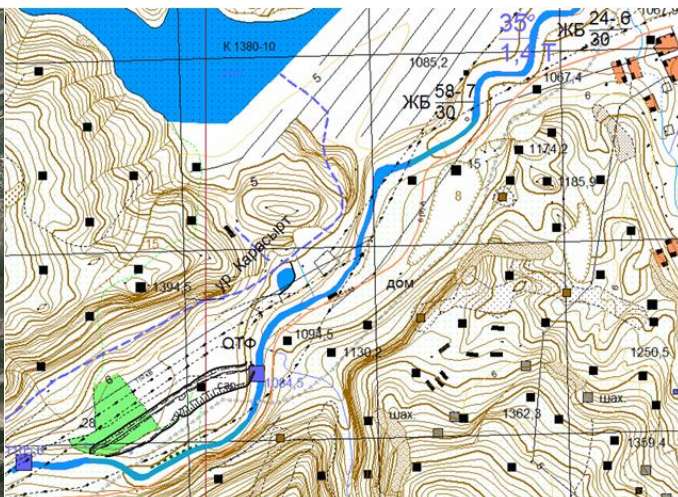


Рис. 3. Схема зоны фильтрации перемещаемого рекой материала

По параметрам размеров русла и продольного профиля, рациональным для выбора положения зоны фильтрации, является участок р. Баксан выше хвостохранилища с. Былым, представленный на рис. 2 в виде фрагмента космической съемки. Кроме того, как видно из рис. 3, изгиб реки на данном участке, существенно уменьшает объемы горных работ по формированию зоны фильтрации.

Выработанное пространство зоны фильтрации для многократного использования имеет бетонные конструкции берм на сваях, защищающих сооружение и коммуникации от размыва.

Конструктивно пойма реки делится на две части. На одной части под защитой бермы осуществляется водосток [20–22]. Во второй части поймы реки в допаводковый период формируют выработанное пространство.

В паводковый период осуществляется заполнение выработанного пространства намывными отложениями. Направление намыва регулируется углом наклона траншеи к выработанному пространству.

В процессе намыва уточняют ожидаемые показатели качественного состава намываемых объемов:

- объем горной массы в выработанном пространстве;
- выход валунно-гравийной части и ее локализация в выработанном пространстве;
- содержание в валунно-гравийной части горной массы прочных изверженных (интрузивных, эффузивных), метаморфизованных горных пород, представляющих повышенную практическую ценность.

В послепаводковый период сток реки перенаправляется в обводной водосток мимо заполненного намывными отложениями пространства зоны фильтрации. Только после схода воды начинается отработка намытого гравийно-валунного материала. После завершения горных работ сформированное выработанное пространство проходит очистку перед следующим паводковым периодом. Это исключает загрязнение русла реки.

Максимальные возможности одной зоны фильтрации составляют порядка 300 тыс. м³ или 750 тыс. т горной массы. Средние объемы горных работ по единичным зонам фильтрации достигают до 300 тыс. т горной массы в год. Для обеспечения рентабельной работы предлагается использовать современное мобильное оборудование циклично-поточной технологии. Оборудование быстрого разворачивания, адаптированное для работы в комплексе с мобильными гидравлическими экскаваторами и погрузчиками, будет обслуживать несколько зон фильтрации твердого стока.

В ходе исследований особое внимание уделено техногенным селеобразованиям из карьерных отвалов в бассейнах рек Большой и Малый Мукулан.

Отсыпка вскрышных пород с борта Высотного карьера и с юго-западного борта Мукуланского карьера разделенных по высоте примерно на 600 м осуществлялась в Большую Мукуланскую балку. Отсыпка вскрышных пород с восточного борта Мукуланского карьера велась в балку Малый Мукулан.

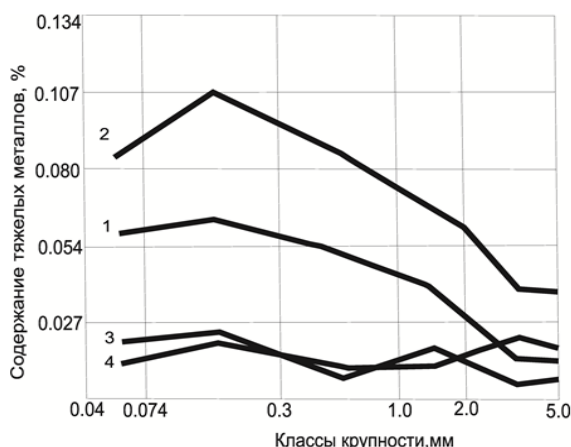


Рис. 4. Распределение тяжелых металлов по фракциям горной массы отвалов Малой Мукуланской балки:

1 и 2 – соответственно распределение МО по классам крупности в пробах 10 и 11;

3 и 4 – соответственно распределение Wo3 по классам крупности в пробах 10 и 11

В отличие от Большой Мукуланской балки, куда складировано более 168 млн м³ вскрышных пород, в Малую Мукуланскую балку складировано менее 7 млн м³, но она (на текущий момент времени) из-за наличия конуса селевого выброса в пойму р. Баксан представляет большую экологическую угрозу. Значительная часть пород, складированных в Малой Мукуланской балке, представлена биотитовыми роговиками и гранитоидами. Средняя часть балки из-за сегрегации при перепуске горной массы заполнена преимущественно мелкими классами крупности. Как показали исследования, содержание молибдена из-за скопления мелких классов более в три раза превышает среднее значение по горной массе (рис. 3). Это представляет дополнительную угрозу загрязнения при селевом выбросе.

В тоже время складированная в отвалы карьеров Тырнаузского вольфрамомолибденового комбината (ВМК) горная масса представляет собой ценное техногенное шеелит и молибден содержащее минеральное сырье и сырье для производства строительных материалов. В отвалы складировались значительные объемы попутно отрабатываемых типов руд, которые не могли эффективно перерабатываться существовавшей в то время технологией обогащения. Так, с борта Высотного карьера на высоте около 2 850 м складировались попутно отрабатываемые скарнированные мраморы, отличавшиеся промышленным содержанием WO₃ и MO. Данный тип руд применявшаяся в то время технология переработки не использовала из-за повышенного содержания кальцитов. В ходе более ранних и настоящих исследований авторов обоснована целесообразность отработки пород с использованием предварительной RGB – кусковой сортировки для разделения отличающихся по RGB признакам скарнов и мрамора.

В Большую Мукуланскую балку ниже горизонта 2 610 м засыпано около 119,8 млн м³ горной массы, значительная часть которой представлена биотитовыми роговиками и гранитоидами. Молибденовые руды с промышленным содержанием молибдена существовавшей технологией отдельно не перерабатывались, лишь шихтовались в определенных пропорциях со скарновыми, шеелитсодержащими рудами, вскрытие которых требовало опережающей отработки рудных биотитовых роговиков и гранитоидов. Поэтому значительные объемы биотитовых роговиков и гранитоидов с промышленным содержанием молибдена были складированы в Большую Мукуланскую балку, средняя часть которой заполнена преимущественно мелкими классами крупности, выделенными за счет сегрегации при перепуске горной массы. Содержание молибдена из-за скопления мелких классов в этой части отвала более чем в два раза превышает среднее значение по горной массе.

Результаты исследования и их обсуждение

При создании экологически безопасной технологии открытой разработки минерального сырья для пойм нагорных рек реализован системный подход, направленный на предотвращение чрезвычайных ситуаций, вызываемых селями природного происхождения, путем создания аккумуляционных зон и добычей из них строительных материалов.

Валунная составляющая твердого стока составляет от 13–19 %, гравийная – до 24–32 %, мелкозернистые фракции песка и глины – до 63 %. Наиболее ценной в плане полезного использования является валунная составляющая твердого стока, представленная изверженными породами в виде гранитов, диоритов, порфиров и кварцевых порфиров. Гравийная составляющая твердого стока может включать до 35 % осадочных пород снижающих их ценность для полезного использования.

Мелкозернистые фракции песка и глины в основном зоной фильтрации не задерживаются. Для селей природного происхождения этот фактор можно рассматривать как положительный решающий безопасную транспортировку вниз по течению более половины селевой массы без риска образования чрезвычайных паводковых ситуаций. При этом валунная и гравийная часть может быть по завершению паводкового сезона переработана и реализована в виде широко востребованных строительных материалов.

Технологический цикл функционирования зон фильтрации предполагает операции направленные на исключение загрязнения русла реки нефтепродуктами:

- начало отработки намывного гравийно-валунного материала только после схода воды;
- обязательная очистка выработанного пространства перед следующим паводковым периодом.

Важной положительной технологической особенностью аккумуляционных зон при работе со стоками селевых потоков природного происхождения является фильтрация валунной и гравийной составляющих твердого стока, когда мелкозернистые фракции песка и глины, зоной фильтрации не задерживаются. Таким образом, решается проблема предотвращения чрезвычайных паводковых ситуаций. Технологический цикл функционирования зон аккумуляции (фильтрации) предполагает переработку и реализацию в виде строительных материалов ценной в плане полезного использования валунно-гравийной составляющей и включает операции направленные на исключение загрязнения русла реки нефтепродуктами.

Нарастающая последние годы селевая активность в бассейнах рек Малый и Большой Мукулан повышает вероятность сброса в реку Баксан горной массы, содержащей продукты выщелачивания рудных минералов вольфрама и молибдена, представляющих повышенную угрозу для экологии.

В результате графоаналитического анализа данных космической съемки установлено, что в отличие от Большой Мукуланской балки, Малая Мукуланская балка на текущий момент времени представляет большую экологическую угрозу. Значительная часть пород складированных в Малой Мукуланской балке представлена биотитовыми роговиками и гранитоидами. Как показали исследования, средняя часть балки из-за сегрегации при перепуске горной массы заполнена преимущественно мелкими классами крупности (-5 мм), склонными к селеобразованию при водонасыщении. Содержание молибдена из-за скопления мелких классов более чем в три раза превышает среднее значение по горной массе. Учитывая, что мелкозернистые фракции зоной фильтрации не задерживаются, то техногенные селевые сбросы несут угрозу чрезвычайных ситуаций загрязнения территорий. Для предотвращения этих угроз необходимо проведение опережающих мероприятий на потенциально опасных участках отвалов. После восстановления эксплуатации Тырныаузского месторождения целесообразна отработка части отвалов с извлечением ценных рудных, нерудных компонентов и вмещающих пород. Вмещающие породы могут использоваться для производства стройматериалов или для закладки выработанного пространства подземного рудника.

Заключение

Предлагается технология, направленная на предотвращение чрезвычайных ситуаций, вызываемых селями, путем создания зон аккумуляции валунно-гравийной части твердых стоков и добычей из них строительных материалов. Положительный эффект от производства строительных материалов увеличивают мероприятия направленные на исключение загрязнения русла реки нефтепродуктами. Разработанная технология позволяет за счет возобновляемых месторождений инертных строительных материалов частично закрывать их потребности при строительстве объектов, сооружений и коммуникаций. Кроме того, предложения по отработке высокогорных отвалов и полезному использованию техногенного минерального сырья позволят исключить чрезвычайные паводковые ситуации и загрязнение территорий связанные с техногенным селеобразованием.

Список источников

1. Хаширова Т.Ю. Исследование переноса наносов и распределение мутности в потоке для охраны предгорных агроландшафтов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. Специальный выпуск. 2008. № 13. С. 113–118.

2. Хаджиев М.М. Оценка селевой опасности района г. Тырнауза: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Нальчик: ВГИ, 2005. 17 с.
3. Хаустов В.В. О миграции рудных элементов в подземных и поверхностных водах (на примере одного из скарновых месторождений Северного Кавказа) // Вестник Ленинградского ун-та. Сер. 7: Геология, география. 1988. Вып. 2. № 14. С. 78–79.
4. Хаустов В.В. Формирование подземных вод района вольфрам-молибденового месторождения Тырнауз и вопросы охраны бассейна реки Баксан от загрязнения: автореф. дис. ... канд. геолого-минералогических наук. Л., 1990. 22 с.
5. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. Тбилиси: Сабизта сакартвело, 1970. 386 с.
6. Кузнецов К.Л., Чалов Р.С. Русловые процессы и морфология русел горных рек в условиях активной селевой деятельности (на примере рек северного склона Заилийского Алатау) // Геоморфология. 1988. № 2.
7. Русловые процессы на реках зон перехода от гор к равнинам и их регулирование / К. Кшемь [и др.] // Эрозионные и русловые процессы. М.: МГУ, 2005. Вып. 4.
8. Чалов Р.С. Горные реки и реки в горах: продольный профиль, морфология и динамика русел // Геоморфология. 2002. № 3.
9. Гидрология устьев рек Терека и Сулака. М.: Наука, 1993.
10. A comparison of coarse bedload transport measured with bedload traps and Helley-Smith Samplers / K. Bunte [et al.] // Geodinamica Acta. 2008. № 21. P. 53–66.
11. Montgomery D.R., Buffington J.M. Channel-reach morphology in mountain drainage basins // GSA Bulletin. 1997. № 109 (5). P. 596–611.
12. Ryan S.E., Bunte K., Potyondy J.P. Breakout session II, Bedload-transport measurement: Data needs, uncertainty, and new technologies. Smart G.M., Habersack H.M. Pressure fluctuations and gravel entrainment in rivers // Journal of Hydraulic Research. 2007. № 45:5. P. 661–673.
13. Bed load transport under different streambed conditions – a field experiment study in a mountain stream / G.A. Yu [et al.] // International Journal of Sediment Research. 2012. № 27. P. 426–438.
14. Wang Zh., Lee Joseph H.W., Melching S. River Dynamics and Integrated River Management // Springer and Tsinghua Publisher. 2014.
15. Беркович К.М., Злотина Л.В., Турыкин Л.А. Природно-ориентированные подходы к добыче аллювиальных строительных материалов из речных русел и пойм // Вестник Удмуртского университета. 2012. Вып. 3. С. 3–12.
16. Морфология русел и современный русловой аллювий на горных реках Западного Тянь-Шаня / О.А. Борсук [и др.] // Геоморфология. 1981. № 1.
17. Коннов В.И. Методология оценки экологического состояния малых рек и их защиты от влияния горного производства (на примере Восточного Забайкалья): автореф. дис... д-ра техн. наук. М., 2008.
18. Копалиани З.Д., Твалавадзе О.А., Носелидзе Л.В. Гидравлическое моделирование руслового процесса предгорного участка р. Аносовки на мостовом переходе // Вопросы гидравлики и руслового процесса горных рек. 1992. Вып. 3. С. 88–106.
19. Беркович К.М. Русловые процессы и русловые карьеры. М.: МГУ, 2005.
20. Карпова Ж.В. Проектирование и технология экологически безопасной эксплуатации ресурсов пойм нагорных рек // Вестник ЗабГУ. 2015. № 2 (117). С. 21–25.
21. Карпова Ж.В. Совершенствование экологически безопасной технологии открытой разработки минерального сырья в поймах нагорных рек: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: ЮРГПУ, 2019. 22 с.
22. Способ добычи инертных материалов: пат. Рос. Федерации № 2 476673 / Хакулов В.А., Секисов А.Г., Игнатов В.Н., Боровков Ю.А., Хакулова Ж.В., Ксенофонов А.С.; Бюл. И. 2013. № 6.

References

1. Hashirova T.Yu. Issledovanie perenosa nanosov i raspredelenie mutnosti v potoke dlya ohrany predgornyyh agrolandshaftov // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Special'nyy vypusk. 2008. № 13. S. 113–118.
2. Hadzhiev M.M. Ocenka selevoj opasnosti rajona g. Tyrnyauza: avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. Nal'chik: VGI, 2005. 17 s.
3. Haustov V.V. O migracii rudnyh elementov v podzemnyh i poverhnostnyh vodah (na primere odnogo iz skarnovyh mestorozhdenij Severnogo Kavkaza) // Vestnik Leningradskogo un-ta. Ser. 7: Geologiya, geografiya. 1988. Vyp. 2. № 14. S. 78–79.
4. Haustov V.V. Formirovanie podzemnyh vod rajona vol'fram-molibdenovogo mestorozhdeniya Tyrnyauz i voprosy ohrany bassejna reki Baksan ot zagryazneniya: avtoref. dis. ... kand. geologo-mineralogicheskikh nauk. L., 1990. 22 s.
5. Gagoshidze M.S. Selevye yavleniya i bor'ba s nimi. Tbilisi: Sabieta sakartvelo, 1970. 386 s.
6. Kuznecov K.L., Chalov R.S. Ruslovye processy i morfologiya rusel gornyyh rek v usloviyah aktivnoj selevoj deyatel'nosti (na primere rek severnogo sklona Zailijskogo Alatau) // Geomorfologiya. 1988. № 2.
7. Ruslovye processy na rekah zon perekhoda ot gor k ravninam i ih regulirovanie / K. Kshemen' [i dr.] // Erozionnye i ruslovye processy. M.: MGU, 2005. Vyp. 4.
8. Chalov R.S. Gornyye reki i reki v gorah: prodol'nyy profil', morfologiya i dinamika rusel // Geomorfologiya. 2002. № 3.
9. Gidrologiya ust'ev rek Tereka i Sulaka. M.: Nauka, 1993.
10. A comparison of coarse bedload transport measured with bedload traps and Helley-Smith Samplers / K. Bunte [et al.] // Geodinamica Acta. 2008. № 21. P. 53–66.
11. Montgomery D.R., Buffington J.M. Channel-reach morphology in mountain drainage basins // GSA Bulletin. 1997. № 109 (5). P. 596–611.
12. Ryan S.E., Bunte K., Potyondy J.P. Breakout session II, Bedload-transport measurement: Data needs, uncertainty, and new technologies. Smart G.M., Habersack H.M. Pressure fluctuations and gravel entrainment in rivers // Journal of Hydraulic Research. 2007. № 45:5. P. 661–673.
13. Bed load transport under different streambed conditions – a field experiment study in a mountain stream / G.A. Yu [et al.] // International Journal of Sediment Research. 2012. № 27. P. 426–438.
14. Wang Zh., Lee Joseph H.W., Melching S. River Dynamics and Integrated River Management // Springer and Tsinghua Publisher. 2014.
15. Berkovich K.M., Zlotina L.V., Turykin L.A. Prirodno-orientirovannyye podhody k dobyche allyuvial'nyh stroitel'nyh materialov iz rechnyyh rusel i pojm // Vestnik Udmurtskogo universiteta. 2012. Vyp. 3. S. 3–12.
16. Morfologiya rusel i sovremennyy ruslovoj allyuvij na gornyyh rekah Zapadnogo Tyan'-Shanya / O.A. Borsuk [i dr.] // Geomorfologiya. 1981. № 1.
17. Konnov V.I. Metodologiya ocenki ekologicheskogo sostoyaniya malyyh rek i ih zashchity ot vliyaniya gornogo proizvodstva (na primere Vostochnogo Zabajkal'ya): avtoref. dis... d-ra tekhn. nauk. M., 2008.
18. Kopaliani Z.D., Tvalavadze O.A., Noselidze L.V. Gidravlichesкое modelirovanie ruslovogo processa predgornogo uchastka r. Anosovki na mostovom perekhode // Voprosy gidravliki i ruslovogo processa gornyyh rek. 1992. Vyp. 3. S. 88–106.
19. Berkovich K.M. Ruslovye processy i ruslovye kar'ery. M.: MGU, 2005.
20. Karpova Zh.V. Proektirovanie i tekhnologiya ekologicheskoy bezopasnoy ekspluatatsii resursov pojm nagornyyh rek // Vestnik ZabGU. 2015. № 2 (117). S. 21–25.
21. Karpova Zh.V. Sovershenstvovanie ekologicheskoy bezopasnoy tekhnologii otkrytoy razrabotki mineral'nogo syr'ya v pojmah nagornyyh rek: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Novocherkassk: YURGPU, 2019. 22 s.

22. Sposob dobychi inertnykh materialov: pat. Ros. Federacii № 2 476673 / Hakulov V.A., Sekisov A.G., Ignatov V.N., Borovkov Yu.A., Hakulova Zh.V., Ksenofontov A.S.; Byul. I. 2013. № 6.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 10.11.2025; одобрена после рецензирования: 23.02.2026;
принята к публикации: 24.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 10.11.2025; approved after review: 23.02.2026;
accepted for publication: 24.04.2026

Информация об авторах:

Карпова Жанна Викторовна, инженер ООО «Научно-исследовательский и проектный институт» «Недра» (346421, г. Новочеркасск, Ростовской обл., пр. Баклановский, д. 182, к. 9), кандидат технических наук, e-mail: z.karpovaspb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9664-5863>

Яхеев Валерий Васильевич, доцент кафедры горноспасательного дела и взрывобезопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, e-mail: yakvaleri@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6822-5108>, SPIN-код: 7607-9304

Актерский Юрий Евгеньевич, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор военных наук, профессор, e-mail: aue2002@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5767-7462>, SPIN-код: 7387-1442

Information about the authors:

Karpova Zhanna V., engineer at scientific research and design institute «Nedra» (346421, Novocherkassk, Rostov region, Baklanovsky ave., 182, room 9), candidate of technical sciences, e-mail: z.karpovaspb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9664-5863>

Yakheev Valery V., associate professor of the department of mining rescue operations and explosion safety of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: yakvaleri@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6822-5108>, SPIN: 7607-9304

Akterskiy Yuriy E., professor of the department of fire safety of buildings and automated fire extinguishing systems of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of military sciences, professor, e-mail: aue2002@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5767-7462>, SPIN: 7387-1442

Научная статья

УДК 614.84; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-102-111

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОГО ПЕНОГЕНЕРАТОРА С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Хафизов Ильдар Фанилевич;

Попова Елена Викторовна;

✉ Сафаргалин Айдар Расихович.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

✉ playtostory@gmail.com

Аннотация. Разработана конструкция модульного пеногенератора с регулируемой геометрией диспергирующих элементов. Экспериментально установлена оптимальная ромбовидная конфигурация из шести элементов, демонстрирующая рекордный прирост высоты пенного столба – 225 % относительно контрольных образцов. Полученные данные обосновывают перспективность технологии для целенаправленной адаптации ключевых эксплуатационных характеристик пены.

Целью исследования являлось создание модульного пеногенератора с регулируемыми параметрами, способного адаптировать характеристики огнетушащей пены к конкретным условиям пожара и заменить устаревшие стационарные конструкции. Для получения результатов исследования применялся комплексный экспериментальный подход с использованием методов 3D-прототипирования и стандартизированных испытаний.

Полученные данные в ходе исследования демонстрируют рекордное увеличение высоты пенного столба на 225 % при использовании оптимальной ромбовидной конфигурации из шести диспергирующих элементов. Проведенные исследования открывают широкие перспективы для внедрения разработанного пеногенератора в системах пожаротушения резервуарных парков и других объектов с повышенной пожарной опасностью, способствуя повышению эффективности тушения горючих жидкостей и обеспечению промышленной безопасности.

Ключевые слова: пеногенератор, кратность пены, пожаротушение, горючие жидкости, модульная конструкция, 3D-печать, диспергирующие элементы

Для цитирования: Хафизов И.Ф., Попова Е.В., Сафаргалин А.Р. Разработка модульного пеногенератора с регулируемыми параметрами // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 102–111. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-102-111

Scientific article

**DEVELOPMENT OF A MODULAR FOAM GENERATOR
WITH ADJUSTABLE PARAMETERS****Hafizov Ildar F.;****Popova Elena V.;****✉Safargalin Aidar R.****Ufa state petroleum technological university, Ufa, Russia****✉playtostory@gmail.com**

Abstract. The design of a modular foam generator with an adjustable geometry of dispersing elements has been developed. An optimal diamond-shaped configuration of six elements has been experimentally established, demonstrating a record increase in the height of the foam column by 225 % relative to the control samples. The data obtained substantiate the prospects of the technology for purposefully adapting the key performance characteristics of foam when extinguishing various classes of flammable liquids.

The aim of the study was to create a modular foam generator with adjustable parameters, capable of adapting the characteristics of fire extinguishing foam to specific fire conditions and replacing outdated stationary structures. To obtain the results of the study, a comprehensive experimental approach was applied using 3D-prototyping and standardized testing methods.

The data obtained during the study demonstrate a record increase in the height of the foam column by 225 % when using the optimal diamond-shaped configuration of six dispersing elements. The conducted research opens up broad prospects for the implementation of the developed foam generator in fire extinguishing systems of tank farms and other facilities with increased fire risk, contributing to an increase in the efficiency of extinguishing flammable liquids and ensuring industrial safety.

Keywords: foam generator, foam ratio, fire extinguishing, flammable liquids, modular design, 3D-printing, dispersing elements

For citation: Hafizov I.F., Popova E.V., Safargalin A.R. Development of a modular foam generator with adjustable parameters // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 102–111. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-102-111

Введение

Современные системы пожаротушения требуют оптимизации параметров огнетушащей пены в зависимости от конкретных условий пожара [1, 2]. Как отмечено в фундаментальных работах, ключевыми эксплуатационными характеристиками пены, определяющими эффективность тушения, являются ее кратность и стабильность [3]. Существующие пеногенераторы стационарной конструкции не всегда позволяют оперативно регулировать дисперсность и кратность пены, что приводит к снижению эффективности тушения [4]. Жесткость конструкции таких генераторов делает их непригодными для быстро меняющейся обстановки на пожаре, когда тип горящего вещества, площадь возгорания и температурный режим диктуют необходимость применения пены с различными реологическими показателями.

Объектом настоящего исследования выступает резервуарный парк, где проблема приобретает особую актуальность при тушении горючих жидкостей, поскольку требования к параметрам пены значительно варьируются в зависимости от физико-химических свойств горящей жидкости [5]. Например, для тушения легковоспламеняющихся жидкостей с низкой температурой вспышки (бензин, эфиры) требуется пена с высокой кратностью и быстрой растекаемостью для создания изолирующего слоя. В то же время для тушения нефти и мазута,

обладающих высокой температурой кипения и склонностью к повторному возгоранию, необходима более стабильная и тяжелая пенная структура с повышенной теплоемкостью. Особенностью тушения различных классов горючих веществ является необходимость применения пены с определенными характеристиками, что обусловлено различиями в скорости горения, температуре вспышки и других параметрах.

Актуальность разработки модульного пеногенератора обусловлена возможностью замены парка устаревших стационарных генераторов на меньшее количество универсальных модульных устройств. Под универсальностью понимается использование одного базового корпуса со сменными кассетами для получения пены с различными характеристиками (кратностью, дисперсностью) в зависимости от условий пожара. Существующие пеногенераторы, применяемые для тушения горючих жидкостей, можно разделить на несколько типов по принципу действия: сетчатые, турбинные, спиральные, перегородочные, эжекторные. Сетчатые генераторы наиболее широко используются в системах пожаротушения ограниченных пространств благодаря высокой кратности пены и простоте конструкции. Однако большинство известных решений (как отечественных, так и зарубежных) не обеспечивают оперативной регулировки параметров пены в зависимости от класса горючего вещества, что снижает их эффективность при тушении различных горючих жидкостей. В зарубежных исследованиях, в частности в работе [6], были детально изучены влияние количества и типа сеток, геометрии выпрямителя потока, расстояния между соплом и сеткой на кратность, дальность струи и толщину слоя пены. Тем не менее влияние ромбовидной конфигурации сетчатых элементов в модульном исполнении с возможностью быстрой замены кассет оставалось неизученным, что и определило направление настоящей работы. В отличие от известных работ, в которых изучались преимущественно квадратные и прямоугольные сетки с фиксированным расположением, в данной работе впервые системно исследовано влияние ромбовидной конфигурации последовательно расположенных сетчатых элементов в едином модульном корпусе на высоту пенного столба. Установлены оптимальные параметры (ромбовидная сетка, 6 слоёв, размер ячейки 2 мм), обеспечивающие прирост высоты пены на 225 % по сравнению с квадратной сеткой. Полученные данные дополняют результаты зарубежных исследований, в которых основное внимание уделялось кратности и дальности пены, новыми сведениями о влиянии геометрии ячейки на статическую высоту столба.

Научная новизна работы заключается в экспериментальном установлении количественных зависимостей между ключевыми параметрами пены и конструкцией разработанного модульного генератора. Выявлен и объяснен экстремальный характер зависимости эффективности пенообразования от количества диспергирующих элементов. В отличие от известных исследований [6] в данной работе впервые системно исследовано влияние не только геометрии, но и компоновки нескольких последовательно расположенных сетчатых элементов в едином корпусе на конечные характеристики пенного потока. Полученные количественные зависимости создают предпосылки для перехода к более обоснованному расчётному проектированию пеногенерирующих устройств, дополняя существующие эмпирические методы.

Методы исследования

Для исследований влияния зависимости между параметрами и конструкцией ствола применялся водный раствор пенообразователя ПО-6, соответствующий требованиям, предъявляемым к тушению горючих жидкостей. Выбор данного пенообразователя обусловлен его стабильными характеристиками и широким применением в отечественных системах пожаротушения, что обеспечивает сопоставимость результатов с существующими аналогами.

Приготовление рабочего раствора пенообразователя выполнялось в соответствии с рекомендациями [7]. Определение кратности пены в данной работе не проводилось; для сравнения пенообразующей способности различных конфигураций использовалась высота пенного столба при фиксированном объёме раствора.

Для обеспечения статистической достоверности результатов и исключения возникновения случайных погрешностей каждый эксперимент был проделан не менее 3 раз. Такой подход позволил получить усредненные значения, минимизирующие влияние случайных факторов на конечный результат измерений.

Для проведения эксперимента был применен экземпляр модульного ствола, представляющий собой конструкцию с возможностью оперативного изменения конфигурации диспергирующих элементов. Модульная конструкция пеногенератора со сменными сетчатыми кассетами изготовлена методом аддитивных технологий, что обеспечило необходимую точность выполнения геометрических параметров.

Конструкция была разработана в Blender – программном обеспечении, позволяющем создавать сложные трехмерные модели с высокой точностью. Ключевым проектных решением являлась унификация посадочных мест для быстрой оперативной смены кассет с сетчатыми элементами, что обеспечивало возможность оперативного изменения параметров пенообразования в ходе эксперимента.

Для изготовления использовалась технология FDM-печати на 3D-принтере Creality Ender 3. В качестве материала выбран полилактид (PLA). Выбор материала обусловлен его химической стойкостью к растворам пенообразователя, достаточной прочностью и низкой усадкой при печати [6]. Согласно технической документации, предел прочности PLA при растяжении (при 100 % заполнении) составляет 50–60 МПа, что более чем в 100 раз превышает рабочее давление в системе (0,4 МПа). Запас прочности по разрушающему давлению составляет не менее 125 раз. В ходе испытаний лабораторного макета при давлении 0,4 МПа в течение 10 мин конструкция не разрушилась и не деформировалась. Однако PLA подвержен ползучести при длительных статических нагрузках и имеет температуру стеклования около 60 °С, поэтому данная конструкция предназначена только для лабораторных исследований и кратковременных испытаний. Для промышленных образцов, эксплуатируемых в реальных условиях, необходимы материалы с более высокой термостойкостью и устойчивостью к ползучести (ABS, полиамид, металл).



Рис. 1. Экспериментальный пожарный ствол

Задачей эксперимента было проанализировать зависимость геометрии сеток пеногенератора на высоту пенного столба. В качестве насадок применялись сетки ромбовидной, квадратной и прямоугольной конфигурации с размером ячейки 1, 2, 3 мм. Количество сетчатых элементов в кассете варьировалось: 2, 4, 6 и 8 элементов. Такой диапазон вариаций параметров позволил получить репрезентативные данные о влиянии геометрии и количества диспергирующих элементов на процесс пенообразования. Высоту пенного столба измеряли в статическом состоянии через 10 с после прекращения подачи раствора. Измерение проводилось в цилиндрической калиброванной ёмкости диаметром 380 мм и высотой 590 мм, установленной вертикально. После прекращения подачи раствора выдерживалась пауза 10 с для стабилизации пенной структуры. Высота пенного слоя фиксировалась по линейке, закреплённой вертикально на стенке ёмкости, с точностью до 1 мм. Измерение выполнялось в трёх точках по окружности ёмкости (0°, 120°, 240°) для учёта возможной неравномерности поверхности; за итоговое значение принималось среднее арифметическое.



Рис. 2. Контроль подачи раствора пенообразователя прибором измерения давления

Контроль давления на входе в пеногенератор измерялся манометром с одновитковой трубчатой пружиной, класс точности 1.0. По условиям эксперимента данный параметр контроля на входе поддерживался постоянным и составлял 0,4 МПа. Стабилизация давления обеспечивала воспроизводимость условий эксперимента при тестировании различных конфигураций диспергирующих элементов.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведенных испытаний экспериментально установлено существенное влияние количества и типа сетчатых элементов на высоту столба пены, что является одним из ключевых показателей эффективности пожаротушения. Проведенный комплекс экспериментов позволил получить воспроизводимые результаты, подтверждающие наличие выраженной зависимости между геометрическими параметрами диспергирующих элементов и реологическими характеристиками формируемой пенной структуры.

Таблица 1

Зависимость высоты пенного столба от типа и количества сеток

Тип сетки	Количество сеток	Высота пены (см)
Ромбовидная	2	3
	4	4
	6	13
	8	18
Прямоугольная	2	3
	4	4
	6	14
	8	3
Квадратная	2	3
	4	3
	6	4
	8	5

Сравнение полученных данных с результатами зарубежных исследований показывает, что оптимальное количество сетчатых элементов (6) и рекомендуемое расстояние между соплом и сеткой (в нашей конструкции оно соответствует геометрии модульной кассеты) согласуются с выводами, которые установили, что максимальная кратность (42) достигается при двух слоях сетки из 16 ячеек ($\approx 1,2$ мм) и расстоянии 22 см. В нашей работе ромбовидная сетка с ячейкой 2 мм в шестислойном исполнении даёт прирост высоты пены 225 %

относительно квадратной, что свидетельствует о высокой эффективности выбранной геометрии. При этом в отличие от работы [6], где измерялись кратность и дальность струи, в настоящем исследовании акцент сделан на высоте пенного столба, что позволяет оценить пенообразующую способность в статике и облегчить сравнение различных конфигураций на ранних этапах разработки.

Анализ данных табл. 1 показывает сложный нелинейный характер зависимости высоты пенного столба от количества диспергирующих элементов. Наблюдаемые экспериментальные данные демонстрируют различное поведение пенообразующих систем в зависимости от геометрии сеток и их количества в кассете. Полученные значения высоты пенного столба варьируются в широком диапазоне от 3 до 18 см, что свидетельствует о существенном влиянии исследованных параметров на эффективность пенообразования. Следует отметить, что в настоящей работе помимо высоты пенного столба определена устойчивость пены (время дренажа 50 %).



Рис. 3. Внешний вид пены

Визуальная оценка пенной структуры показала, что применение ромбовидной конфигурации сетчатых элементов (6 слоёв, размер ячейки 2 мм) приводит к образованию более высокопористой пены по сравнению с квадратной и прямоугольной сетками. Количественные данные о дисперсном составе (средний диаметр, распределение) будут получены в дальнейшем с использованием микроскопии.

Огневые испытания разработанного пеногенератора также не проводились. Эти характеристики и проверка эффективности при тушении реальных очагов пожара являются предметом дальнейших исследований.

Для выбранной оптимальной конфигурации (ромбовидная сетка, 6 элементов, размер ячейки 2 мм) была определена стойкость пены (время дренажа 50 %) по методике ГОСТ Р 50588–2012 «Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний». Результаты приведены в табл. 2. Исследование стойкости для других конфигураций сеток не проводилось.

Таблица 2

Время разрушения пены (стойкость) – время дренажа 50 % жидкой фазы (t_{50})

Устойчивость пены (время дренажа 50 %), с, не менее	Значение	Норматив (ГОСТ Р 50588–2012), не менее
Низкой кратности	243	160
Средней кратности	349	160
Высокой кратности	163	160

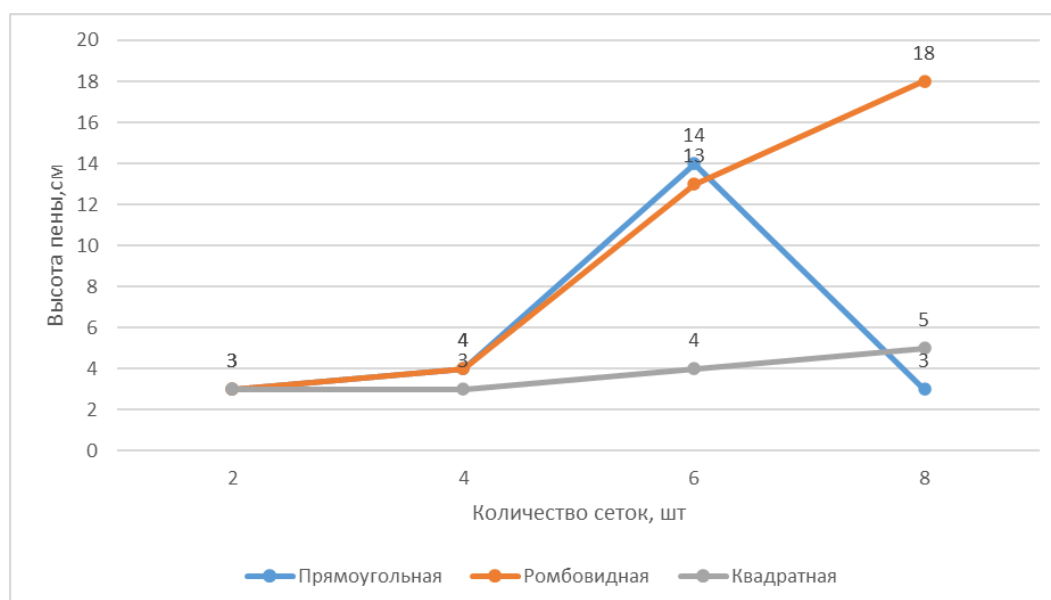


Рис. 3. Сравнительная эффективность различных типов сеток

На рис. 3 представлена сравнительная характеристика эффективности применения пеногенерирующего устройства с различными конфигурациями сеток. Визуальный анализ графиков подтверждает наличие оптимальных зон эффективности для каждого типа сетчатых элементов.

Анализ данных показал, что конфигурация с шестью ромбовидными сетчатыми элементами обеспечивает наиболее стабильные и воспроизводимые результаты формирования пенной структуры. При использовании шести ромбовидных сеток высота пены составила 13 см, что на 225 % выше, чем у квадратной (4 см). Прямоугольная сетка с шестью элементами показала близкое значение (14 см), однако при восьми элементах её эффективность резко падает до 3 см, тогда как ромбовидная продолжает расти до 18 см, демонстрируя преимущество ромбовидной сетки. Полученные численные значения демонстрируют значительный потенциал оптимизации параметров пеногенерирующих устройств.

Наблюдаемый рост эффективности при увеличении числа сеток с 2 до 6 связан с более эффективным диспергированием воздушного потока и многократным дроблением пузырей, что приводит к формированию более однородной мелкопористой структуры [9, 10]. Механизм многократного диспергирования потока через последовательно расположенные сетчатые элементы создает условия для формирования устойчивой пенной структуры с улучшенными характеристиками.

Следует отметить, что дальнейшее увеличение количества сеток до 8 для прямоугольной конфигурации приводит к резкому падению высоты пены. Это объясняется чрезмерным ростом гидравлического сопротивления и нарушением оптимального режима течения газа и жидкости [11]. Наблюдаемый эффект демонстрирует важность соблюдения баланса между количеством диспергирующих элементов и создаваемым ими гидравлическим сопротивлением.

Преимущество ромбовидной сетки перед квадратной и прямоугольной может быть обусловлено особенностями создания турбулентности в потоке, способствующей более интенсивному пенообразованию без быстрого разрушения пенной структуры [12]. Геометрические особенности ромбовидных ячеек создают более благоприятные условия для формирования и стабилизации пенных пузырей по сравнению с другими исследованными конфигурациями.

Заключение

Разработанная конструкция модульного лабораторного пеногенератора позволила оперативно изменять параметры диспергирующего блока, что подтвердило принципиальную осуществимость концепции регулируемого пожаротушения. Проведенные эксперименты не только продемонстрировали работоспособность устройства, но и позволили получить количественные зависимости, являющиеся основой для инженерного расчета подобных систем.

Экспериментально установлено, что высота пенного столба зависит от количества сеток, причём наблюдается чётко выраженный максимум при 6 элементах для ромбовидной и прямоугольной конфигураций. Выявлено, что ромбовидная сетка с размером ячейки 2 мм является оптимальной, обеспечивая на ~225 % большую высоту столба пены по сравнению с квадратной сеткой при том же количестве сеток. Было обнаружено и объяснено явление резкого снижения эффективности при превышении оптимального количества диспергирующих элементов (8 сеток для прямоугольной конфигурации), что связано с ростом гидравлических потерь.

Показана принципиальная возможность оперативной адаптации параметров пены путем смены конфигурации пеногенерирующего устройства. Это открывает путь к созданию гибких систем пожаротушения, где в зависимости от требуемых характеристик пены может быть выбрана соответствующая кассета с диспергирующими элементами.

Список источников

1. Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Зайцев А.В. Пенное пожаротушение: новые возможности // Пожарная безопасность. 2021. Т. 120. С. 103020. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103020
2. Урал Э.А. Обзор систем пенного тушения пожаров горючих жидкостей // Прогресс в области безопасности процессов. 2018. Т. 37. Вып. 1. С. 56–67. DOI: 10.1002/prs.11901
3. Heskestad G., Sutula R. Foam Agents and AFFF System Design // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th Edition. N.Y.: Springer, 2016. P. 1124–1164.
4. Молина Ф.Т., Эспиноса Ф.П., Муньос Ф.Б. Экспериментальное исследование распространения и тушения пены при горении жидкостей // Профилактика потерь в технологических процессах. 2020. Т. 66. С. 104187. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104187
5. Перссон Б., Лённермарк А. Пена как средство тушения пожаров горючих жидкостей // Проект Брандфорск. 2019. С. 1–48.
6. Study on the foam production characteristics of air self-suction foam generator by jet / C. Lu [et al.] // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4804887/v1
7. Хафизов И.Ф. Современные средства и технологии пожаротушения. М.: Стройиздат, 2018. 256 с.
8. Перспективные огнетушащие составы и технологии пожаротушения: сб. науч. тр. / под ред. А.М. Батаева. М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. 210 с.
9. Кошмаров Ю.А., Молчанов А.В. Исследование кратности и стойкости огнетушащих пен на основе новых пенообразователей // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 4. С. 45–53. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.04.45-53
10. Гончарук В.М., Андрианов А.П. Современные тенденции развития пожарной техники для тушения нефтепродуктов // Вестник Казанского технологического университета. 2019. Т. 12. № 2. С. 112–115.
11. Смирнов Н.Н., Бариев Р.Ш., Нигматулин Р.И. О гидродинамике пенного потока при тушении пожаров // Доклады Академии наук. 2021. Т. 496. № 1. С. 56–61. DOI: 10.31857/S2686743721010156

12. Артемьев В.Б., Грабовский А.С. Модульный принцип построения технических средств пожаротушения // Технологии техносферной безопасности. 2018. Вып. 2 (78). С. 23–29.

References

1. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Zajcev A.V. Pennoe pozharotushenie: novye vozmozhnosti // Pozharnaya bezopasnost'. 2021. T. 120. S. 103020. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103020
2. Ural E.A. Obzor sistem pennogo tusheniya pozharov goryuchih zhidkostej // Progress v oblasti bezopasnosti processov. 2018. T. 37. Vyp. 1. S. 56–67. DOI: 10.1002/prs.11901
3. Heskestad G., Sutula R. Foam Agents and AFFF System Design // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th Edition. N.Y.: Springer, 2016. P. 1124–1164.
4. Molina F.T., Espinosa F.P., Mun'os F.B. Eksperimental'noe issledovanie rasprostraneniya i tusheniya peny pri gorenii zhidkostej // Profilaktika poter' v tekhnologicheskikh processah. 2020. T. 66. S. 104187. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104187
5. Persson B., Lyonnermark A. Pena kak sredstvo tusheniya pozharov goryuchih zhidkostej // Proekt Brandforsk. 2019. S. 1–48.
6. Study on the foam production characteristics of air self-suction foam generator by jet / C. Lu [et al.] // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4804887/v1
7. Hafizov I.F. Sovremennye sredstva i tekhnologii pozharotusheniya. M.: Strojizdat, 2018. 256 s.
8. Perspektivnye ognетushashchie sostavy i tekhnologii pozharotusheniya: sb. nauch. tr. / pod red. A.M. Bataeva. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2019. 210 s.
9. Koshmarov Yu.A., Molchanov A.V. Issledovanie kratnosti i stojkosti ognетushashchih pen na osnove novyh penoobrazovatelej // Pozharovzryvbezopasnost'. 2020. T. 29. № 4. S. 45–53. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.04.45-53
10. Goncharuk V.M., Andrianov A.P. Sovremennye tendencii razvitiya pozharnej tekhniki dlya tusheniya nefteproduktov // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2019. T. 12. № 2. S. 112–115.
11. Smirnov N.N., Bariev R.Sh., Nigmatulin R.I. O gidrodinamike pennogo potoka pri tushenii pozharov // Doklady Akademii nauk. 2021. T. 496. № 1. S. 56–61. DOI: 10.31857/S2686743721010156
12. Artem'ev V.B., Grabovskij A.S. Modul'nyj princip postroeniya tekhnicheskikh sredstv pozharotusheniya // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2018. Vyp. 2 (78). S. 23–29.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 16.10.2025; одобрена после рецензирования: 03.04.2026;
принята к публикации: 06.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 16.10.2025; approved after review: 03.04.2026;
accepted for publication: 06.04.2026

Информация об авторах:

Сафаргалин Айдар Расихович, аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета (450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1), e-mail: playtostory@gmail.com, SPIN-код: 4034-3726

Хафизов Ильдар Фанилевич, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450044, г. Уфа, ул. Матвея Пинского, д. 4), доктор технических наук, профессор, e-mail: ildar.hafizov@mail.ru, SPIN-код: 6033-5744

Попова Елена Викторовна, доцент Уфимского государственного нефтяного технического университета (450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1), кандидат технических наук, e-mail: evpopova10@yandex.ru, SPIN-код: 4952-4369

Information about authors:

Safargalin Aydar R., postgraduate student of Ufa state petroleum technological university (450062, Ufa, Kosmonavtov Str., 1), e-mail: playtostory@gmail.com, SPIN: 4034-3726

Khafizov Ildar F., professor of the department of fire and industrial safety of Ufa state petroleum technological university (450044, Ufa, Matvey Pinsky Str., 4), doctor of technical sciences, professor, e-mail: ildar.hafizov@mail.ru, SPIN: 6033-5744

Popova Elena V., associate professor of Ufa state petroleum technological university (450062, Ufa, Kosmonavtov Str., 1), candidate of technical sciences, e-mail: evpopova10@yandex.ru, SPIN: 4952-4369

Научная статья

УДК 614.847:677.017; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-112-119

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ
НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ
МАТЕРИАЛА ВЕРХА БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНОГО**

✉Зелинская Ирина Алексеевна;

Иванов Алексей Владимирович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉zelinskaya.i@igps.ru

Аннотация. Исследовано влияние углеродных наноструктур (астраленов) на термическую стабильность композита на основе арамидных волокон с водоотталкивающей пропиткой, являющейся материалов верха боевой одежды пожарного. Методами дифференциальной термогравиметрии и дифференциального термического анализа исследован процесс термоллиза образцов с различным содержанием наночастиц (0–0,01 масс.%). Установлено, что введение астраленов в концентрации 0,001 масс.% значительно улучшает термическую стабильность композита. Дальнейшее повышение концентрации приводит к снижению термической стабильности композита. Механизм повышения термической стабильности композита за счет модифицирования астраленами заключается в создании на поверхности материала плотного карбонизованного слоя, ограничивающего доступ кислорода во внутренние слои материала.

Ключевые слова: модифицирование, термический анализ, защитная одежда, астралены

Для цитирования: Зелинская И.А., Иванов А.В. Исследование влияния углеродных наномодификаторов на термическую стабильность материала верха боевой одежды пожарного // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 112–119. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-112-119

Scientific article

**STUDY OF THE INFLUENCE OF CARBON NANOMODIFIERS
ON THERMAL STABILITY OF THE MATERIAL OF THE TOP
OF FIREFIGHTER'S PROTECTIVE CLOTHING**

✉Zelinskaya Irina A.;

Ivanov Alexey V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉zelinskaya.i@igps.ru

Abstract. This article examines the effect of carbon nanostructures (astralenes) on the thermal stability of a composite based on aramid fibers with a water-repellent impregnation, used as the upper material for firefighter protective clothing. Differential thermogravimetry and differential thermal analysis were used to study the thermolysis of samples with varying nanoparticle contents (0–0,01 wt%). It was found that the introduction of astralenes at a concentration of 0,001 wt% significantly improves the thermal stability of the composite. Further increases in concentration lead to a decrease in the thermal stability of the composite. The mechanism for increasing the thermal stability of the composite by light modification with astralenes involves the creation of a dense carbonized layer on the surface of the material, which limits oxygen access to the inner layers of the material.

Keywords: modification, thermal analysis, protective clothing, astralenes

For citation: Zelinskaya I.A., Ivanov A.V. Study of the influence of carbon nanomodifiers on thermal stability of the material of the top of firefighter's protective clothing // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 112–119. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-112-119

Введение

Современные условия эксплуатации материалов для боевой одежды пожарного (БОП) требуют повышения термической стабильности и устойчивости к воздействию открытого пламени. Арамидные волокна, применяющиеся в качестве основы для материалов БОП, несмотря на свою прочность и сравнительно высокий кислородный индекс, при обработке водоотталкивающей пропиткой на основе силикона, обладают ограниченной огнестойкостью и подвержены термической деструкции при высоких температурах [1]. Это создает повышенный риск термических поражений участников тушения пожаров на объектах с обращением углеводородов [2]. Проведенные натурные испытания показали возможность повышения эксплуатационных характеристик материалов БОП без ухудшения механических свойств [3, 4], однако механизм повышения данных термической стабильности в условиях модифицирования астраленами [5] на данном этапе исследований раскрыт не был.

Ключевой проблемой является отсутствие четкого понимания механизма, посредством которого углеродные наноструктуры (УНС) (например, астралены и углеродные нанотрубки) повышают термическую стабильность композита. Хотя экспериментальные данные подтверждают, что введение наночастиц в полимерные матрицы увеличивает температуру начала деструкции и снижает горючесть [3], физико-химические механизмы этого процесса остаются недостаточно изученными. В частности, неясно, как именно наноструктуры влияют на кинетику термического разложения и формирование защитного углеродного слоя, предотвращающего распространение пламени [4]. В связи с этим целью настоящего исследования было проведение термического анализа материалов БОП с целью выявления механизмов обеспечения термической стабильности композитов в условиях модифицирования астраленами.

Материалы и методы для исследования

В качестве материалов для исследования использовались ткани на основе арамидного волокна с водоотталкивающей пропиткой (образцы), в которую были введены астралены (модификатор) в концентрациях 0,001 масс.%, 0,005 масс.% и 0,01 масс.% по методике, изложенной в работе [2], а также немодифицированный образец ткани (0 масс.%). Для проведения термического анализа использовалась установка NETZSCH STA449F3A-0430-M «Jupiter». Диапазон температур исследования: 100–900 °С, скорость подъема температуры: 10 °С/мин, среда: воздух [6]. Устойчивость композитов к воздействию открытого пламени определялась по ГОСТ Р ИСО 6941–99 «Материалы текстильные для средств индивидуальной защиты. Метод определения способности распространения пламени на вертикально ориентированных пробах» [11]. Зольный остаток (ЗО) определялся в исследуемых интервалах температур [7]. Обработка результатов исследования проводилась с помощью программного продукта Origin [8].

Результаты исследований

Результаты термического анализа показали, что наименьшее значение коксового остатка имеет образец с концентрацией УНС 0,001 масс.%, а наибольшее – для образца с концентрацией УНС 0,005 масс.% (рис. 1).

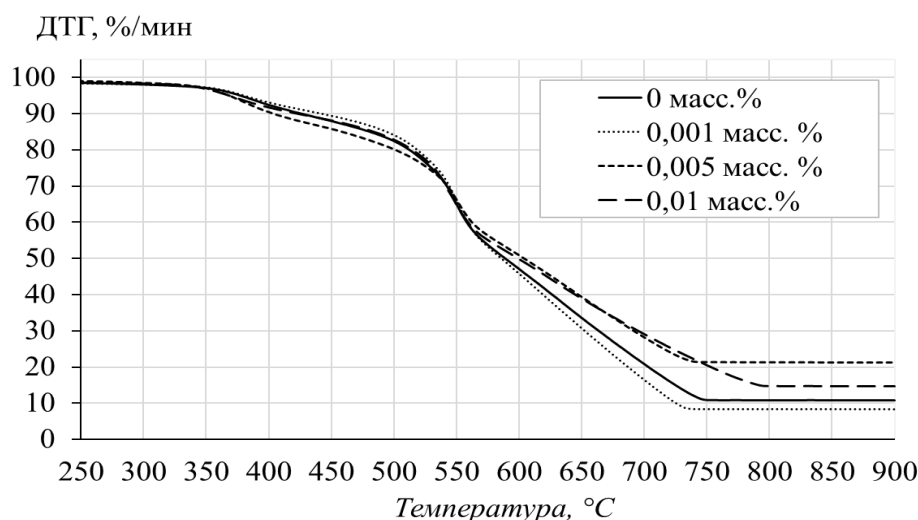


Рис. 1. ТГ-термограммы образцов

На термограммах дифференциального термического анализа (ДТА) (рис. 2) и дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) (рис. 3) наблюдаются три этапа потери массы и тепловыделения образцов материалов в интервалах температур 300–440 °С, 450–580 °С и 580–810 °С.

Полученные данные кривых ДТА показали, что с увеличением концентрации модификатора наблюдается снижение температуры пика ДТА. Для температурного интервала № 2 при концентрации модификатора 0,001 масс.% наблюдается увеличение площади ДТА-пика, а при более высоких концентрациях – его уменьшение (рис. 2).

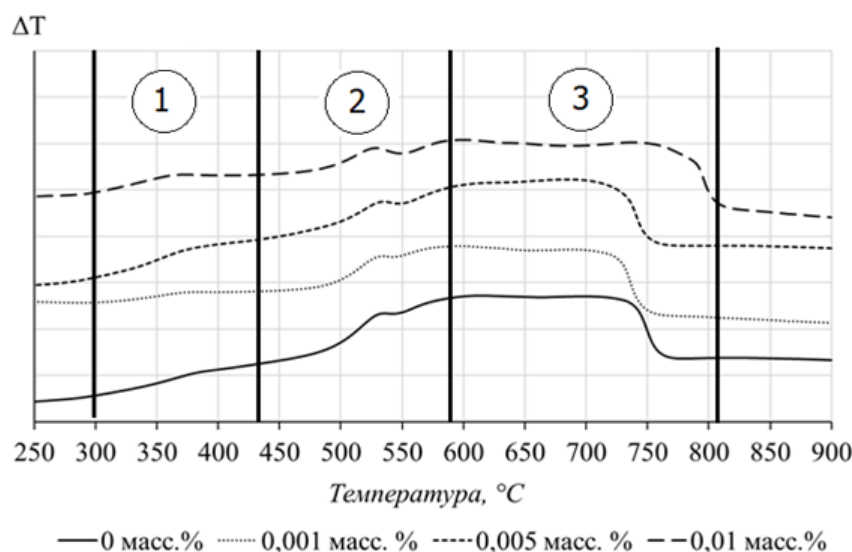


Рис. 2. Результаты ДТА-анализа образцов

Полученные данные кривых ДТГ показали, что в температурном интервале № 1 в присутствии модификатора происходит снижение температуры начала разложения и смещение ДТГ-пика в область более низких температур. Для температурного интервала № 2 влияние модификатора неоднозначно: для образца 0,005 масс.% наблюдается повышение температуры начала разложения, а для образца 0,01 масс.% происходит ее снижение. Для температурного интервала № 3 наибольшие изменения наблюдаются в температуре окончания потери массы для образца 0,01 масс.% (рис. 3).

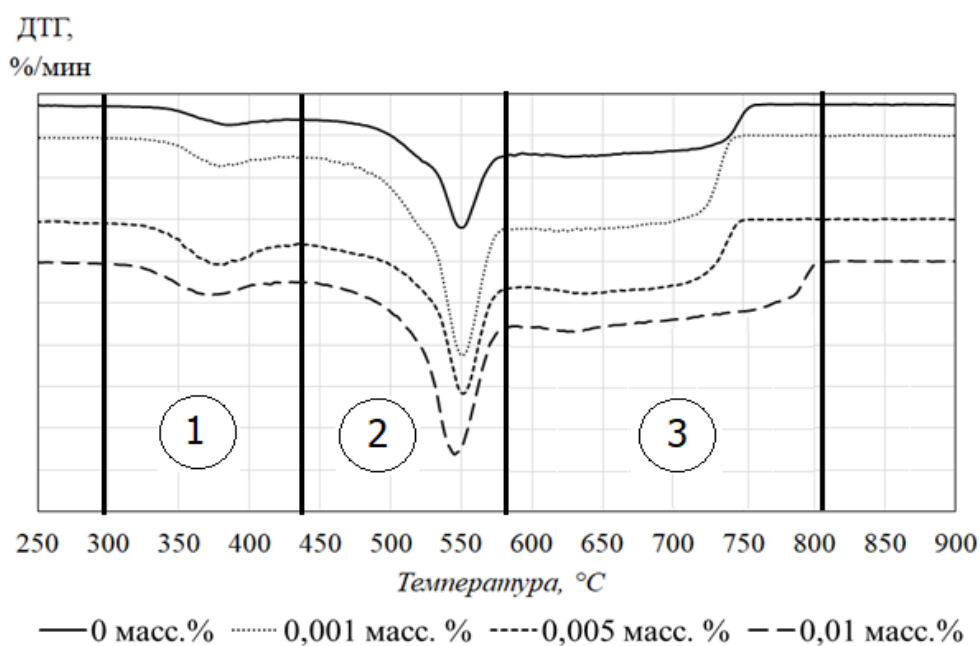


Рис. 3. Результаты ДТГ-анализа образцов

Результаты исследований устойчивости композита к воздействию открытого пламени по ГОСТ Р ИСО 6941–99 [11] показали, что наименьшее время остаточного горения наблюдается у образца с концентрацией УНС 0,001 масс.%, а наибольшее – с концентрацией УНС 0,01 масс.% (рис. 4).

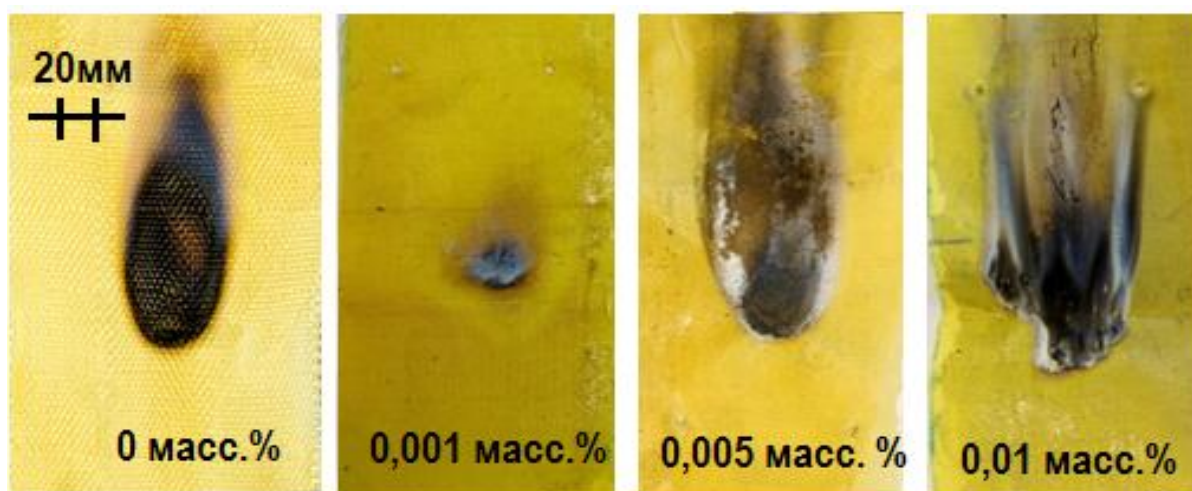


Рис. 4. Фотографии образцов после воздействия тестовых испытаний по ГОСТ Р ИСО 6941–99 [11]

Обсуждение результатов исследований

Анализ данных (табл. 1) показывает, что смещение пиков ДТГ в область более низких температур, а также увеличение площади ДТА-пика в температурном интервале № 1 указывает на увеличение скорости термического разложения с ростом концентрации модификатора.

Таблица 1

Сводные данные термического анализа образцов

№ п.п.	Показатель (характеристика)	0 масс. %	0,001 масс. %	0,005 масс. %	0,01 масс. %
1.	Температурный интервал № 1 (300–440 °С)				
1.1.	Температура начала потери массы, °С	346,8	346,5	337,7	327,6
1.2.	Температура окончания потери массы, °С	404,4	404,0	416,1	407,6
1.3.	Температура для ДТГ-пика, °С	384,5	380,6	380,5	370,2
1.4.	Значение ДТГ-пика, %/мин	-1,74	-1,54	-2,22	-1,67
1.5.	Площадь ДТА-пика, К·с/мг	3,893	6,523	6,932	8,753
2.	Температурный интервал № 2 (450–580 °С)				
2.1.	Температура начала потери массы, °С	527,2	526,6	535,5	523,5
2.2.	Температура окончания потери массы, °С	568,9	571,4	569,0	570,1
2.3.	Температура для ДТГ-пика, °С	549,6	550,8	551,0	544,6
2.4.	Значение ДТГ-пика, %/мин	-10,24	-10,84	-8,73	-9,53
2.5.	Площадь ДТА-пика, К·с/мг	5,536	9,11	2,39	2,303
3.	Температурный интервал № 3 (580–810 °С)				
3.1.	Температура начала потери массы, °С	592,0	591,9	583,7	589,0
3.2.	Температура окончания потери массы, °С	752,1	738,7	744,5	798,6
3.3.	Температура для ДТГ-пика, °С	623,9	583,6	634,0	626,8
3.4.	Значение ДТГ-пика, %/мин	-4,16	-4,66	-3,63	-3,39
3.5.	Площадь ДТА-пика, К·с/мг	95,78	88,92	92,42	76,01
3.6.	ЗО при 900 °С, %	10,64	8,24	20,99	14,52
4.	Остаточное время свободного горения, с	11	1	7	27

Значительное увеличение температуры для образца 0,01 масс. % с одновременным снижением температуры в температурном интервале № 3 свидетельствует о потенциальном изменении механизма термического разложения.

Совмещенные данные значений ЗО и остаточного времени свободного горения образцов материалов представлены на рис. 4. Наибольший вклад модификатора в процесс термической деструкции образцов происходит в температурном интервале № 1, где даже малые концентрации астраленов значительно влияют на термическую деструкцию материала.

Наибольший вклад в увеличение времени свободного горения образцов дают уменьшение значений температуры начала потери массы в температурном интервале № 1 (рис. 5) и увеличение значений температуры окончания потери массы в температурном интервале № 3 (рис. 6).



Рис. 5. Совмещенные данные значений температуры начала потери массы (температурный интервал № 1) и остаточного времени свободного горения образцов

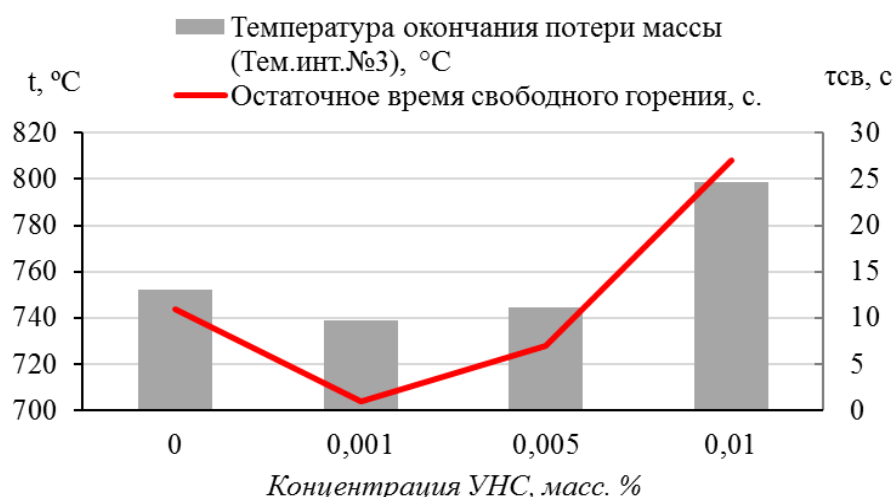


Рис. 6. Совмещенные данные значений температуры окончания потери массы (температурный интервал № 3) и остаточного времени свободного горения образцов

Исходя из полученных данных и результатов исследований, изложенных в работах [9, 10], можно сделать вывод, что повышение термической стойкости арамидного материала с силиконовой пропиткой, модифицированной астраленами, достигается за счет каталитического ускорения термического разложения модифицированного материала в температурном интервале № 1 и формирования плотного карбонизованного слоя, препятствующего быстрому проникновению кислорода во внутренний объем материала, что приводит к существенному сокращению времени свободного горения образца с концентрацией модификатора 0,001 масс. %.

Выводы

1) Модифицирование материала верха БОП астраленами в концентрации 0,001 мас. % обеспечивает повышение термической стабильности композита с силиконовой пропиткой. Дальнейшее же увеличение содержания модификатора приводит к снижению термостабильности материала.

2) Основной механизм термозащитного действия астраленов заключается в каталитическом ускорении процессов карбонизации поверхности при термическом воздействии. Это приводит к образованию плотного карбонизованного барьерного слоя, который существенно снижает скорость диффузии кислорода в объем материала и замедляет процессы термоокислительной деструкции.

3) Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения сверхмалых концентраций астраленов (порядка 0,001 мас. %) для модифицирования композитов с применением арамидов. Оптимальная концентрация обеспечивает баланс между каталитической активностью нанодобавки и структурной целостностью формируемого защитного слоя.

Список источников

1. Ивахнюк Г.К., Борисова В.А., Зелинская И.А. Модификация волокон боевой одежды пожарного углеродными наноматериалами для повышения их термостойкости и прочности в целях обеспечения безопасности сотрудников МЧС России // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. 2020. С. 81–84.

2. Зелинская И.А. Исследование свойств наномодифицированных компонентов систем тепловой защиты в условиях горения углеводородов // XXI век: итоги прошлого

и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. № 4 (60). С. 172–177. DOI: 10.46548/21vek-2022-1160-0027

3. Москалюк О.А., Зелинская И.А., Марценюк В.В. Апробация образцов тканей, модифицированных углеродными наноструктурами в составе боевой одежды пожарного в рамках опытно-исследовательских учений «Безопасная Арктика-2023» // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 163–168.

4. Кисляков Р.А., Зелинская И.А., Иванов А.В. Модификация материалов верха боевой одежды пожарного астраленами // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2021. № 2. С. 41–44.

5. Multi layered carbon nanoparticles of the fulleroid type: U.S. Patent № 9090752: заявл. / А. Ponomarev, М. Iudovich. 2015. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/26/62/05/8ef211389648f3/US9090752.pdf> (дата обращения: 20.03.2026).

6. Ситникова В.Е., Пономарева А.А., Успенская М.В. Методы термического анализа: практикум. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 152 с.

7. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами / А.В. Иванов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 1. С. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68

8. Возможности методов термического анализа в применении к исследованию кинетики термического разложения полимеров / А.А. Коптелов [и др.] // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 9. С. 1163–1169.

9. Characterization of the carbonization process of expandable graphite/silicone formulations in a simulated fire / B. Gardelle [et al.] // Polymer Degradation and Stability. 2013. Т. 98. № 5. С. 1052–1063. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.02.001

10. Flame retardancy of silicone-based materials / S. Hamdani [et al.] // Polymer Degradation and Stability. 2009. Т. 94. № 4. С. 465–495. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.11.019

11. ГОСТ Р ИСО 6941–99. Материалы текстильные для средств индивидуальной защиты. Метод определения способности распространения пламени на вертикально ориентированных пробах. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. III, 8 с.; 29 см (Система стандартов безопасности труда).

References

1. Ivahnyuk G.K., Borisova V.A., Zelinskaya I.A. Modifikaciya volokon boevoj odezhdy pozhnarnogo uglerodnymi nanomaterialami dlya povysheniya ih termostojkosti i prochnosti v celyah obespecheniya bezopasnosti sotrudnikov MCHS Rossii // Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovacii. 2020. S. 81–84.

2. Zelinskaya I.A. Issledovanie svojstv nanomodificirovannyh komponentov sistem teplovoj zashchity v usloviyah goreniya uglevodorodov // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2022. Т. 11. № 4 (60). С. 172–177. DOI: 10.46548/21vek-2022-1160-0027

3. Moskalyuk O.A., Zelinskaya I.A., Marcenyuk V.V. Aprobaciya obrazcov tkanej, modificirovannyh uglerodnymi nanostrukturami v sostave boevoj odezhdy pozhnarnogo

4. v ramkah opytно-issledovatel'skih uchenij «Bezopasnaya Arktika-2023» // Pozhnarnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 2023. S. 163–168.

5. Kislyakov R.A., Zelinskaya I.A., Ivanov A.V. Modifikaciya materialov verha boevoj odezhdy pozhnarnogo astralenami // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2021. № 2. S. 41–44.

6. Multi layered carbon nanoparticles of the fulleroid type: U.S. Patent № 9090752: zayavl. / А. Ponomarev, М. Iudovich. 2015. URL:

<https://patentimages.storage.googleapis.com/26/62/05/8ef211389648f3/US9090752.pdf> (data obrashcheniya: 20.03.2026).

7. Sitnikova V.E., Ponomareva A.A., Uspenskaya M.V. *Metody termicheskogo analiza: praktikum*. SPb.: Universitet ITMO, 2021. 152 s.

8. Issledovanie ekspluatatsionnykh harakteristik ogneshchitnykh pokrytij na osnove epoksidnykh smol, modifitsirovannykh astrylenami / A.V. Ivanov [i dr.] // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2020. T. 29. № 1. S. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68

9. Vozmozhnosti metodov termicheskogo analiza v primenении k issledovaniyu kinetiki termicheskogo razlozheniya polimerov / A.A. Koptelov [i dr.] // *Zhurnal prikladnoy himii*. 2016. T. 89. № 9. S. 1163–1169.

10. Characterization of the carbonization process of expandable graphite/silicone formulations in a simulated fire / B. Gardelle [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. 2013. T. 98. № 5. S. 1052–1063. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.02.001

11. Flame retardancy of silicone-based materials / S. Hamdani [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. 2009. T. 94. № 4. S. 465–495. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.11.019

12. GOST R ISO 6941–99. *Materialy tekstil'nye dlya sredstv individual'noy zashchity. Metod opredeleniya sposobnosti rasprostraneniya plameni na vertikal'no orientirovannykh probah*. M.: IPK Izd-vo standartov, 2000. III, 8 s.; 29 sm (Sistema standartov bezopasnosti truda).

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 14.11.2025; одобрена после рецензирования: 12.01.2026; принята к публикации: 06.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 14.11.2025; approved after review: 12.01.2026; accepted for publication: 06.04.2026

Информация об авторах:

Зелинская Ирина Алексеевна, заместитель начальника кафедры педагогики и психологии экстремальных ситуаций Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: zelinskaya.i@igps.ru, SPIN-код: 6886-9928

Иванов Алексей Владимирович, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: ivanov.av.igps@mail.ru, SPIN-код: 6886-9928

Information about the authors:

Zelinskaya Irina A., deputy head of the department of pedagogy and psychology of extreme situations of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: zelinskaya.i@igps.ru, SPIN: 6886-9928

Ivanov Aleksey V., associate professor of department of fire safety of technological processes and production of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, docent, e-mail: ivanov.av.igps@mail.ru, SPIN: 6886-9928

Научная статья

УДК 614.844; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-120-129

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Синешук Юрий Иванович;

Терехин Сергей Николаевич;

✉ Немчинов Матвей Сергеевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ matvejnemchinow@gmail.com

Аннотация. Рассматривается надежность системы роботизированной установки пожаротушения при обеспечении защиты на объектах топливно-энергетического комплекса. В настоящее время идет активное внедрение и использование автоматических систем пожаротушения на базе пожарных роботов. Интенсивное развитие пожарной робототехники происходит вследствие широкой востребованности в них из-за высокой эффективности тушения пожаров за счет быстрого обнаружения загорания в ранней стадии и гарантированного подавления очага в самом начале его возникновения полным расходом огнетушащего вещества. Роботизированная установка пожаротушения функционирует в автоматическом позиционном или контурно-программном режиме сканирования. Для взрывоопасных объектов нефтяной и газовой промышленности на наружных установках, сырьевых, товарных и промежуточных складах, сливо-наливных эстакадах первостепенное значение имеет раннее обнаружение аварийных утечек и проливов, а также предупредительные и локальные меры по осаждению, охлаждению, тушению в ранней стадии, чтобы не допустить развития аварийной ситуации. Ввиду высокой опасности для человека все чаще используют безлюдные технологии, а для пожарной защиты – пожарные роботы. Авторами проводится анализ различных способов резервирования системы, а также способов соединения отдельных элементов, даются рекомендации по повышению надежности системы.

Ключевые слова: пожарные роботы, роботизированные установки пожаротушения, автоматические установки пожаротушения, надежность, безотказность

Для цитирования: Синешук Ю.И., Терехин С.Н., Немчинов М.С. Способы повышения надежности роботизированных установок пожаротушения // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 120–129. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-120-129

Scientific article

METHODS FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS**Sineshchuk Yuri I.;****Terekhin Sergey N.;****✉Nemchinov Matvey S.****Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia****✉matvejnemchinow@gmail.com**

Abstract. This article examines the reliability of a robotic fire extinguishing system while providing protection at facilities of the fuel and energy complex. Currently, there is an active introduction and use of automatic fire extinguishing systems based on fire robots. The strong development of fire robotics is due to the great need for them due to the effectiveness of fire extinguishing due to the rapid detection of ignition at an early stage and the guaranteed suppression of the hearth at the very beginning of its occurrence by the full consumption of extinguishing agent. The control panel provides operation in automatic positional or contour-software scanning. Early detection of emergency leaks and spills, as well as preventive and local measures for precipitation, cooling, and extinguishing at an early stage, is of paramount importance for explosive objects of the oil and gas industry in outdoor installations, raw materials, commodity and intermediate warehouses, and overflow ramps. Due to the high danger to humans, unmanned technologies are increasingly being used, and fire robots are being used for fire protection. An analysis of various ways of reserving the system is carried out, as well as ways of connecting individual elements, recommendations are given to improve the reliability of the system.

Keywords: firefighting robots, robotic fire extinguishing systems, automatic fire extinguishing systems, reliability, reliability

For citation: Sineshchuk Yu.I., Terekhin S.N., Nemchinov M.S. Methods for improving the reliability of robotic fire extinguishing systems // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 120–129. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-120-129

Введение

В настоящее время роботизированные установки пожаротушения (РУП) все активнее используются на различных объектах. РУП при тушении должна обеспечивать подачу огнетушащего вещества на определённую площадь по заданным координатам, в заданное время, обеспечивая требуемую интенсивность орошения [1, 2]. Основным преимуществом пожарных роботов (ПР) является возможность выбора алгоритма и принципа работы системы управления, что позволяет учитывать особенности проходящих процессов и параметры защищаемых объектов [3–6]. Уже значительный период времени РУП используются на защите объектов топливно-энергетического комплекса.

Обеспечение объекта автоматическими установками пожаротушения не гарантирует полную безопасность и исключение возможности возникновения и распространения пожара. Все это связано с показателями надёжности, которые необходимо учитывать при выборе вида автоматических установок пожаротушения.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения системы и условий ее применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств [7, 8]. Основной задачей работы будет являться решение вопроса повышения надёжности РУП.

Основными показателями надёжности невосстанавливаемых систем являются:

- вероятность безотказной работы;
- вероятность отказа;
- плотность распределения вероятности отказа;

- интенсивность отказов;
- среднее время наработки до первого отказа [9].

Вероятность безотказной работы – $P(t)$, наиболее часто используемый показатель, который отражает вероятность того, что в пределах заданного времени (заданной наработки) отказ объекта не произойдет^{1,2}. Определяется по формуле:

$$P(t) = P(t_0 > t).$$

Для рассматриваемого объекта отказ и отсутствие отказа в одно и то же время t представляет полную группу несовместных событий:

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

Типовая функциональная зависимость $P(t)$ и $Q(t)$ представлена на рис. 1.

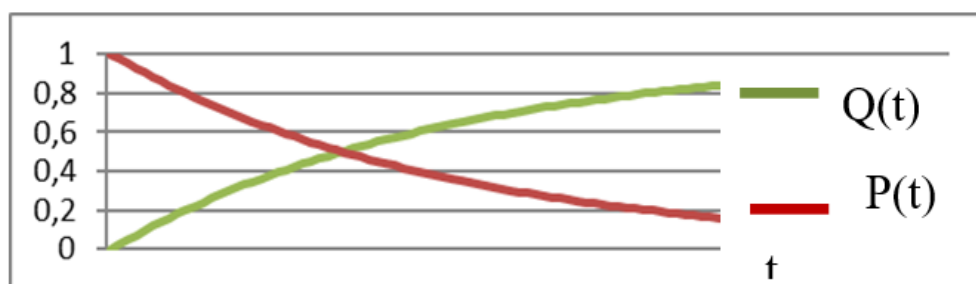


Рис. 1. Функциональная зависимость $P(t)$ и $Q(t)$

При расчетах показателей надежности широко используется так называемая основная формула надежности, связывающая вероятность безотказной работы и интенсивность отказов:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Статистические данные об отказах типовых элементов свидетельствуют о том, что время их работы для нормального периода эксплуатации, в течение которого $\lambda(t) = \text{const}$, подчиняется экспоненциальному закону распределения. Тогда выражение для вычисления вероятности безотказной работы выглядит, как показано в формуле:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda(t)}.$$

Низкие значения показателей надежности могут привести к серьезным экономическим, социальным и экологическим последствиям [10, 11]. Поэтому повышение показателей надежности автоматических установок пожаротушения, в частности РУП, являются одной из главных задач в системе обеспечения пожарной безопасности.

Опыт эксплуатации очень многих электронных приборов и значительного количества электромеханической аппаратуры показывает, что для них характерны три вида зависимостей интенсивности отказов от времени, соответствующих трем периодам жизни этих устройств (рис. 2).

¹ ГОСТ Р 27.102–2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

² ГОСТ 27.003–2016. Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»



Рис. 2. График интенсивности отказов

Методы исследования

Оценить эффективность того или иного метода повышения надежности возможно только тогда, когда известно, как влияют основные характеристики этого метода на количественные характеристики надежности.

В общем случае методы повышения надежности могут быть сведены к следующим:

- резервирование – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств, сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций;
- уменьшение интенсивности отказа – заключается в упрощении системы, выборе наиболее надежных элементов, облегчении режимов работы, тренировке элементов и системы;
- уменьшению времени восстановления – достигается уменьшением отказов, уменьшением времени ремонта, повышением доступности элементов и системы к ремонту.

При этом метод уменьшения времени непрерывной работы не может использоваться для систем круглосуточного контроля. В рамках данной статьи рассмотрим эти методы с учетом получения значений надежности системы исходя из расчетов.

Реализация указанных методов может осуществляться либо при проектировании, либо при изготовлении, либо в процессе эксплуатации систем. Для повышения надежности РУП необходимо провести анализ и выбор наиболее эффективной и надежной системы путем расчета надежности отдельных элементов исходя из вида соединений.

Системы с резервированием (отказоустойчивые системы) разрабатываются таким образом, чтобы минимизировать воздействие деструктивных факторов и сохранять свойства надежности для выполнения установленных алгоритмом функционирования системы задач даже при выходе из строя (отказе) отдельных элементов системы.

Результаты и обсуждение

Роботизированные установки пожаротушения представляют собой многокомпонентную, технически сложную систему.

В состав роботизированной установки пожаротушения входят как минимум два пожарных робота, защищающих общее пространство, а также составные элементы системы (рис. 3).

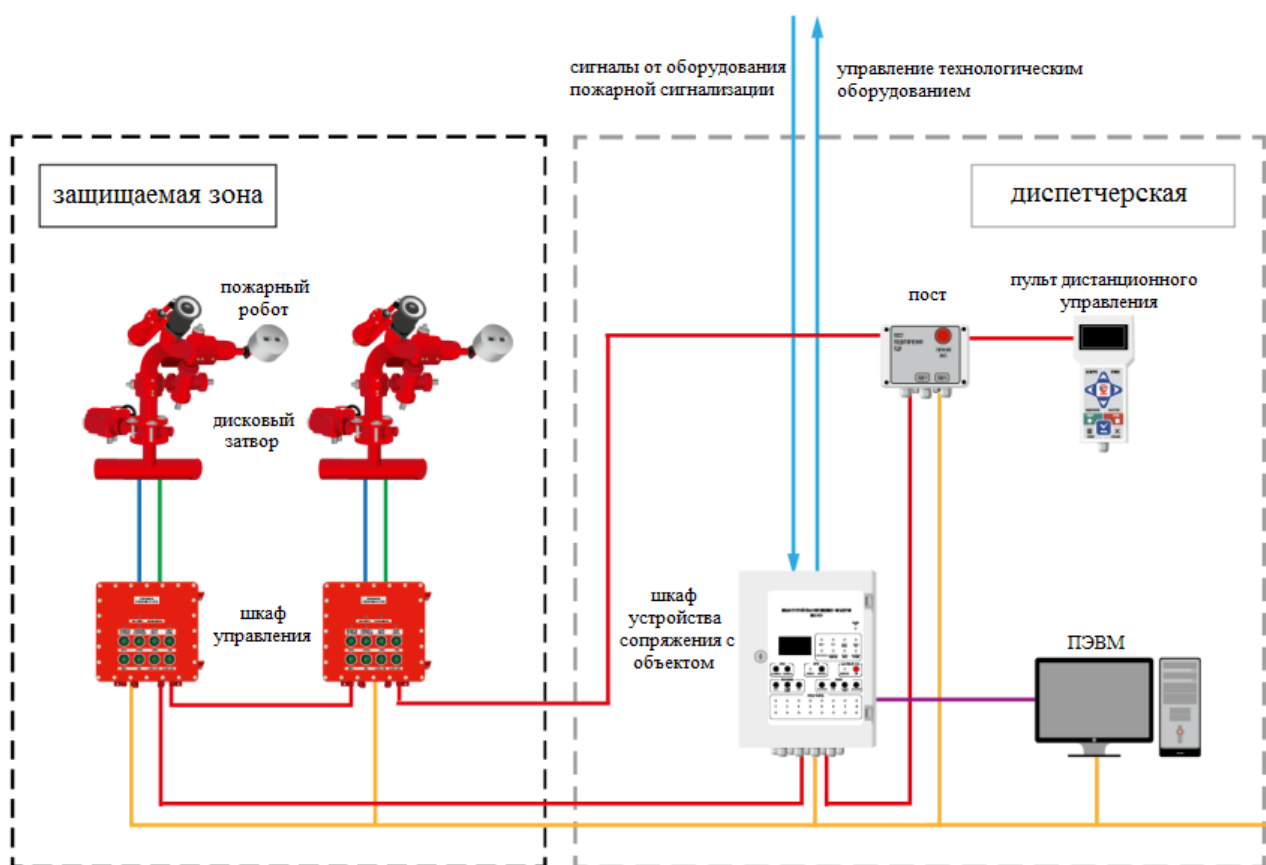


Рис. 3. Структурная схема РУП

Одним из ключевых элементов РУП является системообразующий блок управления РУП – шкаф устройства сопряжения с объектом (ШКУ-УСО), который выполняет ряд важных функций, являясь по своей сути центром по обработке информации и передачи сигналов на исполнительные устройства.

На данный момент к надежности и отказоустойчивости систем РУП применяются следующие требования:

- приборы управления должны быть рассчитаны на непрерывную работу;
- время восстановления не более 6 ч, что может быть неприемлемо в критических ситуациях;
- требования по резервированию формулируются только к резервированию подсистемы электропитания и насосным группам в составе пожарной насосной станции (без учета системы управления насосами);
- вероятность безотказной работы ствола за цикл не менее 0,993, при контроле 554 циклов одноступенчатым методом.

Несмотря на отсутствие нормативных требований по применению методов обеспечения надежности в отношении отдельных элементов РУП, потребность в их резервировании для обеспечения безотказной работы системы приобретает особую актуальность на объектах топливно-энергетического комплекса.

Для обеспечения защиты резервуара с хранением нефтепродуктов используем четыре пожарных робота ПР-ЛСД-С70 У-Ех-ИК-ТВ во взрывозащищенном исполнении, что позволяет своевременно обнаружить опасный уровень теплового воздействия от внешних очагов пожара и обеспечить необходимую и достаточную защиту без привлечения значительных оперативных средств на время, необходимое для ликвидации источников теплового воздействия (рис. 4).

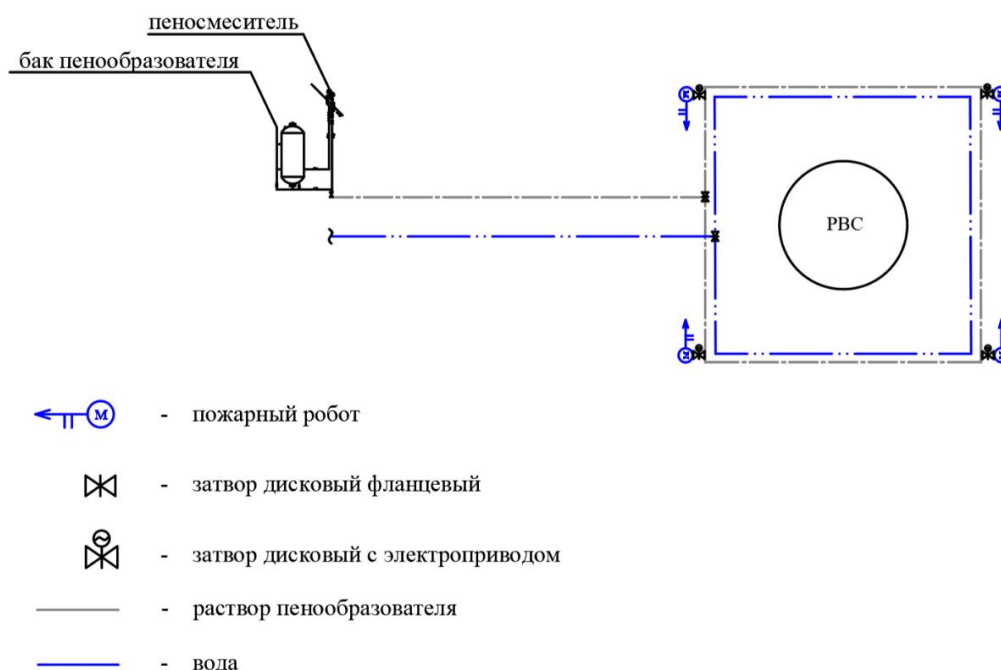


Рис. 4. Схема защиты резервуара

Пожарные роботы соединены кольцевой линией связи, обеспечивающей передачу управляющих сигналов даже при возникновении единичной неисправности. Отсюда возникает потребность в повышении надежности отдельных элементов РУП:

1. Надежность пожарных роботов.

Для замены отказавшего элемента достаточно иметь резервный элемент на складе. Однако продолжительность ручной замены составляет часы, что для многих систем недопустимо долго – такая ситуация характерна для систем без резервирования, где показатель надежности более низкий и для данного случая из четырех пожарных роботов равен 0,972 (рис. 5).

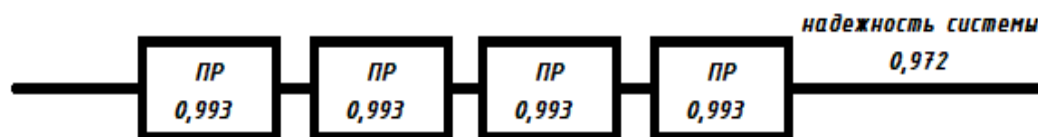


Рис. 5. Система без резервирования

Сократить время вынужденного простоя позволяет применение узлов системы с возможностью «горячей замены», при условии наличия развитой системы диагностики неисправности. Горячее резервирование с замещением – резервирование, при котором переход с основного элемента на резервный происходит без потери производительности. Такая необходимость существует на всех пожарных роботах в защищаемой зоне, так как при условном пожаре в резервуаре время реагирования и время начала тушения должно минимизироваться.

Если при получении сигнала от ШК-УСО и передаче его РУП на тушение назначаются два ПР, находящихся ближе всех к очагу возгорания, а в случае выхода из строя одного пожарного робота, его функции возьмет на себя ближайший ПР, пребывающий в это время уже в «боевом» режиме, или резервная пара роботов, то в этом случае мы приходим к формам параллельно – последовательного, либо последовательно – параллельного соединения элементов.

Тогда для первого рода соединений расчетные выражения будут выглядеть следующим образом:

$$P = (1 - (1 - P_1)(1 - P_2))(1 - (1 - P_3)(1 - P_4)) = 0,9999.$$

А для второй формы соединений получим значение:

$$P = (1 - (1 - P_1 * P_3)(1 - P_2 * P_4)) = 0,9998.$$

Также возможен вариант системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из n элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее m элементов ($m < n$).

2. Надежность ПДУ-П.

В данном случае используется холодное резервирование, которое заключается в переходе резервного элемента в активный режим работы по мере выхода из строя предыдущего работающего устройства. Выход из строя пульта управления оперативно замещается другим ПДУ-П, который находится в помещении оператора либо на защищаемой территории. Помимо этого система РУП сможет автономно существовать и без ПДУ-П, выполняя свои задачи по локализации/ликвидации пожара. Следовательно, еще один элемент РУП применяется с резервированием путем замены элемента.

3. Надежность ШК-УСО.

В настоящее время системообразующим элементом РУП является центральный блок управления ШК-УСО. Управляющий модуль ШК-УСО не имеет резервирования, и выход его из строя приводит к невозможности РУП существовать в качестве автоматической системы пожаротушения и выполнять свою основную функцию: автоматическое тушение очага пожара.

В связи с этим возникает явная проблема в автономной работе РУП. Шкаф устройства сопряжения с объектом, как было описано ранее, выполняет важнейшие задачи всей роботизированной установки пожаротушения, являясь диктующим элементом в этой системе. ШК-УСО должен иметь максимальные показатели надежности и отказоустойчивости. Этого можно добиться двумя решениями:

1. Резервирование ШК-УСО. Самый простой способ обеспечить высокие показатели надежности и отказоустойчивости путем включения в систему резервного ШК-УСО, но такое исполнение имеет ряд особенностей, осложняющих это решение.

Во-первых, возможно ошибочное переключение на резервную систему. Для этого при переключении по причине сбоя в системе контроля используют временной фильтр, который разрешает переключение только при условии, что состояние неисправности длится не менее установленного времени.

Во-вторых, в момент замещения резервный ШК-УСО должен иметь внутренние состояния, идентичные состояниям основного. Для быстрой синхронизации внутренних состояний потребуется применение специализированной скоростной шины синхронизации, которая будет усложнять систему.

В-третьих, исходя из вышеперечисленных пунктов, увеличивается и затраты на обеспечение системы РУП.

2. Упрощение системы (работа без ШК-УСО). Работа роботизированной установки пожаротушения без ШК-УСО осложняется тем, что необходимо возложить на какой-то элемент функции, которые выполнял ШК-УСО и тем самым этот элемент станет условным центром принятия решений. Для защиты как объекта ТЭК, так и любого другого объекта функционирует система противопожарной защиты (СППЗ). Ее основным элементом является прибор приёмно-контрольный и управления пожарный (ППКУП). То есть весь функционал ШК-УСО можно переложить на ППКУП, однако, еще в самом начале указывалось, что работа РУП может перепрограммироваться под определенные особенности объекта, то есть программное

обеспечение, которое создается для РУП, является индивидуальным и его тяжело дублировать на ППКУП для корректной работы всех систем СППЗ.

Тогда требуется другой путь решения данной проблемы, например, обособленная работа пожарных роботов на защищаемой территории. В примере системы РУП, состоящей из четырех ПР, защищающих резервуар, выбирается один «главствующий» в одной из пар ПР, обеспечивающий сбор и обработку информации на заданном участке и передачу команд другим ПР, находящимся под его ведением. В данном случае выход из строя ШК-УСО позволит не нагружать работу СППЗ и не проводить дополнительные сложные операции по перепрограммированию ППКУП, а передать все функциональные обязанности пожарным роботам, работающим по принципу иерархии. Тогда, при сбое в работе «главствующего» ПР, его обязанности перенимает резервный ПР и уже он выполняет все функции, которые изначально были возложены на ШК-УСО.

По сути, мы приходим к схеме классического параллельно-последовательного соединения, когда на объекте защиты допустимо функционирование хотя бы любых двух из четырех роботов. При таком техническом решении вероятность безотказной работы системы будет значительно повышаться и надежность системы будет более 0,999.

В связи с тем, что тема пожарной робототехники в нашей стране лишь набирает обороты, а конкретных требований надежности, предъявляемых к пожарным роботам, нет, то и предложенных ранее методов повышения надежности систем роботизированной установки пожаротушения не имеется. Таким образом, мы можем лишь сравнить эффективность представленного метода повышения надежности и безотказности систем на примере других объектов.

Выводы

Рассмотрев способы повышения надежности РУП, можем прийти к выводу, что использование системы с резервированием путем параллельно-последовательного соединения элементов повышает надежность и тем самым установка будет способна выполнять установленный ряд задач по обеспечению пожарной безопасности объекта с большей эффективностью, чем другие системы, выполняющие аналогичные функции.

Надежность как свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации, следует рассматривать как один из основных критериев качества системы. Чем качественнее система, тем она надежнее, и наоборот. В связи с этим задача расчета, прогнозирования и повышения надежности сложных технических систем, к числу которых, несомненно, относятся и робототехнические системы, является исключительно актуальной.

Список источников

1. Система технического зрения для роботизированных установок пожаротушения / С.Г. Немчинов [и др.] // Экстремальная робототехника. 2022. № 1 (33). С. 51–56.
2. Gupta Brij B., Nedjah N. Safety, Security, and Reliability of Robotic Systems // Algorithms, Applications, and Technologies. 2023. 276 p. DOI: 10.1201/9781003031352
3. Горбань Ю.И., Цариченко С.Г. Роботизированные установки пожаротушения – современные технологии пожаротушения с российским приоритетом // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 5. С. 54–66. EDN YQUILQ. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.54-66
4. Dhillon S. Robot system reliability and safety. A modern approach. LLC CRC Press, 2020. 212 p. DOI: 10.1201/b18388
5. Mitrevsk P., Plöger G., Lakemeyer G. Ontology-Assisted Generalisation of Robot Action Execution Knowledge // International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2021. P. 6763–6770. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636791

6. The evolution of robotics research / E. Garcia [и др.] // IEEE Robot. Autom. Mag. 2007. P. 90–103.
7. Основы теории надежности: учеб. / А.В. Чепурин [и др.]. М.: Типография ПМГ, 2023. 232 с.
8. Mourtzis D., Tsoubou S., Angelopoulos J. Robotic Cell Reliability Optimization Based on Digital Twin and Predictive Maintenance // Electronics. 2023. 12 p. DOI: 10.3390/electronics12091999
9. Киселев В.В. Пути повышения надежности пожарной автомобильной техники // NovaInfo.Ru. 2020. № 114. С. 5–6.
10. Маткаримов Ш.А. Понятие надёжности в технике // Universum: технические науки. 2023. № 12-2 (117). С. 54–55. EDN KQSTUS. DOI: 10.32743/UniTech.2023.117.12.16366
11. Friederich J.; Lazarova-Molnar S. Towards Data-Driven Reliability Modeling for Cyber-Physical Production Systems // Procedia Comput. Sci. 2021. № 184. DOI: 10.1016/j.procs.2021.03.073

References

1. Sistema tekhnicheskogo zreniya dlya robotizirovannykh ustanovok pozharotusheniya / S.G. Nemchinov [i dr.] // Ekstremal'naya robototekhnika. 2022. № 1 (33). S. 51–56.
2. Gupta Brij B., Nedjah N. Safety, Security, and Reliability of Robotic Systems // Algorithms, Applications, and Technologies. 2023. 276 p. DOI: 10.1201/9781003031352
3. Gorban' Yu.I., Carichenko S.G. Robotizirovannye ustanovki pozharotusheniya – sovremennye tekhnologii pozharotusheniya s rossijskim prioritetom // Pozharovzryvbezopasnost'. 2022. T. 31. № 5. S. 54–66. EDN YQUILQ. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.54-66
4. Dhillon S. Robot system reliability and safety. A modern approach. LLC CRC Press, 2020. 212 p. DOI: 10.1201/b18388
5. Mitrevsk P., Plöger G., Lakemeyer G. Ontology-Assisted Generalisation of Robot Action Execution Knowledge // International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2021. P. 6763–6770. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636791
6. The evolution of robotics research / E. Garcia [i dr.] // IEEE Robot. Autom. Mag. 2007. P. 90–103.
7. Osnovy teorii nadezhnosti: ucheb. / A.V. Chepurin [i dr.]. M.: Tipografiya PMG, 2023. 232 s.
8. Mourtzis D., Tsoubou S., Angelopoulos J. Robotic Cell Reliability Optimization Based on Digital Twin and Predictive Maintenance // Electronics. 2023. 12 p. DOI: 10.3390/electronics12091999
9. Kiselev V.V. Puti povysheniya nadezhnosti pozharnoj avtomobil'noj tekhniki // NovaInfo.Ru. 2020. № 114. S. 5–6.
10. Matkarimov Sh.A. Ponyatie nadyozhnosti v tekhnike // Universum: tekhnicheskie nauki. 2023. № 12-2 (117). S. 54–55. EDN KQSTUS. DOI: 10.32743/UniTech.2023.117.12.16366
11. Friederich J.; Lazarova-Molnar S. Towards Data-Driven Reliability Modeling for Cyber-Physical Production Systems // Procedia Comput. Sci. 2021. № 184. DOI: 10.1016/j.procs.2021.03.073

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 02.03.2026; одобрена после рецензирования: 06.04.2026;
принята к публикации: 12.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 02.03.2026; approved after review: 06.04.2026;
accepted for publication: 12.05.2026

Информация об авторах:

Синешук Юрий Иванович, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: sinegal53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2591-2850>, SPIN: 4663-4378

Терехин Сергей Николаевич, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: expert_terehin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1478-8129>, SPIN: 9342-2440

Немчинов Матвей Сергеевич, начальник кабинета кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: matvejnemchinow@gmail.com, SPIN: 5286-7616, <https://orcid.org/0000-0002-3960-7518>

Information about the authors:

Sineshchuk Yuri I., professor of the department of building fire safety and automated fire fighting systems of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: sinegal53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2591-2850>, SPIN: 4663-4378

Terekhin Sergey N., professor of the department of building fire safety and automated fire fighting systems of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: expert_terehin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1478-8129>, SPIN: 9342-2440

Nemchinov Matvey S., head of the department of building fire safety and automated fire fighting systems of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: matvejnemchinow@gmail.com, SPIN: 5286-7616, <https://orcid.org/0000-0002-3960-7518>

Научная статья

УДК 614.845.1; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-130-144

ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНОСТИ ТЕПЛОПОГЛОЩЕНИЯ ОГНЕТУШАЩЕГО ВЕЩЕСТВА КАК КРИТЕРИЯ ПРИ ОСНАЩЕНИИ СУДОВ ОГНЕТУШИТЕЛЯМИ

Кожевин Дмитрий Федорович;

✉ Естехин Виталий Геннадьевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ estekhin@inbox.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме низкой эффективности применения первичных средств пожаротушения на судах, которая, в свою очередь, приводит к быстрому развитию пожара, гибели экипажа и уничтожению судна. Авторами предлагается иной подход параметризации огнетушителей, а именно, оснащение объектов защиты исходя из мощности теплопоглощения огнетушителя, основываясь на удельной пожарной нагрузке помещения объекта. В статье представлены экспериментальные данные численного моделирования развития пожара судовых помещений в программном продукте PyroSim на основании справочных данных, а также реальной пожарной нагрузки, представленной судостроительными заводами. Анализ данных мощности тепловыделения подтвердил, что на начальной стадии развития пожара рост мощности тепловыделения происходит равномерно независимо от площади помещения, где развивается пожар. Основываясь на экспериментальных данных необходимо классифицировать помещения объекта защиты исходя из теплофизических характеристик пожарной нагрузки и огнетушащего вещества. Данный подход позволит повысить эффективность применения огнетушителей на судах, снизив при этом количество пострадавших, а также минимизировать материальный и экологический ущерб.

Ключевые слова: пожарная безопасность судов, первичные средства пожаротушения, огнетушители, мощность теплопоглощения, мощность тепловыделения, численное моделирование, Fire Dynamics Simulator

Для цитирования: Кожевин Д.Ф., Естехин В.Г. Применение мощности теплопоглощения огнетушащего вещества как критерия при оснащении судов огнетушителями // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 130–144. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-130-144

Scientific article

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF FIRE EXTINGUISHERS USE ON WATER TRANSPORT

Kozhevin Dmitrii F.;**✉ Estekhin Vitalii G.****Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia****✉ estekhin@inbox.ru**

Abstract. This article addresses the problem of the low effectiveness of using primary fire extinguishing equipment on ships, which in turn leads to the rapid development of fire, crew fatalities, and vessel loss. The authors propose a different approach to the parameterization of fire extinguishers, namely, equipping protected facilities based on the extinguisher's heat absorption capacity, considering the specific fire load of the facility's compartment. The article presents experimental data from numerical modeling of fire development in shipboard compartments using the PyroSim software, based on reference data and the actual fire load provided by shipbuilding plants. The analysis of the heat release rate data confirmed that in the initial stage of fire development, the growth in heat release rate occurs uniformly, regardless of the area of the compartment where the fire is developing. Based on the experimental data, it is necessary to classify the compartments of a protected facility according to the thermophysical characteristics of the fire load and the extinguishing agent. This approach will enhance the effectiveness of fire extinguisher use on ships, thereby reducing the number of casualties and minimizing material and environmental damage.

Keywords: fire safety of ships, primary fire extinguishing means, fire extinguishers, heat absorption capacity, heat release capacity, numerical modeling, Fire Dynamics Simulator

For citation: Kozhevin D.F., Estekhin V.G. Evaluation of the efficiency of fire extinguishers use on water transport // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 130–144. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-130-144

Введение

Пожары на судах представляют большую опасность для самого судна, членов экипажа, а также экологии акватории порта, в связи с чем оперативное тушение пожара на судах является актуальной и приоритетной задачей. В ранее опубликованных статьях [1, 2], где проанализированы статистические данные, отмечается низкая эффективность применения судовых средств пожаротушения (включая первичные) при ликвидации пожаров на объектах водного транспорта. Причиной низкой эффективности применения первичных средств пожаротушения является несовершенство методического аппарата в части оснащения объектов защиты огнетушителями [3]. В настоящее время оснащение объектов огнетушителями регламентируется Правилами противопожарного режима в Российской Федерации¹, а также ведомственными нормативно-правовыми актами, которые предъявляют требования к размещению огнетушителей исходя из площади помещения, его функционального назначения и категории помещений по пожарной и взрывопожарной опасности. Для разработки методики оснащения судов огнетушителями авторами предлагается иной подход параметризации огнетушителей, а именно, оснащение объектов защиты исходя из мощности теплопоглощения огнетушителя, основываясь на удельной пожарной нагрузке помещения объекта [4].

¹ Правила противопожарного режима в Российской Федерации (утв. Постановлением Правительства Рос. Федерации от 16 сент. 2020 г. № 1479). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

Наиболее эффективными первичными средствами пожаротушения являются порошковые огнетушители. В работах [5, 6] было обосновано, что основным механизмом прекращения горения порошковыми составами наряду с ингибированием является охлаждение зоны горения между частицами порошка во фронте струи. Огнетушащий эффект порошкового состава кратно превышает эффект охлаждения и разбавления двуокисью углерода, а также воды. Преимуществом данных огнетушителей является возможность ликвидации пожаров класса «А, В, С, D, Е»^{2,3,4}.

Исходя из основного механизма прекращения горения, целесообразно оценивать эффективность огнетушителей, в том числе при оснащении ими объектов защиты по критериям мощности теплопоглощения огнетушащего вещества из зоны горения.

Огнетушитель считается способным ликвидировать очаг горения, если его теплопоглощающая способность превышает мощность тепловыделения (МТВ) из зоны горения [4–6]:

$$W_{\text{теповыделения}} < W_{\text{тепопоглощения}},$$

где $W_{\text{теповыделения}}$ – мощность тепловыделения из зоны горения, кВт; $W_{\text{тепопоглощения}}$ – мощность теплопоглощения огнетушителя, кВт.

Максимальная эффективность теплопоглощения достигается при условии, когда:

$$S_{\text{фп}} < \sum S_{\text{ф.стр.}},$$

где $S_{\text{фп}}$ – площадь проекции очага пожара, м²; $\sum S_{\text{ф.стр.}}$ – сумма площадей фронта порошковых струй, м².

Реализации предлагаемого подхода по оснащению судов огнетушителями посвящена эта статья.

Основная часть

Мощность тепловыделения из очага пожара зависит от времени свободного развития пожара и вида пожарной нагрузки, которая определяется функциональным назначением помещения судна, их производителем и индивидуальными требованиями заказчика к производителю.

Оценка величины МТВ может быть осуществлена с использованием апробированного программного обеспечения, применяемого для моделирования газодинамических процессов (ANSYS, OpenFOAM, FDS, ЛОГОС Тепло). В рамках исследования численное моделирование развития пожара и динамики его опасных факторов на судне было реализовано в PyroSim⁵ (FDS), предназначенном для моделирования пожара методом конечных объемов.

Для оценки пожарной нагрузки на судах были направлены запросы ряду отечественных судостроительных заводов, полученные сведения были использованы в исследовании. Характеристики сведений о пожарной нагрузке судов, представленные судостроительными заводами, и данные о типе и массе применяемых материалов на судах приведены в табл. 1. В ранее опубликованных работах [7–12] авторами моделировались пожары на судах в помещениях различного функционального назначения, но в этих исследованиях применялись лишь справочные показатели пожарной нагрузки.

² ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

³ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

⁴ Правила противопожарного режима в Российской Федерации (утв. Постановлением Правительства Рос. Федерации от 16 сент. 2020 г. № 1479). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

⁵ Программа Pyrosim – полевая модель пожара

Таблица 1

Расчет количества горючих материалов судна

Область применения	Нижняя палуба		Главная палуба		Шлюпочная палуба		Средняя палуба		Верхняя палуба	
	Каюта-компания экипажа 112	Каюта 121	Ресторан 204	Каюта 228	SPA-центр	Каюта 301	Гостиная 401	Каюта 416	Рулевая рубка	Сигарная
	Площадь пола, м ²									
	25,30	13,20	143,75	26,40	109,30	55,07	31,90	32,64	78,00	96,90
Количество материалов, кг										
Обшивка и отделка	Панель стеновая	–	793,80	337,14	585,72	652,05	371,70	442,17	885,06	627,75
	Панель подволоочная	–	615,02	103,22	464,96	216,34	129,81	125,49	349,60	398,82
	Цоколь	–	31,43	15,15	32,55	30,15	15,30	17,780	28,50	37,50
	Обрешетник под цоколь	–	21,00	10,13	21,68	20,10	10,20	11,85	22,70	25,05
	Обрешетник деревянный	–	240,75	50,25	417,00	172,50	111,75	111,00	254,10	293,48
Покрытие палуб	Пластик слоистый	–	232,99	62,89	174,47	125,45	72,99	80,23	132,40	164,27
	Пленка ПВХ отделочная	9,16	–	–	–	–	–	–	–	–
	Линолеум	–	–	–	–	–	–	–	240	–
	Клей	7,90	42,78	7,18	32,34	15,04	9,03	9,12	1,60	27,74
	Ковролин	24,75	163,78	27,49	123,82	57,61	34,57	34,91	–	106,21
Окраска	Плинтус	16,28	–	–	–	–	–	–	–	–
	Фанера	–	2085,75	365,55	1605,00	764,25	463,80	450,00	1125,00	1416,00
	Лакокрасочные материалы	22,60	158,63	27,40	111,701	53,03	28,30	34,60	25,00	27,80
	Мебель	554,00	1131,00	507,51	746,72	814,40	382,75	670,50	420,91	827,61
	Общее количество горючих материалов, кг	634,68	5516,90	1513,90	4315,92	2921,00	1630,00	1987,62	3484,86	3952,26
Количество горючих материалов, 1 м ² /кг		25,09	38,38	57,35	39,49	53,05	51,10	60,90	44,68	40,79

Реализация эксперимента (имитация пожара на судне)

В численном эксперименте в качестве ключевого критерия оценки пожарной опасности была принята МТВ очага пожара (HRR от англ. языка Heat Release Rate). По замыслу эксперимента очаг пожара был предусмотрен в одном из четырех судовых помещений с различной площадью (рис. 1), геометрические и объемно-планировочные характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики помещений модельного этажа

п/п	Наименование помещений	Длина, м	Ширина, м	Площадь, м ²	Размер сетки моделирования
1	Помещение № 1	5	2	10	10*22*11
2	Помещение № 2	5	3	15	14*22*11
3	Помещение № 3	5	4	20	18*22*11
4	Помещение № 4	5	10	50	42*22*11

Геометрия расчетной модели была задана с высотой помещений 3,0 м, толщиной ограждающих конструкций равной 0,25 м для несущих стен и 0,2 м – для внутренних перегородок. Все помещения, в которых располагался очаг пожара, моделировались как замкнутые объемы (адиабатические границы). В модели был исключен тепло- и массообмен с атмосферой, смежными помещениями, а также не учитывалось влияние систем вентиляции. Источник возгорания моделировался в геометрическом центре каждого помещения на уровне пола (отметка 0,0 м). Распространение пожара на начальном этапе происходило по круговой, с последующим переходом к прямоугольной форме пожара после достижения фронтом пламени ограждающих конструкций.

Для обеспечения требуемой точности расчета размер ячейки расчетной сетки (рис. 1) был принят равным 0,25 м, что является рекомендуемой практикой для подобных задач⁶. Размеры моделируемых помещений и соответствующие им параметры расчетных сеток приведены в табл. 2.

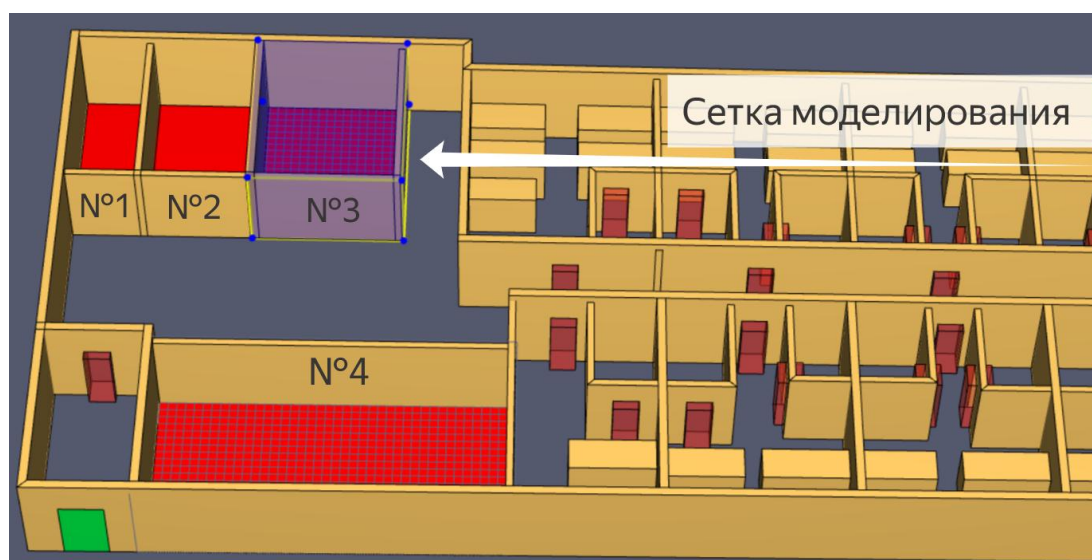


Рис. 1. Планировка модельного этажа в 3D

⁶ Рекомендации по использованию программы Fire Dynamics Simulator, NIST Special Pub. 1019-5

Наиболее типичными пожарами для судов являются пожары в грузовых помещениях, в машинно-котельных отделениях (МКО) судна и в жилых/служебных помещениях (надстройка судна) [2]. В рамках настоящего исследования для каждого из анализируемых судовых помещений (из табл. 2) было разработано два сценария развития пожара. По плану первого сценария применялись реакции из справочных данных [13]. Для реализации второго сценария были использованы сведения о пожарной нагрузке реальных судов, представленные отечественными судостроительными заводами (табл. 1).

Результаты моделирования и анализ полученных данных сценария № 1

По плану первого сценария применялась уже готовая реакция горения в программном продукте Pyrosim на основании справочных данных [13]. Моделирование пожара в грузовом помещении осуществлялось с учетом пожарной нагрузки в виде упаковочной тары, содержащей композит из горючих материалов: древесины, картона и полистирола. Сценарий пожара в МКО предполагал инициирование горения вследствие разлива легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ, бензин марки А-76). Для воспроизведения пожара в надстройке судна (жилые и служебные помещения) была применена пожарная нагрузка, характерная для административных помещений (рис. 2).

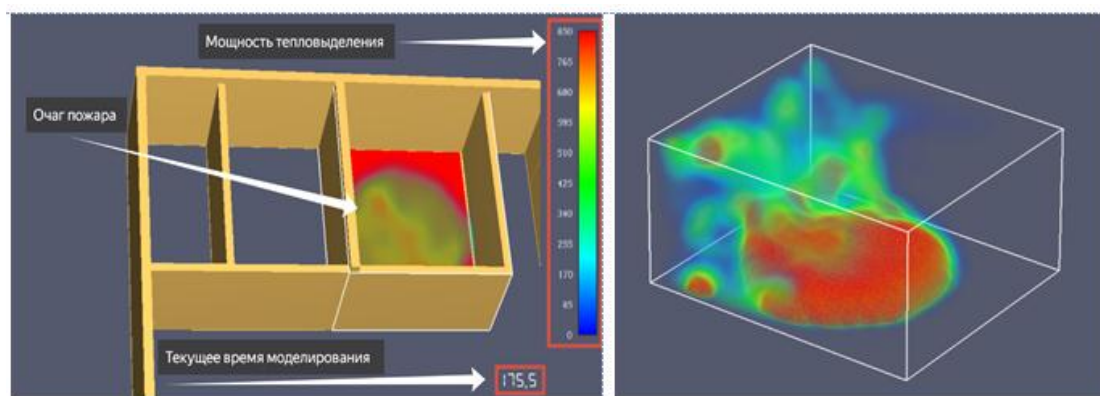
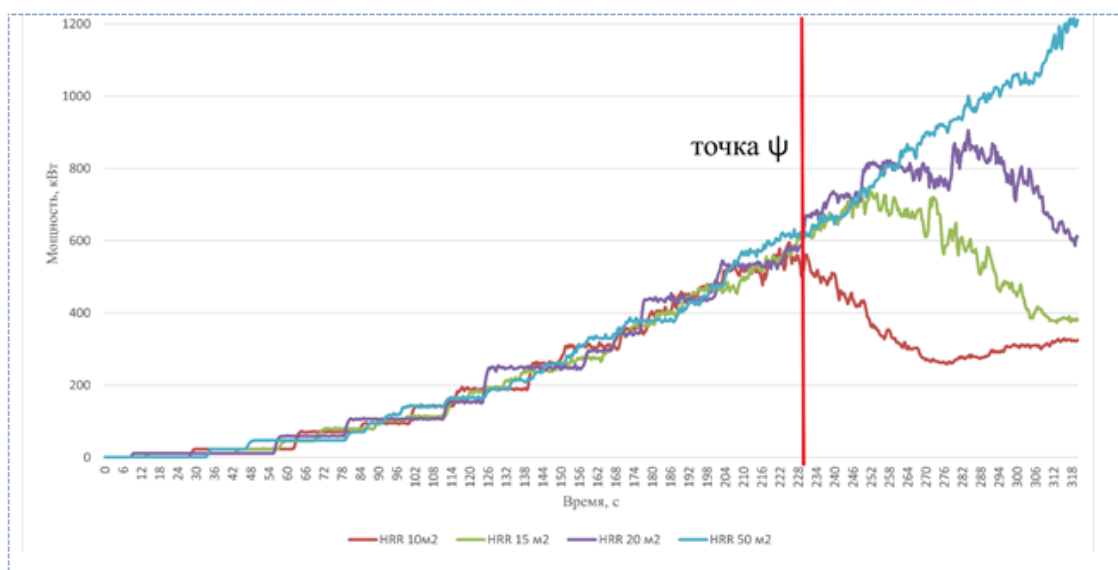
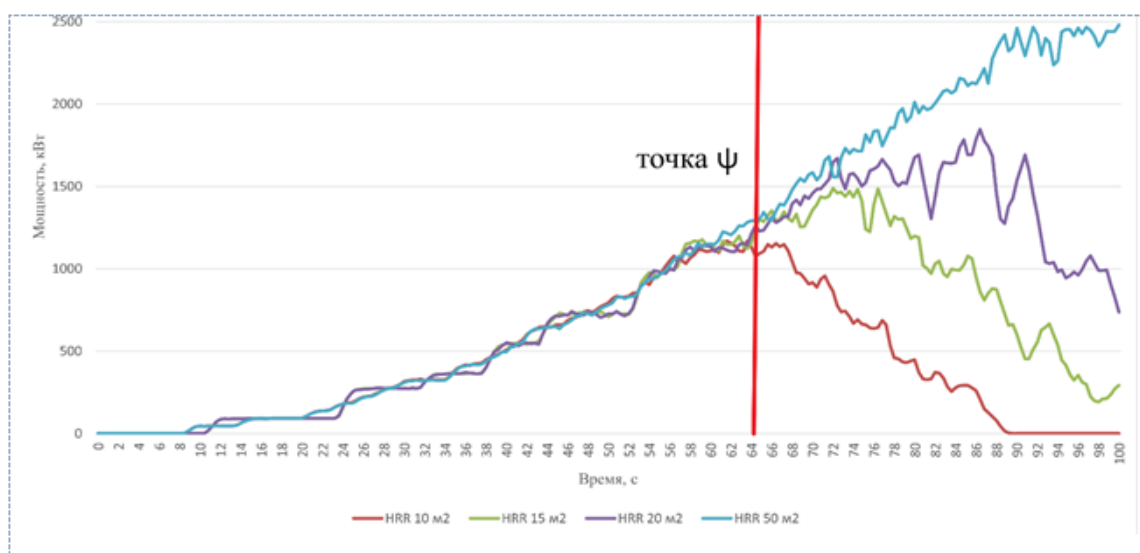


Рис. 2. Визуализация динамики МТВ в программе Smokeview

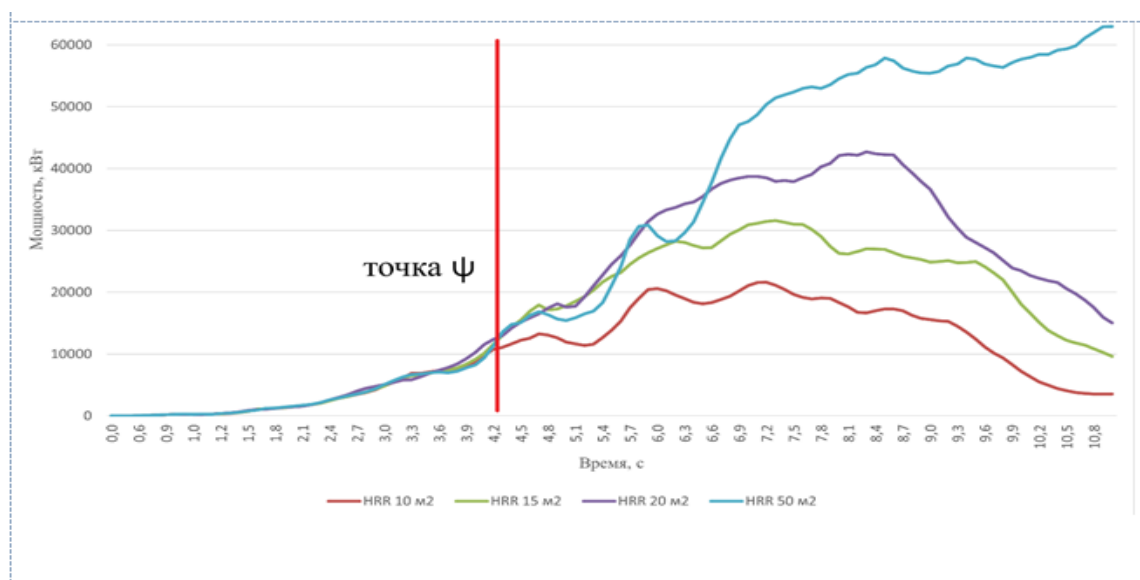
По результатам моделирования для справочной пожарной нагрузки в программном продукте Pyrosim были построены диаграммы изменения МТВ от времени (рис. 3).



а) административное помещение судна



б) грузовое помещение



в) машинно-котельное отделение судна

Рис. 3. Диаграмма мощности тепловыделения

Таблица 3

МТВ при достижении точки ψ (сценарий № 1)

Функциональное назначение судна	Площадь помещения, м ²	Точка ψ , с	МТВ, кВт	Среднее значение МТВ, кВт
Административное помещение судна	10 м ²	228,0	560	578
	15 м ²		582	
	20 м ²		570	
	50 м ²		602	
Грузовое помещение	10 м ²	64,0	1170	1173
	15 м ²		1121	
	20 м ²		1143	
	50 м ²		1259	
МКО	10 м ²	4,2	10731	11497
	15 м ²		11571	
	20 м ²		12356	
	50 м ²		11333	

При анализе экспериментальных данных было установлено, что на начальной стадии развития пожара во всех административных помещениях (рис. 3 а, табл. 3) наблюдалось экспоненциальное увеличение МТВ до момента достижения точки ψ ($t = 228$ с). Средняя МТВ при достижении точки ψ при пожаре в административных помещениях независимо от площади помещения составляет 578 кВт.

Анализ данных моделирования для грузовых помещений (рис. 3 б, табл. 3) позволил установить схожую закономерность развития МТВ во временном интервале. Развитие пожара в грузовом помещении сопровождалось выделением большей МТВ, что обусловлено заданной пожарной нагрузкой при моделировании пожара. Точка ψ была достигнута на 64 с со средней МТВ 1173 кВт, что в 3,5 раза быстрее и 2 раза выше МТВ, чем при пожаре в административном помещении судна.

Моделирование пожара в МКО (рис. 3 в, табл. 3) позволило выявить интенсивное развитие процесса горения с высокими значениями МТВ, что типично для горения проливов ЛВЖ. Точка ψ была зафиксирована на отметке 4,2 с, где средняя МТВ составила 11 497 кВт.

Проведенное комплексное численное моделирование развития пожара в помещениях судна различного функционального назначения (административные, грузовые помещения, машинно-котельные отделения) с вариацией очагов пожара на разной площади помещений позволило установить закономерности и сделать следующие выводы:

- до достижения точки ψ МТВ выделяется равномерно независимо от площади помещения. Далее увеличение площади приводит к росту пиковой МТВ и сдвигу момента её достижения на более поздние временные отметки (после преодоления точки ψ). Однако динамика процесса принципиально различается в зависимости от свойств пожарной нагрузки;

- развитие пожара в административных помещениях носит наиболее протяженный и инерционный характер. Рост МТВ плавный, с длительной фазой развития. Наблюдается выраженная фаза спада после достижения пика, что характерно для горения твердых материалов. Пиковые значения МТВ относительно низкие (562–1 488 кВт);

- в грузовых помещениях процесс развивается существенно быстрее. Анализ данных МТВ позволил выявить процесс самозатухания (сразу после достижения точки ψ) в помещении малого объема (10 м²) на отметке $t = 90$ с. Это прямо указывает на переход горения в режим, лимитированный концентрацией кислорода, в условиях замкнутого объема. Пиковые значения МТВ (1 170–2 664 кВт) превышают показатели административных помещений, что, связано с использованием более энергоемких горючих материалов (древесины, картона и полистирола) свойственных при транспортировке в грузовых помещениях;

- в МКО выявлен иной сценарий развития пожара, характерный для горения ЛВЖ. Процесс характеризуется высокими значениями МТВ (до 63 МВт). Рост МТВ кратно превышает показатели других помещений. В данном случае необходимо применять огнетушитель для ликвидации пожара при локальных проливах ЛВЖ.

Экспериментально подтверждено, что на начальной стадии развития пожара рост МТВ происходит равномерно независимо от площади помещения, где развивается пожар до наступления точки ψ во времени. Следовательно, на начальной стадии развития пожара до момента достижения точки ψ независимо от площади помещения, где происходит пожар, может применяться огнетушитель одного типоразмера, исходя из его теплопоглощающей способности [4].

Результаты моделирования и анализ полученных данных сценария № 2

В рамках второго сценария проведено компьютерное моделирование развития пожара с использованием расчетных параметров реакций горения, соответствующих удельной пожарной нагрузке судовых помещений. Моделирование осуществлялось в восьми служебно-бытовых различной площади (табл. 2, 4).

На основании данных, представленных судостроительными заводами (табл. 1), исходя из массы и процентного соотношения горючих материалов была получена расчетная пожарная

нагрузка и реакции горения с выделением газовых продуктов разложения и потребления кислорода для каждого судового помещения (табл. 4), которые были применены в качестве входных данных для каждого очага пожара в программном продукте Pyrosim.

Таблица 4

Расчетные значения параметров реакций (входные данные)

Помещение судна	Данные для PyroSim									
	Молярная масса, г/моль	Низшая теплота сгорания, Дж/кг	Потребление O ₂ , %	Выделение CO ₂ , %	Выделение CO, %	Выделение C, %	Выделение HCl, %	Выделение N ₂ , %	Выделение H ₂ O, %	Линейная скорость распространения пламени, м/с.
Каюта № 416	92,95	16,52	3,23	2,04	0,48	0,20	0,00	12,14	5,05	0,012
Гостиная № 401	93,42	17,07	3,24	1,87	0,52	0,21	0,00	12,15	5,41	
Каюта № 301	93,22	16,88	3,24	1,95	0,50	0,21	0,00	12,18	5,26	
SPA-центр	92,24	18,07	3,40	1,78	0,52	0,20	0,00	12,75	5,89	
Каюта № 228	93,08	16,59	3,24	2,05	0,48	0,20	0,00	12,18	5,05	
Ресторан	92,45	17,89	3,40	1,86	0,52	0,20	0,00	12,74	5,70	0,012
Рулевая рубка	90,13	17,06	2,83	1,61	0,62	0,25	0,04	10,64	5,17	
Сигарная	92,57	17,84	3,37	1,81	0,52	0,20	0,00	12,64	5,75	

Время моделирования пожара принято равным 400 с для каждого помещения. Характеристики пожара для моделирования в Pyrosim приведены на рис. 4.

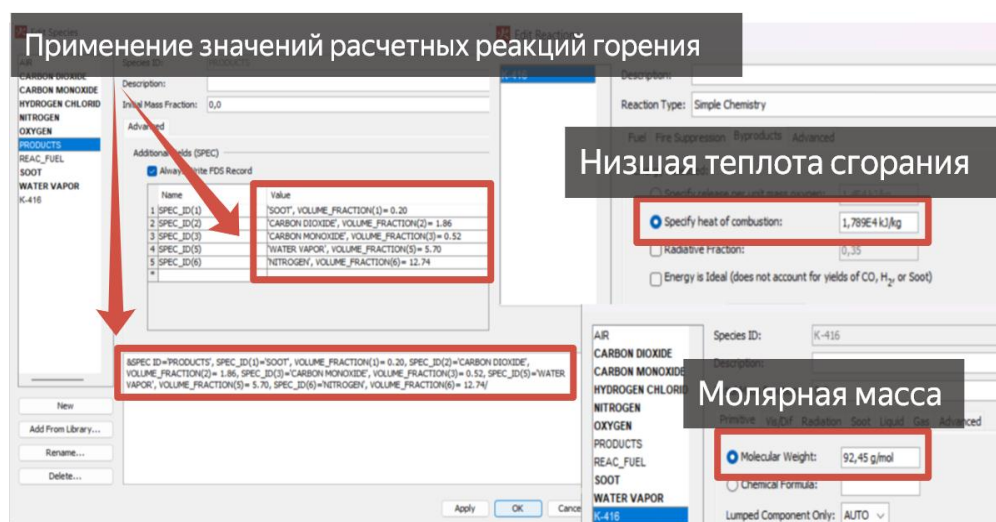


Рис. 4. Применение расчетных значений реакций горения (входные данные) в программном продукте Pyrosim

Для пожарной нагрузки, приведенной в табл. 1, в программном продукте Pyrosim были получены данные для диаграмм МТВ (рис. 5).

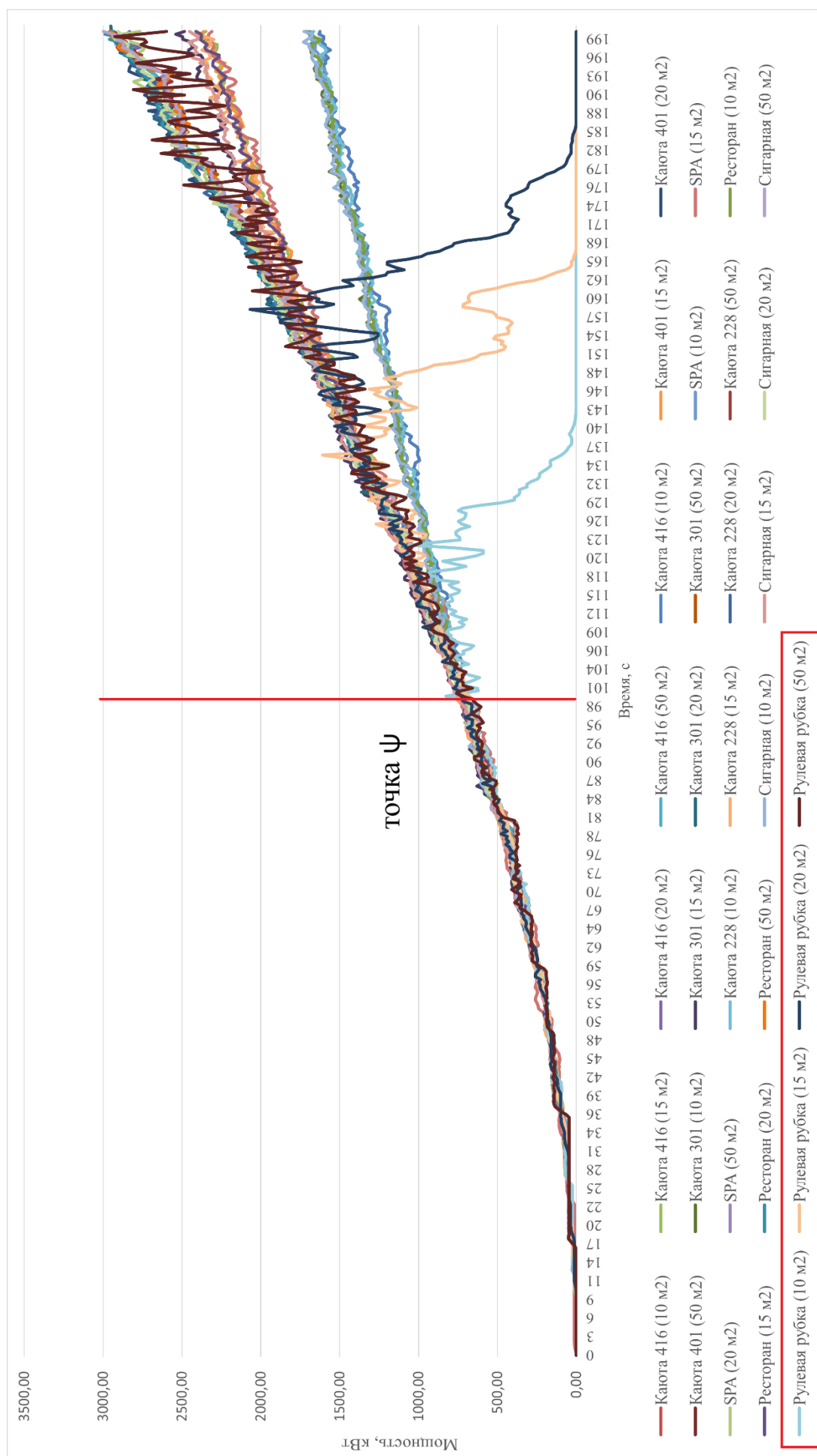


Рис. 5. Диаграмма мощности тепловыделения помещений, где применялись расчетные значения реакций горения

Таблица 5

Карта мощности тепловыделения из очага пожара судовых помещений

Помещение судна	Мощность тепловыделения из очага пожара, кВт															
	100				300				500				1000			
	Площадь судового помещения, м ²															
	10	15	20	50	10	15	20	50	10	15	20	50	10	15	20	50
Время, с																
Каюта № 416	41,2	38,9	37,3	37,3	62,4	64,0	65,2	65,9	83,6	83,3	82,5	83,3	128,8	118,4	116,0	116,8
Гостиная № 401	37,6	38,8	37,6	37,1	64,0	64,8	63,6	66,8	83,7	82,9	83,3	81,9	129,6	119,2	115,2	118,1
Каюта № 301	36,4	36,4	37,6	37,0	62,8	62,8	63,2	66,4	83,6	82,8	83,2	82,1	127,6	114,0	114,4	118,0
SPA-центр	37,7	34,0	39,3	37,2	64,0	66,4	64,4	66,7	82,8	83,2	82,8	82,0	128,0	116,8	116,0	117,4
Каюта № 228	38,0	37,7	38,0	37,2	63,6	62,4	64,1	65,9	83,6	83,2	84,0	82,0	127,7	116,0	115,6	117,2
Ресторан	36,9	38,8	37,6	37,4	62,9	62,0	63,2	66,8	83,3	82,0	83,7	81,7	128,0	117,6	115,2	118,0
Рулевая рубка	41,6	38,0	39,7	37,3	63,2	64,0	64,0	66,9	84,4	84,0	84,4	81,3	–	116,9	115,6	118,4
Сигарная	37,6	36,0	38,0	36,8	62,8	64,0	63,6	67,1	83,6	81,6	83,6	82,4	128,0	113,2	115,6	117,6
СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ	38,38	37,33	38,14	37,16	63,21	63,80	63,91	66,56	83,58	82,88	83,44	82,09	128,24	116,51	115,45	117,69

Анализируя данные МТВ (рис. 5, табл. 5, 6) точка ψ была зафиксирована в диапазоне времени 99,6–101,6 с для заданных помещений со средней МТВ 727,7 кВт. Независимо от площади помещения, где развивается пожар, зарегистрировано равномерное повышение МТВ до момента достижения точки ψ . Исключением является пожар в помещениях рулевой рубки, где точка ψ была достигнута на 61,6 с, МТВ составила – 268 кВт. Динамика развития пожара в помещениях рулевой рубки существенно выше относительно других помещений, заданных при моделировании сценария № 2. Данный факт обусловлен выделением хлороводорода при термическом разложении материалов, содержащих поливинилхлорид.

Таблица 6

МТВ при достижении точки ψ (сценарий № 2)

Функциональное назначение судна	Площадь помещения, м ²	Точка ψ , с	МТВ, кВт	Среднее значение МТВ, кВт
Каюта № 416	10 м ²	101,0	720	731
	15 м ²		750	
	20 м ²		736	
	50 м ²		721	
Гостиная № 401	10 м ²	100,9	725	725
	15 м ²		736	
	20 м ²		722	
	50 м ²		717	
Каюта № 301	10 м ²	99,6	729	723
	15 м ²		731	
	20 м ²		719	
	50 м ²		716	
SPA-центр	10 м ²	100,4	719	727
	15 м ²		729	
	20 м ²		734	
	50 м ²		727	
Каюта № 228	10 м ²	101,6	738	740
	15 м ²		751	
	20 м ²		745	
	50 м ²		727	
Ресторан	10 м ²	99,6	729	719
	15 м ²		717	
	20 м ²		709	
	50 м ²		720	
Сигарная	10 м ²	99,6	726	729
	15 м ²		756	
	20 м ²		716	
	50 м ²		719	
Рулевая рубка	10 м ²	61,6	270	268
	15 м ²		264	
	20 м ²		263	
	50 м ²		277	

Соответственно, для эффективного оснащения объекта защиты огнетушителями необходимо учитывать функциональное назначение помещения, основываясь на удельной пожарной нагрузке, площади данного помещения и типоразмере огнетушителя, исходя из мощности его теплопоглощающей способности.

$$\psi = \frac{Q_{\text{помещения}} \cdot S}{W_{\text{теплопоглощения}}},$$

где ψ – временной интервал, до которого целесообразно применение огнетушителя данного типоразмера исходя из мощности тепловыделения защищаемого помещения, с; $Q_{\text{помещения}}$ –

удельная пожарная нагрузка помещения, кДж/м²; S – площадь помещения, м²; $W_{\text{тепопоглощения}}$ – мощность теплопоглощения огнетушителя, кДж/с.

Точка ψ – это временной интервал, при котором МТВ очага пожара достигает величины, соответствующей максимальной эффективной мощности теплопоглощения выбранного типоразмера огнетушителя, но не позднее момента перехода к устойчивому развитию пожара.

Заключение

В целях повышения эффективности применения ПСП на судах и разработки методики оснащения судов огнетушителями необходим иной подход параметризации огнетушителей. Оснащать объекты защиты огнетушителями исходя из площади помещения и его функционального назначения является недостаточным. Необходимо классифицировать помещения объекта исходя из теплофизических характеристик пожарной нагрузки и огнетушащего вещества, то есть по мощности тепловыделения и теплопоглощения [5, 6]. Также необходимо учитывать места размещения огнетушителей на объекте. Ранее авторами была проведена серия натурных испытаний по определению скорости движения людей с огнетушителями различного типоразмера [14, 15]. Для каждого типоразмера огнетушителя были определены поправочные коэффициенты, учитывающие влияние массы и габаритов огнетушителя на человека. Полученные расчетно-экспериментальные значения и коэффициенты были апробированы в программных продуктах^{7,8} [16].

Список источников

1. Кожевин Д.Ф., Естехин В.Г. Оценка эффективности применения огнетушителей на водном транспорте // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 4 (64). С. 8–20. EDN HGIURY.
2. Шаратов С.В., Крутолапов А.С., Копейкин Н.Н. Анализ информации о пожарах на судах и о практике их тушения в портах // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 1. С. 52–60.
3. Анализ нормативных требований к огнетушителям, размещаемым на судах / Д.Ф. Кожевин [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3. Ч. 1. С. 170–178.
4. Кожевин Д.Ф. Концепция перспективного развития первичных средств порошкового пожаротушения // Безопасность жизнедеятельности. 2022. № 7 (259). С. 44–50. EDN ZDKCDW.
5. Абдурагимов И.М. О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 4. С. 60–82. EDN OZZUSH.
6. Кожевин Д.Ф. Обоснование механизма огнетушащего действия порошка на основании анализа его фракционного состава в нестационарном газопорошkovом потоке // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 175–189. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-175-189
7. The Mathematical Model Based on the Parameters of Simulation Results Predicts the Fire Extinguishing Resource Demand of Naval Fires / Guo Jingjing [et al.] // Journal of Applied Sciences, Appl. Sci. 2024. № 14 (21). DOI: 10.3390/app142110038
8. Yuechao Zhao, Dihao Ai Numerical Simulation Study on the Response of Ship Engine Room Structure Under Fire Based on Thermo-Mechanical Coupling Model // Fire. 2024. № 7 (12). P. 480. DOI: 10.3390/fire7120480
9. Ioanna A. Koromila, Kostas J. Spyrou Design Fire Methodology for Vehicle Spaces Onboard Ships // Journal Fire Technology. 2023. № 59. P. 1725–1759.

⁷ Программа Pathfinder – расчет времени эвакуации людей

⁸ Программа Pyrosim – полевая модель пожара.

10. Research on the Risk Classification of Cruise Ship Fires Based on an Attention-Bp Neural Network / X. Zhenghua [et al.] // Polish Maritime Research. № 29 (3) P. 61–68. DOI: 10.2478/pomr-2022-0026
11. Han Zhang. Numerical simulation of fire Incidents in ship compartments // Frontiers in Science and Engineering. № 3 (8). P. 53–59. DOI: 10.54691/fse.v3i8.5527
12. Jian He Zhao, Ye Gao, Hong Mei Wu Numerical simulation and research of pool fire suppressed by water mist in the engine room of a ship // Applied Mechanics and Materials. № 29–32. P. 651–657. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.29-32.651
13. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров [и др.]. М.: Академия ГПС МЧС России, 2000. 119 с.
14. Естехин В.Г. Влияние способа транспортировки на скорость доставки огнетушителей к месту пожара на судах // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1 (54). С. 35–45.
15. Кожевин Д.Ф., Естехин В.Г. Определение параметров движения людей при доставке огнетушителей к очагу пожара на объектах водного транспорта // Пожарная безопасность. 2025. № 1 (118). С. 39–49. EDN DZESQM. DOI: 10.37657/vniipro.pb.2025.118.1.003
16. Кожевин Д.Ф., Естехин В.Г. Моделирование движения людей с отягощением в виде огнетушителя на объектах транспортной инфраструктуры // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2025. № 3. С. 42–51.

References

1. Kozhevin D.F., Estekhin V.G. Ocenka effektivnosti primeneniya ognetushitelej na vodnom transporte // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 4 (64). S. 8–20. EDN HGIURY.
2. Sharapov S.V., Krutolapov A.S., Kopejkin N.N. Analiz informacii o pozharah na sudah i o praktike ih tusheniya v portah // Pozharovzryvobezopasnost'. 2017. T. 26. № 1. S. 52–60.
3. Analiz normativnyh trebovanij k ognetushitel'nyh, razmeshchaemym na sudah / D.F. Kozhevin [i dr.] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 3. Ch. 1. S. 170–178.
4. Kozhevin D.F. Konceptiya perspektivnogo razvitiya pervichnyh sredstv poroshkovogo pozharotusheniya // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2022. № 7 (259). S. 44–50. EDN ZDKCDW.
5. Abduragimov I.M. O mekhanizmah ognetushashchego dejstviya sredstv pozharotusheniya // Pozharovzryvobezopasnost'. 2012. T. 21. № 4. S. 60–82. EDN OZZUSH.
6. Kozhevin D.F. Obosnovanie mekhanizma ognetushashchego dejstviya poroshka na osnovanii analiza ego frakcionnogo sostava v nestacionarnom gazoporoshkovom potoke // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 1 (73). S. 175–189. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-175-189
7. The Mathematical Model Based on the Parameters of Simulation Results Predicts the Fire Extinguishing Resource Demand of Naval Fires / Guo Jingjing [et al.] // Journal of Applied Sciences, Appl. Sci. 2024. № 14 (21). DOI: 10.3390/app142110038.
8. Yuechao Zhao, Dihao Ai Numerical Simulation Study on the Response of Ship Engine Room Structure Under Fire Based on Thermo-Mechanical Coupling Model // Fire. 2024. № 7 (12). P. 480. DOI: 10.3390/fire7120480
9. Ioanna A. Koromila, Kostas J. Spyrou Design Fire Methodology for Vehicle Spaces Onboard Ships // Journal Fire Technology. 2023. № 59. P. 1725–1759.
10. Research on the Risk Classification of Cruise Ship Fires Based on an Attention-Bp Neural Network / X. Zhenghua [et al.] // Polish Maritime Research. № 29 (3) P. 61–68. DOI: 10.2478/pomr-2022-0026
11. Han Zhang. Numerical simulation of fire Incidents in ship compartments // Frontiers in Science and Engineering. № 3 (8). P. 53–59. DOI: 10.54691/fse.v3i8.5527
12. Jian He Zhao, Ye Gao, Hong Mei Wu Numerical simulation and research of pool fire suppressed by water mist in the engine room of a ship // Applied Mechanics and Materials. № 29–32. P. 651–657. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.29-32.651
13. Prognozirovanie opasnyh faktorov pozhara v pomeshchenii: ucheb. posobie / Yu.A. Koshmarov [i dr.]. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2000. 119 s.

14. Estekhin V.G. Vliyanie sposoba transportirovki na skorost' dostavki ognetushitelej k mestu pozhara na sudah // *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*. 2025. № 1 (54). S. 35–45.
15. Kozhevin D.F., Estekhin V.G. Opredelenie parametrov dvizheniya lyudej pri dostavke ognetushitelej k ochagu pozhara na ob"ektah vodnogo transporta // *Pozharnaya bezopasnost'*. 2025. № 1 (118). S. 39–49. EDN DZESQM. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2025.118.1.003
16. Kozhevin D.F., Estekhin V.G. Modelirovanie dvizheniya lyudej s otyagoshcheniem v vide ognetushitelya na ob"ektah transportnoj infrastruktury // *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya*. 2025. № 3. S. 42–51.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 08.11.2025; одобрена после рецензирования: 26.01.2026;
принята к публикации: 02.03.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 08.11.2025; approved after review: 26.01.2026;
accepted for publication: 02.03.2026

Информация об авторах:

Кожевин Дмитрий Федорович, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru, SPIN-код: 9647-7196

Естехин Виталий Геннадьевич, заместитель начальника факультета инженерно-технического Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149), e-mail: estekhin@inbox.ru, SPIN-код: 2770-8682

Information about authors:

Kozhevin Dmitrii F., chief of the physical and chemical bases of the burning and extinguishing processes department of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru, SPIN: 9647-7196

Estekhin Vitalii G., deputy head of the faculty of engineering and technical of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: estekhin@inbox.ru, SPIN: 2770-8682

Научная статья

УДК 614.841.48; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-145-155

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

✉Астахина Юлия Анатольевна;

Королева Людмила Анатольевна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉yulya_astahina@mail.ru

Аннотация. В условиях стремительного внедрения электромобилей в повседневную жизнь общества возникает потребность в системной оценке их пожарной опасности на этапе выбора, особенно в ситуации ограниченной статистики реальных инцидентов. В статье предложена оригинальная методика сравнительной оценки пожарной опасности транспортных средств с разными типами силовых установок – электромобилей, автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, гибридных электромобилей. Данная работа подтверждает, что методы многокритериального анализа решений (метод анализа иерархий, метод простого аддитивного взвешивания) позволяют теоретически оценивать возможные негативные последствия даже при отсутствии статистических данных, создавая основу для принятия обоснованных решений.

Ключевые слова: электромобиль, статистика, метод анализа иерархий, метод простого аддитивного взвешивания, многокритериальный анализ

Для цитирования: Астахина Ю.А., Королева Л.А. Многокритериальная оценка пожарной опасности автомобилей с разными типами силовых установок в условиях недостатка статистических данных // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 145–155. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-145-155

Scientific article

MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF THE FIRE HAZARD OF VEHICLES WITH DIFFERENT TYPES OF POWER PLANTS IN THE CONTEXT OF A LACK OF STATISTICAL DATA

✉Astahina Yulia A.;

Koroleva Lyudmila A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉yulya_astahina@mail.ru

Abstract. With the rapid introduction of electric vehicles into everyday life, there is a need for a systematic assessment of their fire hazard at the selection stage, especially given limited statistics on actual incidents. This article proposes an original method for comparatively assessing the fire hazard of vehicles with different powertrain types – electric vehicles, vehicles with internal combustion engines, and hybrid electric vehicles. This study confirms that multicriteria decision analysis methods (analytic hierarchy process, simple additive weighting) allow for theoretical assessment of potential negative consequences even in the absence of statistical data, creating a basis for informed decision-making.

Keywords: electric vehicle, statistics, analytic hierarchy process, simple additive weighting method, multicriteria analysis

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

For citation: Astahina Yu.A., Koroleva L.A. Multi-criteria assessment of the fire hazard of vehicles with different types of power plants in the context of a lack of statistical data // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 145–155. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-145-155

Введение

Пожарная безопасность транспортных средств (ТС) представляет собой одну из важнейших составляющих обеспечения общественной безопасности, особенно в свете быстрой трансформации автомобильной отрасли, которая наблюдается в последние годы. С внедрением новых технологий и электрификацией транспорта на первый план выходят не только экологические и экономические вопросы целесообразности, а также детально изучается их поведение в аварийных и экстремальных ситуациях, включая пожароопасные состояния.

Одной из наиболее распространенных причин возгорания автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) является нарушение правил устройства и эксплуатации ТС¹.

Появление электромобилей сформировало дополнительную область вопросов их пожаробезопасной эксплуатации. Электромобили оснащены литий-ионными аккумуляторами, способными поддерживать тепловой разгон. Это означает, что в случае перегрева, повреждения аккумулятора и других негативных воздействий может произойти неконтролируемое возгорание, которое будет сложно потушить [1–3].

В дополнении, рассматривая гибридные электромобили, объединяющие в себе ДВС и электрическую силовую установку, отмечается следующее: помимо приобретенных опасностей, свойственных обоим типам ТС, дополнительно добавляются сложности, связанные с взаимодействием компонентов двух разных систем. Следовательно, есть вероятность новых непредсказуемых ситуаций, которые будут требовать особого внимания от производителей и пользователей [4].

В настоящее время существуют общественные опасения, сопряженные с вероятностью возгорания и взрыва электромобилей. Однако некоторые исследования опровергают эти беспокойства, показывая, что электромобили в реальности горят реже, чем автомобили с ДВС [5, 6].

Австралийская компания EV FireSafe, осуществляющая работу по сбору данных о возгораниях электромобилей по всему миру, опубликовала информацию за период с 2010 г. по июнь 2023 г. За это время было зарегистрировано около 400 подтвержденных случаев возгорания аккумуляторов в электромобилях, что значительно меньше количества возгораний автомобилей с ДВС².

Управление социальной защиты и готовности Швеции (MSB) опубликовало информацию о 24 возгораниях электромобилей за 2022 г., что составило всего 0,004 % от 611 000 электромобилей в стране на тот момент. В сравнении (с аналогичным периодом) для автомобилей, работающих на бензине или дизельном топливе, уровень возгораний составил 0,08 %³.

Необходимо отметить, что за 2024 г. в Российской Федерации отсутствует официальная статистика, касающаяся причин и обстоятельств возгораний электромобилей. Существующие эмпирические данные носят фрагментарный характер и часто основываются на отчетах средств массовой информации или единичных расследованиях отдельных инцидентов.

¹ Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: информ.-аналит. сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. 80 с.

² How common are electric car fires? Consumer Affairs Journal of consumer research. 2024. 25 июля. URL: <https://www.consumeraffairs.com/automotive/electric-car-fire-statistics.html#how-common-are-electric-car-fires> (дата обращения: 01.11.2025).

³ Там же

Современный транспортный парк Российской Федерации характеризуется возрастающим разнообразием силовых установок. Каждый тип установки обладает отличительными физико-химическими и эксплуатационными характеристиками, определяющими особенности возникновения и развития пожара. Разработка обоснованных мер по обеспечению пожарной безопасности автотранспорта невозможна без точного установления причин и обстоятельств возникновения пожара. Ключевым этапом решения данной задачи является применение методов оценки пожарной опасности ТС.

Цель статьи – оценить возможность применения многокритериальной оценки пожарной опасности автомобилей с разными типами силовых установок в условиях недостатка статистических данных.

Методы исследования

Для комплексной оценки и сравнительного анализа пожарной опасности ТС, использующих традиционные и альтернативные источники энергии, в работе применяется метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Саати [7] и метод простого аддитивного взвешивания (SAW) [8].

МАИ получил широкое распространение в решении задач промышленного планирования, банковской деятельности, проектирования технических систем и ядерной энергетики [7], также был успешно применен для оценки пожаровзрывобезопасности ТС на газообразном топливе [9], оценки частоты инициирующих пожароопасные ситуации событий для подземных емкостей автомобильной газозаправочной станции [10], при выборе противопожарной техники [11]. Ключевым преимуществом данного подхода является возможность поддержки принятия компромиссных решений в условиях многокритериальности, позволяющая учитывать, как формализуемые, так и неформализуемые факторы при отсутствии явных аналитических зависимостей между ними [7].

Классической версией метода многокритериальной оценки является метод SAW, активно применяемый в логистике, здравоохранении, экологии и инженерии [8]. Реализация метода заключается в представлении «функции ценности, которая устанавливается на основе простого сложения баллов, представляющих достижение цели по каждому критерию, умноженных на соответствующие веса» [12].

Оба метода основаны на многоаспектной оценке и используют взвешенную сумму для агрегации критериев, однако расчетные методики отличаются, поэтому сопоставление результатов способствует выявлению искажений и ошибок.

Результаты исследования и их обсуждение

Недостаток данных о возгораниях некоторых категорий ТС требует проведения сравнительного анализа основных типов легковых автомобилей – электрического, гибридного и автомобиля с ДВС. Сопоставление можно проводить по разным критериям: по анализу технических характеристик, по оценке влияния на окружающую среду, экономику и общество. Значительный интерес представляет оценка пожарной опасности при их эксплуатации.

Анализ литературных источников [1, 2, 13] и изучение материалов расследований по фактам произошедших пожаров на электротранспорте позволили установить процентное распределение причин возгорания электромобилей: 36 % – погружение в воду; 19 % – столкновение (в результате дорожно-транспортного происшествия (ДТП)); 17 % – зарядка; 17 % – парковка; 7 % – движение; 4 % – акт вандализма и разработать критерии, отражающие состояние ТС в момент начала его возгорания (рис. 1).

Представленные данные позволяют идентифицировать потенциально пожароопасные состояния электромобилей. Однако комплексная оценка пожарной опасности ТС на традиционном и альтернативном топливе на основе указанных критериев требует

дальнейшего изучения. Первым методом, примененным для проведения многокритериальной оценки пожарной опасности автомобилей с разными типами силовых установок в условиях недостаточности статистических данных, был МАИ.

На первом этапе МАИ строится иерархическая структура, которая состоит из цели, критериев и альтернатив (рис. 1).



Рис. 1. Декомпозиция задачи в иерархию

Графическое представление способствует лучшему пониманию решаемой задачи.

Вторым этапом определяются приоритеты критериев и альтернатив. Исходная информация для расчета приоритетов собиралась в ходе опроса 25 экспертов и обрабатывалась математически. В состав экспертной группы вошли специалисты, обладающие компетенциями в области пожарно-технической экспертизы и технической эксплуатации автомобилей. Элементы иерархии экспертами сравнивались попарно по отношению к их влиянию на общую для них характеристику по шкале от 1 до 9 [7], результаты записывались в виде обратно симметричной матрицы.

Обратно симметричной матрицей является квадратная матрица, в которой элементы, симметричные относительно главной диагонали являются взаимно обратными величинами (табл. 1) [7]. Обратная симметричность – необходимое условие логической непротиворечивости экспертных суждений в рамках МАИ.

Таблица 1

Пример заполнения матрицы попарных сравнений критериев одного из экспертов

цель	погружение	столкновение (ДТП)	зарядка (заправка)	парковка	движение
погружение	1	1/7	1/7	9	7
столкновение (ДТП)	7	1	1/8	9	9
зарядка (заправка)	7	8	1	9	8
парковка	1/9	1/9	1/9	1	1/6
движение	1/7	1/9	1/8	6	1

Фактически приоритеты представляют собой относительные веса, которые могут принимать значения от 0 до 1. Чем больше величина приоритета, тем наиболее существенным является соответствующий ему элемент иерархии. Итоговые результаты расчета приоритетов приведены на рис. 2.

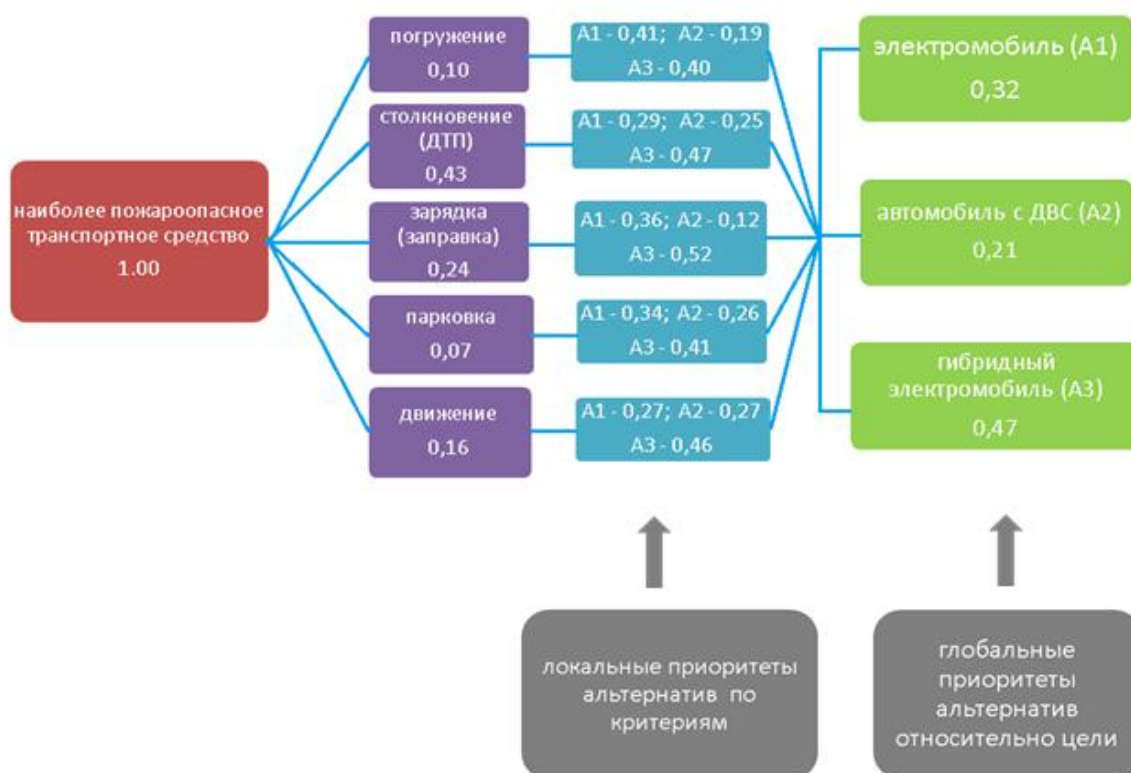


Рис. 2. Перекрестный граф проблемы

Третьим этапом МАИ определяется индекс согласованности (ИС) и отношения согласованности (ОС).

В МАИ все суждения отражают субъективные мнения экспертов, и сравнение элементов, которые имеют количественные эквиваленты, могут быть несогласованными из-за наличия погрешности. В методике расчета предусмотрен способ оценки степени согласованности полученных результатов. Проверка ограниченности оценки приоритетов методом вычисления ИС осуществляется по формуле:

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

где n – размерность матрицы, $\lambda_{\max}$ – собственное значение матрицы.

Далее вычисляется ОС по формуле:

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СС}},$$

где СС – значение случайной согласованности, получаемое при сравнении ИС с той величиной, которая получилась бы при случайном выборе суждений по фундаментальной шкале (1...10) для заданного значения [7, 14].

Величина ОС должна быть в пределах от 0 до 0,1, чтобы данными можно было воспользоваться для расчета. Если ОС выходит за эти пределы, то экспертам нужно предложить перепроверить свои суждения.

На заключительном этапе МАИ определяются альтернативы с наибольшим глобальным приоритетом, то есть наилучшие решения.

Использование МАИ позволило провести комплексную оценку пожарной опасности рассматриваемых ТС. Полученные системные оценки составили: 0,32 для электромобилей, 0,21 для автомобилей с ДВС, 0,47 для гибридных электромобилей (рис. 3 а, б).

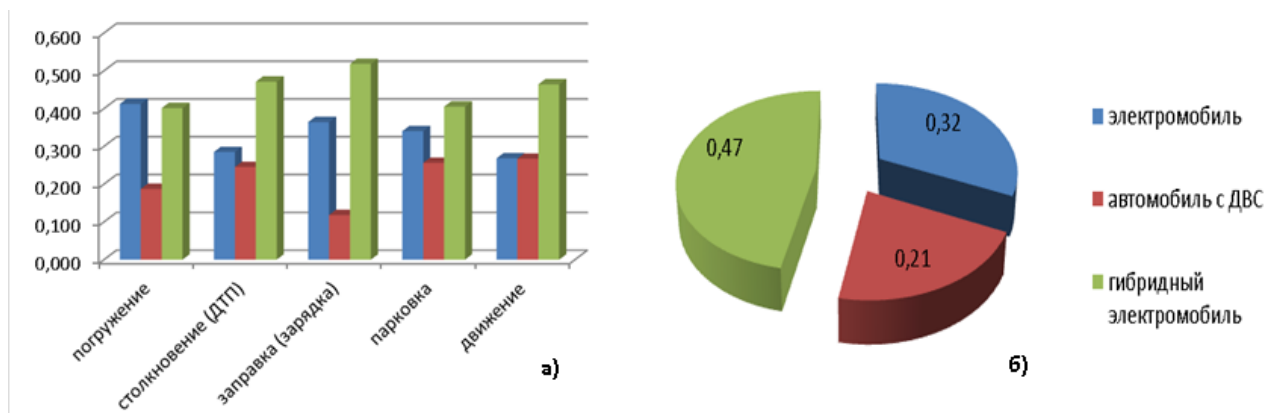


Рис. 3. Графическое представление итоговых результатов, полученных МАИ

Таким образом, в рамках использования МАИ уровень пожарной опасности электромобилей превышает аналогичный показатель для автомобилей с ДВС, но не достигает значений, характерных для гибридного транспорта.

Наибольший уровень пожарной опасности при эксплуатации электромобилей, согласно результатам расчетной оценки, связан со следующими сценариями: погружением в воду и зарядкой. Для ТС в целом наиболее опасны столкновения (ДТП) и зарядка (заправка).

Наряду с МАИ для решения задач выбора в многокритериальной системе принятия решений использован SAW.

Первым этапом расчета является сбор экспертных оценок важности критериев и данных по альтернативам (от 25 экспертов по шкале от 0 до 10). После нормализации данных по важности критериев в веса были получены следующие показатели (табл. 2):

Таблица 2

Нормализация данных по важности критериев в веса (W_j)

критерий	значение
погружение	0,190
столкновение (ДТП)	0,367
зарядка (заправка)	0,253
парковка	0,089
движение	0,101
сумма	1,000

Результаты при усреднении средней оценки альтернатив по критериям представлены на диаграмме (рис. 4).

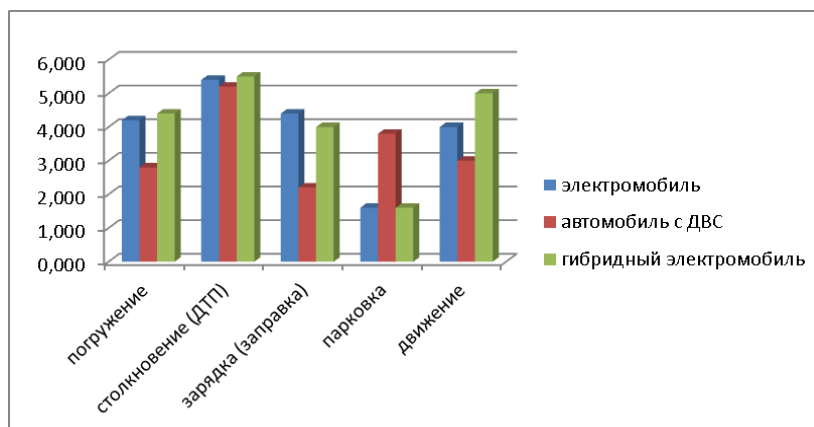


Рис. 4. Диаграмма усредненной средней оценки альтернатив по критериям

Вторым этапом проводится нормализация оценок альтернатив по критериям, так как происходит преобразование исходных оценок в безразмерные значения, чтобы они были сопоставимы между собой. Для критериев, подлежащих минимизации, нормализованные оценки рассчитываются по формуле (1), где наилучшая альтернатива будет соответствовать $r_{ij}=1$, наихудшая $r_{ij}=0$. Согласно специфике рассматриваемой темы все критерии будут минимизированы.

$$r_{ij} = \frac{\frac{\max_{k=1,\dots,m} x_{kj} - x_{ij}}{\max_{k=1,\dots,m} x_{kj} - \min_{k=1,\dots,m} x_{kj}}}{\frac{\max_{k=1,\dots,m} x_{kj} - \min_{k=1,\dots,m} x_{kj}}{\max_{k=1,\dots,m} x_{kj} - \min_{k=1,\dots,m} x_{kj}}}, \quad (1)$$

где r_{ij} – нормализованная оценка, x_{ij} – исходное значение, x_{kj} – значение k -й альтернативы по тому же критерию, $\frac{\max_{k=1,\dots,m} x_{kj}}{\max_{k=1,\dots,m} x_{kj} - \min_{k=1,\dots,m} x_{kj}}$ – максимальное значение по критерию C_j , $\frac{\min_{k=1,\dots,m} x_{kj}}{\max_{k=1,\dots,m} x_{kj} - \min_{k=1,\dots,m} x_{kj}}$ – минимальное значение по критерию C_j , m – число альтернатив, j – номер критерия, i – номер альтернативы.

Нормализованная матрица решений представлена в табл. 3.

Таблица 3

Минимизированная таблица значений

	погружение	столкновение (ДТП)	зарядка (заправка)	парковка	движение
электромобиль	0,125	0,333	0,000	1,000	0,500
автомобиль с ДВС	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000
гибридный электромобиль	0,000	0,000	0,182	1,000	0,000

Примечание: ячейки зеленого цвета обозначают высокий уровень соответствия (альтернатива по данному критерию является лучшим вариантом), ячейки желтого цвета обозначают низкий уровень соответствия (альтернатива по данному критерию является худшим вариантом).

Заключительным этапом в SAW является расчет итоговой суммарной оценки каждой альтернативы, учитывающей все критерии и их веса, по формуле (2). Предел достоверности $0 \leq S_i \leq 1$.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}. \quad (2)$$

Системные результаты многокритериального анализа с использованием SAW составили: 0,29 для электромобилей, 0,91 для автомобилей с ДВС, 0,135 для гибридных электромобилей (рис. 5). Ранжирование альтернатив полностью совпадает с итоговой оценкой МАИ.

Расчетная оценка пожарной опасности по данному методу показала, что наибольшую опасность для электромобилей также представляет погружение в воду и процесс зарядки. Наибольшую пожарную опасность для ТС в целом представляют столкновения (ДТП) и зарядка (заправка).

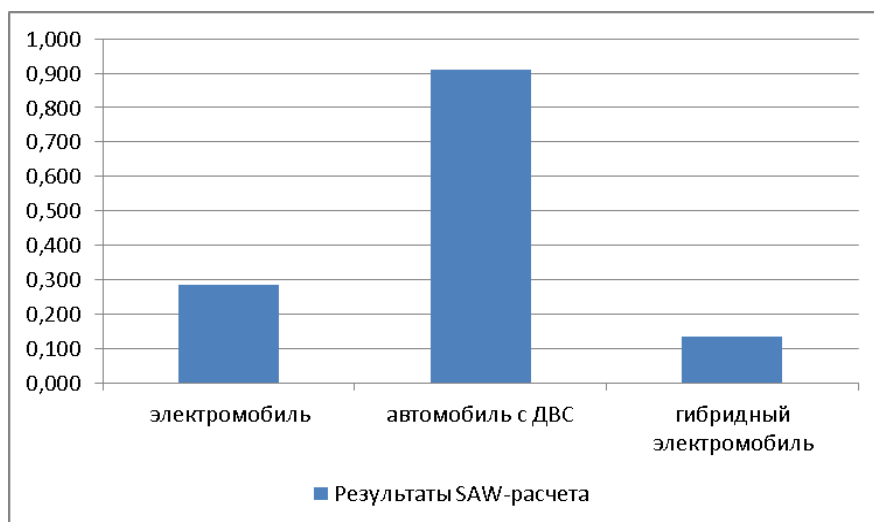


Рис. 5. Итоговая таблица результатов SAW

Провести интерпретацию полученных оценок можно следующим образом: с одной стороны, электромобили безопаснее гибридных ТС в плане вероятности возгорания из-за конструкционных особенностей. При возникновении пожара электромобили намного сложнее потушить в сравнении с автомобилями с ДВС. Трудность обуславливается несколькими ключевыми факторами: герметичностью аккумуляторного блока, ограниченной доступностью к нему, вероятностью взрыва и выделением токсичных продуктов горения.

Полученные результаты являются продолжением и развитием исследований Э. Бискарри [13], А. Дорша и М. Левандовски [15] по анализу и сопоставлению уровня пожарной опасности ТС с разными типами силовых установок.

Сопоставление результатов двух применимых методов выявило их взаимное подтверждение, несмотря на то, что они имеют принципиальные различия в структуре принятия решений и степени трудоемкости реализации. МАИ обеспечивает проверку согласованности экспертных оценок, повышая достоверность результатов, однако требуется большое количество вычислительных операций. SAW отличается простотой и эффективностью, но не предусматривает контроля непротиворечивости данных.

Заключение

Выполненное исследование позволило осуществить сравнительную оценку пожарной опасности ТС с разными типами силовых установок. Количественный анализ, проведенный с помощью МАИ и SAW, показал, что при ранжировании рассматриваемых ТС по уровню пожарной опасности электромобили располагаются между автомобилями с ДВС и гибридными электромобилями.

Использование представленных методов позволило уйти от субъективных оценок, категоричных выводов и подтвердило, что ни одна из технологий не является полностью пожаробезопасной.

Динамическая природа входных данных не является ограничением для применения рассматриваемых методов, однако SAW демонстрирует преимущества перед МАИ за счет высокой вычислительной эффективности и отсутствия необходимости пересчета экспертных суждений.

В дальнейшем можно продолжать работу с многокритериальными, адаптивными и гибкими расчетными моделями оценки (SAW, МАИ, метод TOPSIS и др.).

Список источников

1. Колчин В.В., Крутолапов А.С. Пожарная безопасность электромобилей // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 9. С. 417–419.
2. Астахина Ю.А., Королева Л.А. Типология причин, приводящих к возгоранию литий-ионных аккумуляторов электромобилей // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3. С. 122–132. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-122-132
3. Kjosevski S., Kostikj A., Kochov A. Risks and safety issues related to use of electric and hybrid vehicles // Trans Motauto World. 2017. Т. 2. № 1. С. 37–40.
4. Characteristics and hazards of plug-in hybrid electric vehicle fires caused by lithium-ion battery packs with thermal runaway / Yu. Cui [et al.] // Frontiers in Energy Research. 2022. Т. 10. С. 878035. DOI: 10.3389/fenrg.2022.878035
5. Канонин Ю.Н., Лыщик А.В. Пожарная опасность электромобилей // БРНИ. 2023. № 1. С. 38–55. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38-51
6. Brzezinska D., Bryant P. Performance-based analysis in evaluation of safety in car parks under electric vehicle fire conditions // Energies. 2022. Т. 15. № 2. С. 649. DOI: 10.3390/en15020649
7. Саати Т., Керис К. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
8. Taherdoost H. Analysis of simple additive weighting method (saw) as a multi-attribute decision-making technique: A step-by-step // Journal of Management Science & Engineering Research. 2023. № 6 (1). С. 21–24. DOI: 10.30564/jmser.v6i1.5400
9. Торопкин А.И., Королева Л.А. Оценка пожаровзрывобезопасности водородного транспорта на основе моделирования процессов горения водорода // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 190–201. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-190-201
10. Андреев А.В., Бызов А.П., Орловский П.С. Методика балльно-факторной оценки частоты инициирующих пожароопасные ситуации событий для подземных емкостей автомобильной газозаправочной станции // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4. С. 131–141. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2023-4-131-141
11. Жижин К.С., Благородова Н.В. Использование метода анализа иерархий Т. Саати при выборе противопожарной техники // СтройМного. 2016. № 2 (3).
12. A MCDM-based expert system for climate-change impact assessment and adaptation planning – A case study for the Georgia Basin, Canada / X.S. Qin [et al.] // Expert systems with applications. 2008. Т. 34. № 3. С. 2164–2179.
13. Biscarri E.L. Fires in Conventional and Electrified Vehicles: Theory, Prevention, and Analysis. SAE International, 2024.
14. Скрышникова О.И. Выбор способа транспортировки нефтепродуктов в отдаленных регионах на основе метода анализа иерархий // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2023. № 1 (45). С. 66–77. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-1-66-77
15. Dorsz A., Lewandowski M. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures // Energies. 2022. № 15. Р. 11. DOI: 10.3390/en15010011

References

1. Kolchin V.V., Krutolapov A.S. Pozharnaya bezopasnost' elektromobilej // Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy. 2018. № 9. S. 417–419.
2. Astahina Yu.A., Koroleva L.A. Tipologiya prichin, privodyashchih k vozgoraniyu litij-ionnyh akkumulyatorov elektromobilej // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 3. S. 122–132. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-122-132
3. Kjosevski S., Kostikj A., Kochov A. Risks and safety issues related to use of electric and hybrid vehicles // Trans Motauto World. 2017. T. 2. № 1. S. 37–40.
4. Characteristics and hazards of plug-in hybrid electric vehicle fires caused by lithium-ion battery packs with thermal runaway / Yu. Cui [et al.] // Frontiers in Energy Research. 2022. T. 10. S. 878035. DOI: 10.3389/fenrg.2022.878035
5. Kanonin Yu.N., Lyschik A.V. Pozharnaya opasnost' elektromobilej // BRNI. 2023. № 1. S. 38–55. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38-51
6. Brzezinska D., Bryant P. Performance-based analysis in evaluation of safety in car parks under electric vehicle fire conditions // Energies. 2022. T. 15. № 2. S. 649. DOI: 10.3390/en15020649
7. Saati T., Keris K. Analiticheskoe planirovanie. Organizaciya sistem: per. s angl. M.: Radio i svyaz', 1991. 224 s.
8. Taherdoost H. Analysis of simple additive weighting method (saw) as a multi-attribute decision-making technique: A step-by-step // Journal of Management Science & Engineering Research. 2023. № 6 (1). S. 21–24. DOI: 10.30564/jmser.v6i1.5400
9. Toropkin A.I., Koroleva L.A. Ocenka pozharovzryvobezopasnosti vodorodnogo transporta na osnove modelirovaniya processov goreniya vodoroda // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 1 (73). S. 190–201. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-190-201
10. Andreev A.V., Byzov A.P., Orlovskij P.S. Metodika ball'no-faktornoj ocenki chastoty iniciiruyushchih pozharoopasnye situacii sobytij dlya podzemnyh emkostej avtomobil'noj gazozapravochnoj stancii // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 4. S. 131–141. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2023-4-131-141
11. Zhizhin K.S., Blagorodova N.V. Ispol'zovanie metoda analiza ierarhij T. Saati pri vybore protivopozharnoj tekhniki // StrojMnogo. 2016. № 2 (3).
12. A MCDM-based expert system for climate-change impact assessment and adaptation planning – A case study for the Georgia Basin, Canada / X.S. Qin [et al.] // Expert systems with applications. 2008. T. 34. № 3. S. 2164–2179.
13. Biscarri E.L. Fires in Conventional and Electrified Vehicles: Theory, Prevention, and Analysis. SAE International, 2024.
14. Skrypnikova O.I. Vybore sposoba transportirovki nefteproduktov v otdalennyh regionah na osnove metoda analiza ierarhij // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2023. № 1 (45). S. 66–77. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-1-66-77
16. Dorsz A., Lewandowski M. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures // Energies. 2022. № 15. P. 11. DOI: 10.3390/en15010011

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 04.12.2025; одобрена после рецензирования: 02.03.2026;
принята к публикации: 24.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 04.12.2025; approved after review: 02.03.2026;
accepted for publication: 24.04.2026

Информация об авторах:

Астахина Юлия Анатольевна, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации (196105, Санкт-Петербург, Московский пр. 149), e-mail: yulya_astahina@mail.ru

Королева Людмила Анатольевна, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN-код: 6101-9772

Information about the authors:

Astakhina Yulia A., adjunct at the faculty of higher education training of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: yulya_astahina@mail.ru

Koroleva Lyudmila A., professor of the department of fire and emergency rescue equipment and automotive engineering of the Saint-Petersburg university of the State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN: 6101-9772

Научная статья

УДК 614.844.1; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-156-164

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПОЖАРНЫХ НАСОСОВ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО ВИДА ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

✉ Сытдыков Максим Равильевич;

Ивахнюк Григорий Константинович;

Моторыгин Юрий Дмитриевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ sytdykov@igps.ru

Аннотация: Центробежные пожарные насосы являются основным оборудованием пожарных автомобилей и требуют надежной вакуумной системы для обеспечения быстрого забора воды из открытых водоисточников. Эффективность работы насоса напрямую зависит от характеристик применяемой вакуумной системы. В работе представлены данные по выбору наиболее предпочтительного вида вакуумного насоса для обеспечения быстрого заполнения центробежного пожарного насоса водой перед началом тушения. Правильный выбор вакуумной системы позволяет минимизировать время подготовки насоса к работе и обеспечить его надежное функционирование при заборе воды из водоемов.

В связи с этим возникает необходимость в проведении сравнительной оценки существующих видов вакуумных насосов по совокупности их технических и эксплуатационных параметров. С этой целью построена иерархическая структура многокритериальной оценки, с помощью которой определен наиболее предпочтительный вид вакуумного насоса. Предложены рекомендации для дальнейшего совершенствования вакуумных систем центробежных пожарных насосов.

Ключевые слова: экспертная оценка, центробежные пожарные насосы, вакуумные системы, вакуумные насосы, метод анализа иерархий, водозабор

Для цитирования: Сытдыков М.Р., Ивахнюк Г.К., Моторыгин Ю.Д. Повышение эффективности центробежных пожарных насосов за счет выбора предпочтительного вида вакуумной системы методом анализа иерархий // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 156–164. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-156-164

Scientific article

IMPROVING THE EFFICIENCY OF CENTRIFUGAL FIRE PUMPS BY SELECTING THE PREFERRED TYPE OF VACUUM SYSTEM USING HIERARCHY ANALYSIS

✉ Sytdykov Maxim R.;

Ivakhnyuk Grigoriy K.;

Motorygin Yuriy D.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ sytdykov@igps.ru

Abstract. Centrifugal fire pumps are the main equipment of fire vehicles and require a reliable vacuum system to ensure rapid water intake from open water sources. The efficiency of the pump directly depends on the characteristics of the applied vacuum system. The paper presents data on the selection of the most preferred type of vacuum pump to ensure rapid filling of the centrifugal fire pump with water before the start of extinguishing. The correct choice

of vacuum system allows minimizing the time of pump preparation for operation and ensuring its reliable functioning when taking water from reservoirs.

In this regard, there is a need to conduct a comparative assessment of existing types of vacuum pumps according to their technical and operational parameters. For this purpose, a hierarchical structure of multi-criteria assessment has been built, with the help of which the most preferred type of vacuum pump is determined. Recommendations are proposed for further improvement of vacuum systems of centrifugal fire pumps.

Keywords: expert evaluation, centrifugal fire pumps, vacuum systems, vacuum pumps, hierarchy analysis method, water intake

For citation: Sytdykov M.R., Ivakhnyuk G.K., Motorygin Yu.D. Improving the efficiency of centrifugal fire pumps by selecting the preferred type of vacuum system using hierarchy analysis // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 156–164. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-156-164

Введение

Центробежные пожарные насосы являются основным элементом насосно-рукавных систем мобильных средств пожаротушения [1–3]. Одной из важнейших характеристик таких насосов является способность быстрого забора воды из открытых водоисточников (водоемов, рек, озер) на высоту до 7 м. Для обеспечения этой функции применяются вакуумные системы, создающие разрежение в корпусе насоса и всасывающей линии, что обеспечивает подъем воды и заполнение насоса [4]¹.

От надежности и быстродействия вакуумной системы зависит оперативность начала тушения пожара при заборе воды из открытых водоисточников. Согласно нормативным требованиям время вакуумирования (создания разрежения и заполнения насоса водой) не должно превышать 30–45 с при высоте всасывания 7 м [5].

В современной практике применяются различные типы вакуумных насосов [6, 7]: струйные (газоструйные), поршневые, шибберные (пластинчато-роторные) и водокольцевые. Каждый из этих видов имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при проектировании и модернизации пожарной техники.

Виды рассматриваемых вакуумных насосов представлены на рис. 1.



Рис. 1. Виды рассматриваемых вакуумных насосов

¹ ГОСТ Р 52283–2019. Техника пожарная. Насосы центробежные пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.

В работе для определения наиболее рационального варианта вакуумного насоса в системе центробежных пожарных насосов используется методология иерархического анализа. Суть методики заключается в структурировании комплексной проблемы путем её разбиения на простые компоненты, что обеспечивает возможность многокритериальной оценки различных конструкций вакуумных насосов по их техническим и эксплуатационным свойствам.

Метод исследования

При выборе приоритетного типа вакуумного насоса формируется доминантная иерархическая модель, изображённая на рис. 2. Структура иерархии имеет трёхуровневое строение: на вершине располагается целевая функция задачи, промежуточный уровень образуют технические параметры вакуумных насосов, детализирующие цель исследования, базовый уровень представлен вариантами вакуумных насосов, оцениваемых по указанным параметрам.

Для реализации поставленной задачи экспертная группа на основе принятой оценочной шкалы заполнила специально разработанные матрицы парных сравнений [8]. Проведённый анализ, систематизация и синтез полученной информации позволяют количественно выразить относительное влияние элементов иерархической структуры, а также установить наиболее рациональный тип вакуумного насоса.

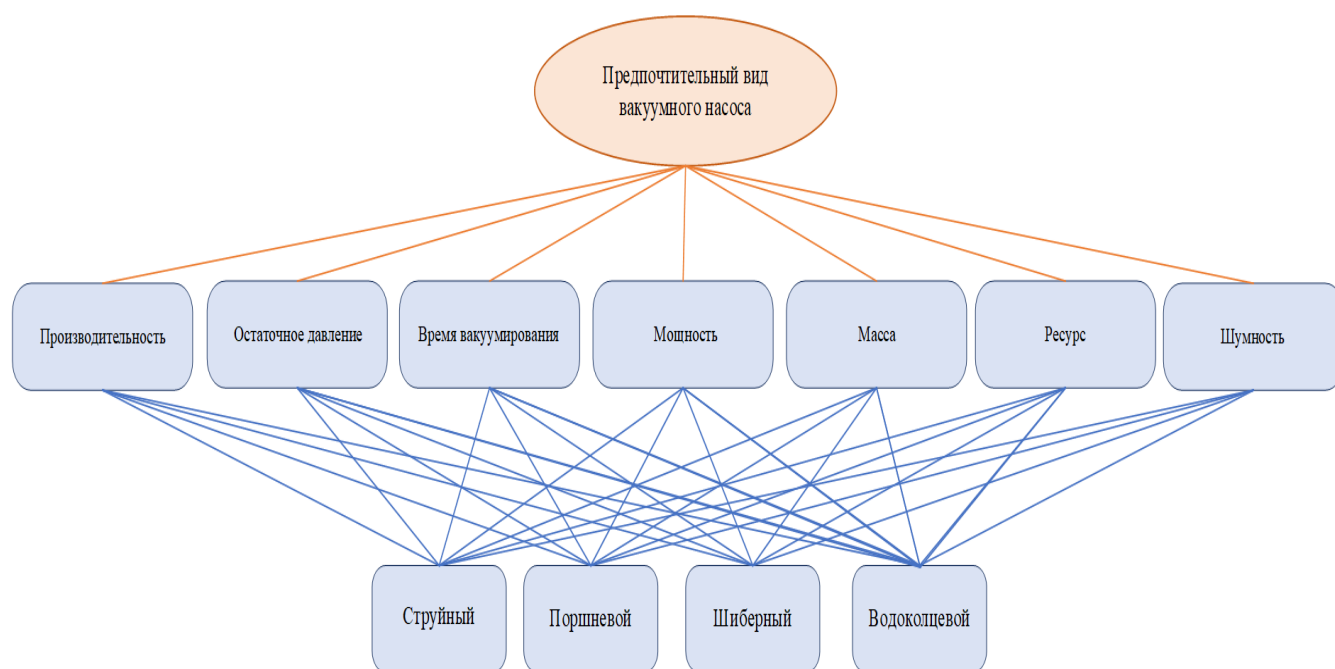


Рис. 2. Иерархическая структура многокритериальной оценки по выбору предпочтительного вида вакуумного насоса

В процессе заполнения матриц экспертная группа опирается на общепризнанную шкалу относительной приоритетности с градацией от 1 до 9 [9], при этом оценка 9 характеризует значительное преобладание одного параметра над другим, тогда как оценка 1 указывает на их равнозначность.

В матричной структуре производится сопоставление относительной приоритетности параметров, указанных в левом столбце, с параметрами, представленными в верхней строке. Матрица парного сопоставления для второго уровня иерархии представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица попарного сравнения параметров вакуумных насосов

Параметры компрессоров	Производительность	Остаточное давление	Время вакуумирования	Мощность	Масса	Ресурс	Шумность
Производительность	1	2	3	5	6	1/2	7
Остаточное давление	1/2	1	2	4	5	1/3	6
Время вакуумирования	1/3	1/2	1	3	4	1/4	5
Мощность	1/5	1/4	1/3	1	2	1/6	3
Масса	1/6	1/5	1/4	1/2	1	1/7	2
Ресурс	2	3	4	6	7	1	8
Шумность	1/7	1/6	1/5	1/3	1/2	1/8	1

Для каждой матрицы парных сравнений посредством математической обработки рассчитаны векторы приоритетов V , характеризующие степень относительного воздействия совокупности элементов на элемент вышестоящего уровня. Надёжность и корректность применения полученных результатов подтверждается рассчитанными числовыми показателями отношения согласованности (ОС) экспертных оценок для каждой матрицы парных сравнений характеристик и типов вакуумных насосов, величина которого не должна превышать 10 % для признания результатов допустимыми [9, 10].

При определении ОС вычислены промежуточные показатели, в частности индекс согласованности (ИС), характеризующий численную величину несогласованности, и максимальное собственное значение матрицы $\lambda_{\max}$.

Таким образом, для матрицы попарного сравнения параметров вакуумных насосов имеем:

$$V = (0,25; 0,14; 0,10; 0,05; 0,03; 0,41; 0,02); \lambda_{\max} = 7,52;$$

$$\text{ИС} = \frac{(7,52-7)}{7-1} = 0,09; \text{ОС} = \frac{0,09}{1,32} = 0,07.$$

Численные значения величин ОС, ИС и $\lambda_{\max}$ по каждому из семи представленных параметров вакуумных насосов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Численные значения величин ОС, ИС и $\lambda_{\max}$ параметров вакуумных насосов

Величина	Параметры вакуумных насосов						
	Производительность	Остаточное давление	Время вакуумирования	Мощность	Масса	Ресурс	Шумность
$\lambda_{\max}$	4,20	4,30	4,20	4,30	4,20	4,30	4,20
ИС	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07
ОС	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08

Из табл. 2 видно, что полученные численные значения ОС каждого рассмотренного параметра вакуумных насосов составляют менее 10 % и являются приемлемыми для дальнейших вычислений.

Локальные векторы приоритетов видов вакуумных насосов по каждому параметру представлены в табл. 3.

Таблица 3

Локальные векторы приоритетов видов вакуумных насосов по их параметрам

Производительность	Остаточное давление	Время вакуумирования	Мощность	Масса	Ресурс	Шумность
V = (0,15; 0,28; 0,42; 0,15)	V = (0,10; 0,24; 0,48; 0,18)	V = (0,12; 0,35; 0,38; 0,15)	V = (0,38; 0,26; 0,22; 0,14)	V = (0,32; 0,25; 0,31; 0,12)	V = (0,08; 0,18; 0,65; 0,09)	V = (0,40; 0,20; 0,28; 0,12)

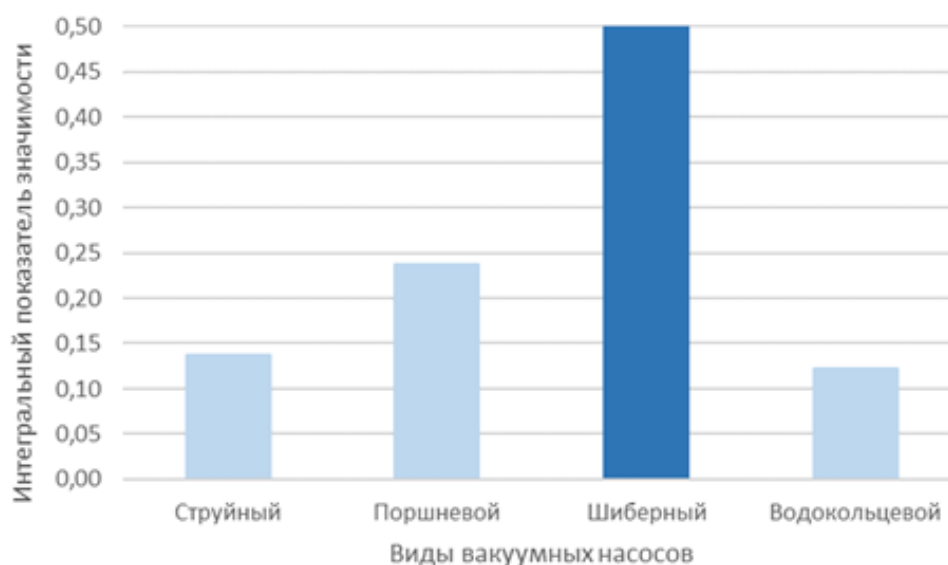
Путем вычисления интегрального показателя значимости определяем наиболее предпочтительный вид вакуумного насоса, при этом чем выше интегральный показатель значимости, тем предпочтительнее выбор того или иного вакуумного насоса. Численные значения интегрального показателя значимости представлены в табл. 4.

Таблица 4

Численные значения интегрального показателя значимости

Виды вакуумных насосов	Параметры вакуумных насосов							Интегральный показатель значимости
	Производительность	Остаточное давление	Время вакуумирования	Мощность	Масса	Ресурс	Шумность	
	0,25	0,14	0,10	0,05	0,03	0,41	0,02	
Струйный	0,15	0,10	0,12	0,38	0,32	0,08	0,40	0,137
Поршневой	0,28	0,24	0,35	0,26	0,25	0,18	0,20	0,237
Шибберный	0,42	0,48	0,38	0,22	0,31	0,65	0,28	0,503
Водокольцевой	0,15	0,18	0,15	0,14	0,12	0,09	0,12	0,123

Для наглядности результаты вычисления представлены на рис. 3.

**Рис. 3. Интегральный показатель значимости видов вакуумных насосов**

Полученные численные значения интегрального показателя значимости позволяют сделать вывод о наиболее предпочтительном виде вакуумного насоса. Таким образом, данные табл. 4 и рис. 3 показывают, что у шибберного (пластинчато-роторного) вида вакуумных насосов показатель значимости выше, чем у других видов, и составляет 0,503.

Выводы

Оценив виды вакуумных насосов по совокупности их технических и эксплуатационных параметров методом анализа иерархий, определили наиболее предпочтительный вид вакуумного насоса для применения в составе центробежных пожарных насосов, которым является шиберный (рис. 3).

Применение шиберных вакуумных насосов позволит обеспечить:

- высокий ресурс работы (до 15 000–20 000 ч), что критично для пожарной техники;
- оптимальную производительность при компактных размерах;
- низкое остаточное давление, обеспечивающее эффективное вакуумирование;
- невысокую массу и габариты, что важно для мобильных установок;
- приемлемый уровень шума при эксплуатации;
- стабильную работу в широком диапазоне условий эксплуатации.

Данные преимущества позволяют повысить эффективность работы центробежных пожарных насосов и сократить время начала подачи воды на тушение пожара при заборе воды из открытых водоисточников.

Однако выбор конкретной модели шиберного вакуумного насоса из представленных на рынке, оптимизация его конструктивных параметров и режимов работы в составе центробежного пожарного насоса требуют дальнейших исследований. Такая работа авторами проводится.

Список источников

1. Универсальная установка пожаротушения: пат. RU 195837 U1 Рос. Федерация; МПК А62С 13/00 / Кожевин Д.Ф., Поляков А.С.; Сытдыков М.Р., Шилов А.Г.; заявитель и патентообладатель Кожевин Д.Ф., Поляков А.С.; Сытдыков М.Р., Шилов А.Г., – № 2019130908; заявл. 30.09.2019; опубл. 06.02.2020, Бюл. № 4. URL: <https://goo-gl.ru/6lMr> (дата обращения: 16.02.2026 г.).
2. Пожарная техника: учеб. / Б.В. Гавкалюк [и др.]. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2022. Ч. 2. 448 с. EDN OFYQTU.
3. Моисеев Ю.Н., Теребнев В.В. Пожарно-спасательная техника: учеб. М.: ООО Издательство «КУРС», 2019. 256 с. EDN ZBMLDF.
4. Преснов А.И., Печурин А.А., Иванова Е.С. Насосные агрегаты мобильных средств пожаротушения: современное состояние, перспективы, технические решения // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2023. № 2. С. 26–35. EDN CJMNBX.
5. Синельникова Е.А., Слепцова И.Н., Кротова А.А. Требования к насосным агрегатам пожарных автомобилей // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXVIII Междунар. науч.-практ. конф.: в 2-х ч. Ч. 2. Ногинск: Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2016. С. 122–128. EDN YGQEWН.
6. Яковенко Ю.Ф., Яковенко К.Ю. Насосные установки современных пожарных автомобилей: модельные ряды, особенности конструкции, проблемы производства // Пожаровзрывобезопасность. 2004. Т. 13. № 2. С. 56–65. EDN PBVTJT.
7. Амчеславский О.В., Ахремочкин С.А., Селиверстов И.В. Обзор вакуумных систем современных пожарных автомобилей // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию со дня основания ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2024. С. 347–353. EDN FGHOMK.

8. Формирование матрицы попарного сравнения для уменьшения риска при принятии решений / В. В. Паладьев [и др.] // Информация и безопасность. 2014. Т. 17. № 3. С. 484–485. EDN SZGPRX.

9. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

10. Сытдыков М.Р., Брусянин Д.В., Абдуллаева Ю.С. Повышение эффективности установок пожаротушения за счет выбора предпочтительного вида компрессора методом анализа иерархий // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 3 (71). С. 135–142. EDN CIZWDW. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-135-142

References

1. Universal'naya ustanovka pozharotusheniya: pat. RU 195837 U1 Ros. Federaciya; MPK A62C 13/00 / Kozhevin D.F., Polyakov A.S.; Sytdykov M.R., Shilov A.G.; заявитель i patentoobladatel' Kozhevin D.F., Polyakov A.S.; Sytdykov M.R., Shilov A.G., – № 2019130908; заявл. 30.09.2019; opubl. 06.02.2020, Byul. № 4. URL: <https://goo-gl.ru/6lMp> (data obrashcheniya: 16.02.2026 g.).

2. Pozharnaya tekhnika : ucheb. / B.V. Gavkalyuk [i dr.]. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. Ch. 2. 448 s. EDN OFYQTU.

3. Moiseev Yu.N., Terebnev V.V. Pozharno-spasatel'naya tekhnika: ucheb. M.: OOO Izdatel'stvo «KURS», 2019. 256 s. EDN ZBMLDF.

4. Presnov A.I., Pechurin A.A., Ivanova E.S. Nasosnye agregaty mobil'nyh sredstv pozharotusheniya: sovremennoe sostoyanie, perspektivy, tekhnicheskie resheniya // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2023. № 2. S. 26–35. EDN CJMNBX.

5. GOST R 52283–2019. Tekhnika pozharnaya. Nasosy centrobezhnnye pozharnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy. M.: Standartinform, 2019. 20 s.

6. Sinel'nikova E.A., Slepцова I.N., Krotova A.A. Trebovaniya k nasosnym agregatam pozharnykh avtomobilej // Aktual'nye problemy pozharnoj bezopasnosti: materialy XXVIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 2-h ch. Ch. 2. Noginsk: Vserossijskij ordena «Znak Pocheta» nauchno-issledovatel'skij institut protivopozharnoj oborony Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situacijam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij, 2016. S. 122–128. EDN YGQEW.

7. Yakovenko Yu.F., Yakovenko K.Yu. Nasosnye ustanovki sovremennykh pozharnykh avtomobilej: model'nye ryady, osobennosti konstrukcii, problemy proizvodstva // Pozharovzryvobezopasnost'. 2004. T. 13. № 2. S. 56–65. EDN PBBTTJ.

8. Amcheslavskij O.V., Ahremochkin S.A., Seliverstov I.V. Obzor vakuumnykh sistem sovremennykh pozharnykh avtomobilej // Innovacionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse v usloviyah cifrovoj transformacii: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 80-letiyu so dnya osnovaniya FGBOU VO Volgogradskij GAU. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2024. S. 347–353. EDN FGHOMK.

9. Formirovanie matricy poparnogo sravneniya dlya umen'sheniya riska pri prinyatii reshenij / V.V. Palad'ev [i dr.] // Informaciya i bezopasnost'. 2014. T. 17. № 3. S. 484–485. EDN SZGPRX.

10. Saati T. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij. M.: Radio i svyaz', 1993. 278 s.

11. Sytdykov M.R., Brusyanin D.V., Abdullaeva Yu.S. Povyshenie effektivnosti ustanovok pozharotusheniya za schet vybora predpochtitel'nogo vida kompressora metodom analiza ierarhij // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 3 (71). S. 135–142. EDN CIZWDW. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-135-142

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 31.03.2026; одобрена после рецензирования: 12.05.2026;
принята к публикации: 16.06.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 31.03.2026; approved after review: 12.05.2026;
accepted for publication: 16.06.2026

Информация об авторах:

Сытдыков Максим Равильевич, начальник кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: sytdykov@igps.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5343-4764>, SPIN-код: 7548-0539

Ивахнюк Григорий Константинович, заведующий кафедрой инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 24-26/49, лит. А), доктор химических наук, профессор, e-mail: fireside@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2556-303X>, SPIN-код: 1985-9518

Моторыгин Юрий Дмитриевич, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: fire-risk1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2407-5061>, SPIN-код: 3913-7751

Information about authors:

Sytdykov Maxim R., head of the department of fire, emergency rescue equipment and automotive industry of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: sytdykov@igps.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5343-4764>, SPIN: 7548-0539

Ivakhnyuk Grigoriy K., head of department of engineering protection of environment of Saint-Petersburg state institute of technology (190013, Saint Petersburg, Moskovsky pr., 24-26/49, lit. A), doctor of chemical sciences, professor, <http://orcid.org/0000-00032556-303X>, e-mail: fireside@inbox.ru, SPIN: 1985-9518

Motorygin Yuri D., professor of the department of criminalistics and engineering and technical expertise of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: fire-risk1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2407-5061>, SPIN: 3913-7751

Научная статья

УДК 614.841.24; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-165-175

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЗАЩИТЫ

✉ Козлова Юлия Сергеевна.

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия

✉ y_kozlova@ugrasu.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена тем, что в распределительных сетях 0,4 кВ ток в нулевом рабочем проводнике формируется двумя составляющими: током нулевой последовательности основной частоты, обусловленным несимметрией нагрузок, и суммой высших гармоник, кратных трем, генерируемых однофазными нелинейными потребителями. В условиях высокой плотности нелинейной нагрузки действующее значение тока в нулевом рабочем проводе может превышать фазные токи, что создает риск недопустимого нагрева изоляции и образования потенциальных источников зажигания. Существующие системы защиты и мониторинга контролируют либо только превышение токовой уставки, либо обрыв N-проводника. Тепловое состояние изоляции при этом оценивается косвенно и с большой погрешностью, так как эквивалентное сопротивление проводника на высших гармониках возрастает, а допустимая токовая нагрузка, нормированная для синусоидального режима, становится некорректной. В то же время значения температур для различных типов изоляции строго нормированы, что позволяет перейти к оценке фактического состояния изоляции по анализу токовых нагрузок.

В настоящей статье представлена методика оценки теплового состояния проводов и кабелей, базирующаяся на анализе параметров фазных токов, что позволяет учитывать определяющее влияние режимов эксплуатации на пожароопасность объектов защиты. Методика предполагает использование параметров фазных токов для косвенной оценки тепловых процессов в проводке, что обеспечивает контроль текущего состояния сети без необходимости прямого измерения температуры.

Научная новизна полученных результатов заключается в систематизации расчетных зависимостей в единую методику, адаптированную для оценки пожарной опасности объектов защиты при возникновении токовой перегрузки. Практические рекомендации по использованию разработанного алгоритма сводятся к его интеграции в существующие системы автоматизированного учета электроэнергии для выполнения анализа теплового состояния кабельных линий и проводки при отсутствии стационарных систем мониторинга.

Ключевые слова: пожарная безопасность, электропроводка, перегрузка, старение изоляции, низковольтные сети

Для цитирования: Козлова Ю.С. Методика оценки теплового состояния проводов и кабелей для обеспечения пожарной безопасности объектов защиты // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 165–175. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-165-175

Scientific article

A METHODOLOGY FOR ASSESSING THE THERMAL CONDITION OF WIRES AND CABLES TO ENSURE FIRE SAFETY OF PROTECTED FACILITIES

✉ Kozlova Yuliya S.

Ugra state university, Khanty-Mansiysk, Russia

✉ y_kozlova@ugrasu.ru

Abstract. The relevance of the study is determined by the fact that in 0,4 kV distribution networks, the current in the neutral conductor is formed by two components: the zero-sequence current at the fundamental frequency, caused by load asymmetry, and the sum of higher harmonics that are multiples of three, generated by single-phase nonlinear consumers. Under conditions of a high density of nonlinear loads, the effective value of the current in the neutral conductor may exceed the phase currents, creating a risk of unacceptable insulation heating and the formation of potential ignition sources. Existing protection and monitoring systems typically either detect only exceedances of the current setpoint or a break in the neutral conductor. The thermal state of the insulation is assessed indirectly and with significant error, since the equivalent resistance of the conductor increases at higher harmonics, rendering the permissible current load, standardized for sinusoidal conditions, inaccurate. At the same time, temperature values for different types of insulation are strictly standardized, allowing for an assessment of the actual insulation condition based on an analysis of current loads. This article presents a methodology for assessing the thermal state of wires and cables based on the analysis of phase current parameters, which allows for the determining influence of operating modes on the fire hazard of protected facilities. The methodology utilizes phase current parameters to indirectly assess thermal processes in wiring, enabling monitoring of the current network state without the need for direct temperature measurements. The scientific novelty of the obtained results lies in the systematization of the calculated dependencies into a unified methodology adapted for assessing the fire hazard of protected facilities during a current overload. Practical recommendations for using the developed algorithm include its integration into existing automated electricity metering systems for analyzing the thermal state of cable lines and wiring in the absence of dedicated monitoring systems.

Keywords: fire safety, electrical wiring, overload, insulation aging, low-voltage networks

For citation: Kozlova Yu.S. A methodology for assessing the thermal condition of wires and cables to ensure fire safety of protected facilities // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 165–175. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-165-175

Введение

Статистика пожаров, обусловленных причинами электротехнического характера, демонстрирует устойчивую негативную динамику и свидетельствует о высокой актуальности задач повышения надежности и безопасности систем электроснабжения. Согласно результатам анализа официальных статистических данных, представленных в [1], в период с 2019 по 2024 г. количество возгораний, связанных с нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования, возросло с 49 638 до 64 795 случаев, и на 2024 г. составило 18,6 % от общего числа пожаров по стране. Рис. 1–3 отражают динамику ключевых показателей пожарной статистики за рассматриваемый период.

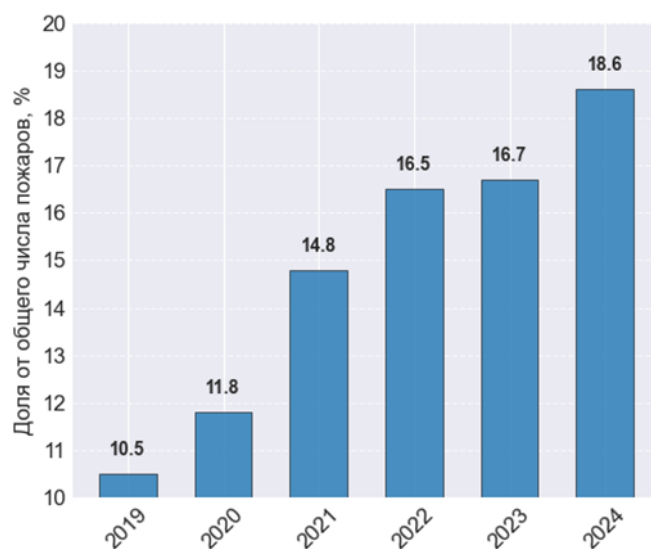


Рис. 1. Пожары по причинам электротехнического характера

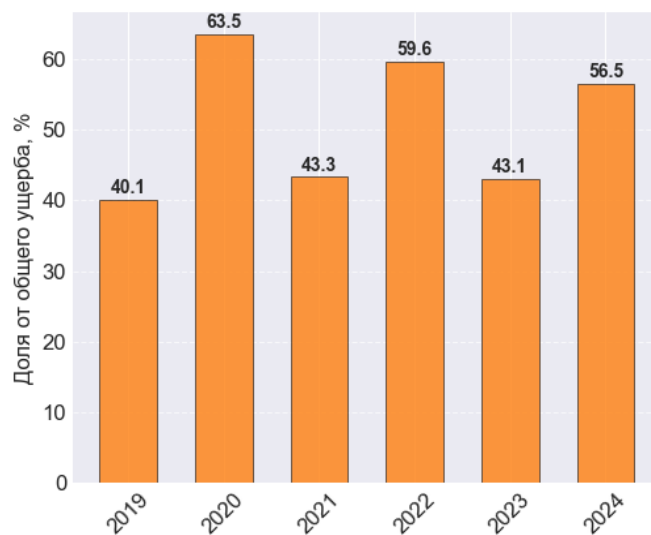


Рис. 2. Ущерб от пожаров по причинам электротехнического характера

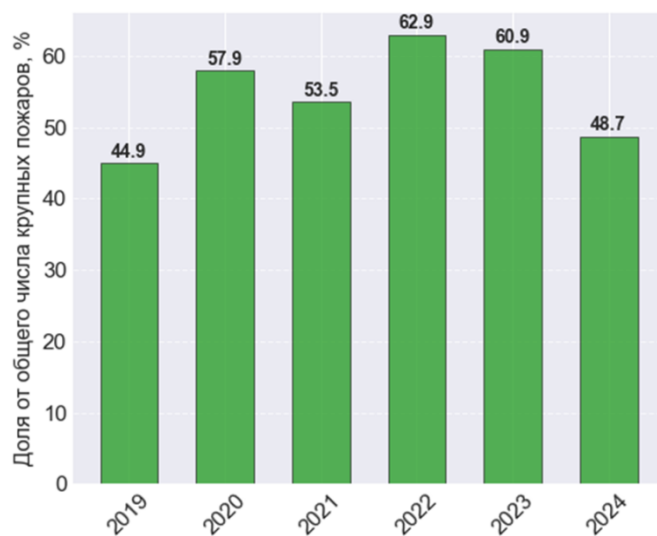


Рис. 3. Крупные пожары по причинам электротехнического характера

Доля пожаров по причинам электротехнического характера ежегодно фиксируется на достаточно высоком уровне. Показатели доли ущерба и доли крупных пожаров по данной причине не имеют выраженной динамики, что может быть обусловлено актуализацией методик расчета ущерба и критериев отнесения пожаров к категории крупных, а также иными причинами.

Особого внимания заслуживает тот факт, что в структуре самих электротехнических причин доминирующее положение занимают кабели и провода. Данные [1] позволяют квалифицировать кабели и провода как наиболее опасный вид электротехнических изделий, что подтверждается и современными исследованиями пожароопасности электропроводок [2–3]. Приоритетные направления исследований связаны с изучением свойств изоляции проводника: ее химического состава, конструктивного исполнения, тепловыделения при горении, сопровождающегося выделением высокотоксичных веществ, а также влияния внешних параметров [4–6]. Однако, несмотря на весомый вклад указанных исследований в понимание проблемы и высокую степень их научной значимости, принципиального улучшения статистики пожаров не наблюдается. Следует в то же время отметить, что параметры электрического режима работы сети, зачастую остающиеся за рамками оценочных критериев, оказывает непосредственное воздействие на состояние изоляции проводников и, как следствие, процесс возникновения и развития пожара.

Современная структура электропотребления жилых и общественных зданий в последние десятилетия претерпевает качественные изменения. Широкое внедрение импульсных источников питания компьютерной техники, офисного оборудования и светодиодного освещения привело к тому, что доля нелинейных нагрузок в сетях достигает 60–80 % [7–8]. Ключевой особенностью таких потребителей является генерация высших гармоник тока, кратных трем (преимущественно 3-й гармоники 150 Гц), которые суммируются в нейтральном проводнике трехфазной сети [8].

Современные нормативные документы содержат указания по учету несинусоидальности токов и введению поправочных коэффициентов при выборе сечения нейтрали. Однако сложившиеся подходы к проектированию остаются преимущественно статическими. Выбор сечения кабеля производится на этапе проектирования исходя из предполагаемого состава нагрузки, в то время как в процессе эксплуатации зданий характер потребления и коэффициент нелинейных искажений могут нелинейно меняться, многократно превышая расчетные значения.

Традиционные методы защиты и выбора сечений жил проводов и кабелей опираются на стационарные тепловые режимы. В реальности же высокая нелинейность в сочетании с нестационарностью создает кратковременные, но регулярные тепловые перегрузки [9–10]. Из-за значительной тепловой инерции проводников эти пики не приводят к немедленному отказу, но инициируют процессы накопительной деградации изоляции.

Существующая нормативная база не учитывает накопленный перегрев кабеля при таких динамических воздействиях, а в условиях, когда доля нелинейных нагрузок значительна, заложенные коэффициенты запаса становятся недостаточными для компенсации ускоренного старения диэлектрика. Это обуславливает необходимость перехода от статического выбора сечений к алгоритмам предиктивного мониторинга, способным в реальном времени анализировать спектр токов и прогнозировать фактический износ изоляции нейтрального проводника.

Научные исследования последних лет также подтверждают, что традиционный статический расчет сечений жил по таблицам не гарантирует термическую стойкость кабеля [11–12]. Существующие методы контроля температуры трудозатратны и трудно реализуемы на существующих объектах защиты. Это обуславливает необходимость создания математических моделей термометрирования.

Целью данной статьи является разработка методики косвенного восстановления температурного профиля нейтрального проводника на основе вейвлет-анализа массивов фазных токов и динамического моделирования тепловых процессов.

Сложность рассматриваемого процесса обусловлена его динамичностью и стохастичностью. Уровень гармоник и несимметрии меняется в течение суток и зависит от состава включенного оборудования. Традиционные методы проверки по допустимому току, основанные на статических таблицах, не способны учесть реальный тепловой режим с переменной нагрузкой. Тепловая инерционность кабеля приводит к тому, что кратковременные превышения тока могут не вызывать критического нагрева, в то время как длительные перегрузки даже с небольшим превышением приводят к недопустимому росту температуры. Для достоверной оценки рисков термических нарушений необходимо применение численного моделирования, учитывающего вероятностный характер нагрузки, нелинейную зависимость тепловыделения от тока и динамику нагрева и остывания.

Методология

Методология исследования строится на обосновании необходимости сочетания методов цифровой обработки сигналов и вычислительной термодинамики. Для идентификации гармонического состава токов предлагается использование аппарата пакетного вейвлет-разложения, обладающего высокой разрешающей способностью в частотно-временной области. Теплофизическая часть исследования базируется на теории нагрева проводников при несинусоидальных режимах, реализованной через итерационные численные методы.

В основе исследования лежит концепция косвенного восстановления температурного профиля нейтрального проводника без использования прямых температурных датчиков. Входными данными служат массивы мгновенных значений фазных токов. Для выделения информативного сигнала используется пакетная вейвлет-декомпозиция, позволяющая сохранять временную локализацию искажений, что критично при анализе случайных включений нагрузок. Методология предполагает расчет тока в нулевом проводе не как прямое измерение, а как аналитическую сумму двух физических явлений: несимметрии, обусловленной неравномерным распределением однофазных потребителей, и несинусоидальностью ввиду нелинейности вольт-амперных характеристик нагрузок.

Для трансформации полученных токовых профилей в температурные зависимости применяется численное решение дифференциального уравнения теплопроводности методом Эйлера. Математическая модель учитывает итерационное изменение активного сопротивления жилы в зависимости от ее мгновенной температуры, что позволяет зафиксировать эффекты термического разгона, недоступные для стандартных табличных расчетов. Завершающим этапом является расчет накопленного износа с использованием модели Аррениуса и правила Монтзингера, трансформирующих температурный профиль в эквивалентное время старения диэлектрика. Это позволяет оценить ущерб от перегрузки нейтрали даже в тех случаях, когда температура не достигла точки немедленного пробоя.

Результаты и их обсуждение

Для реализации алгоритма мониторинга теплового состояния предлагается концептуальная методика, основные этапы которой отражены на рис. 4.

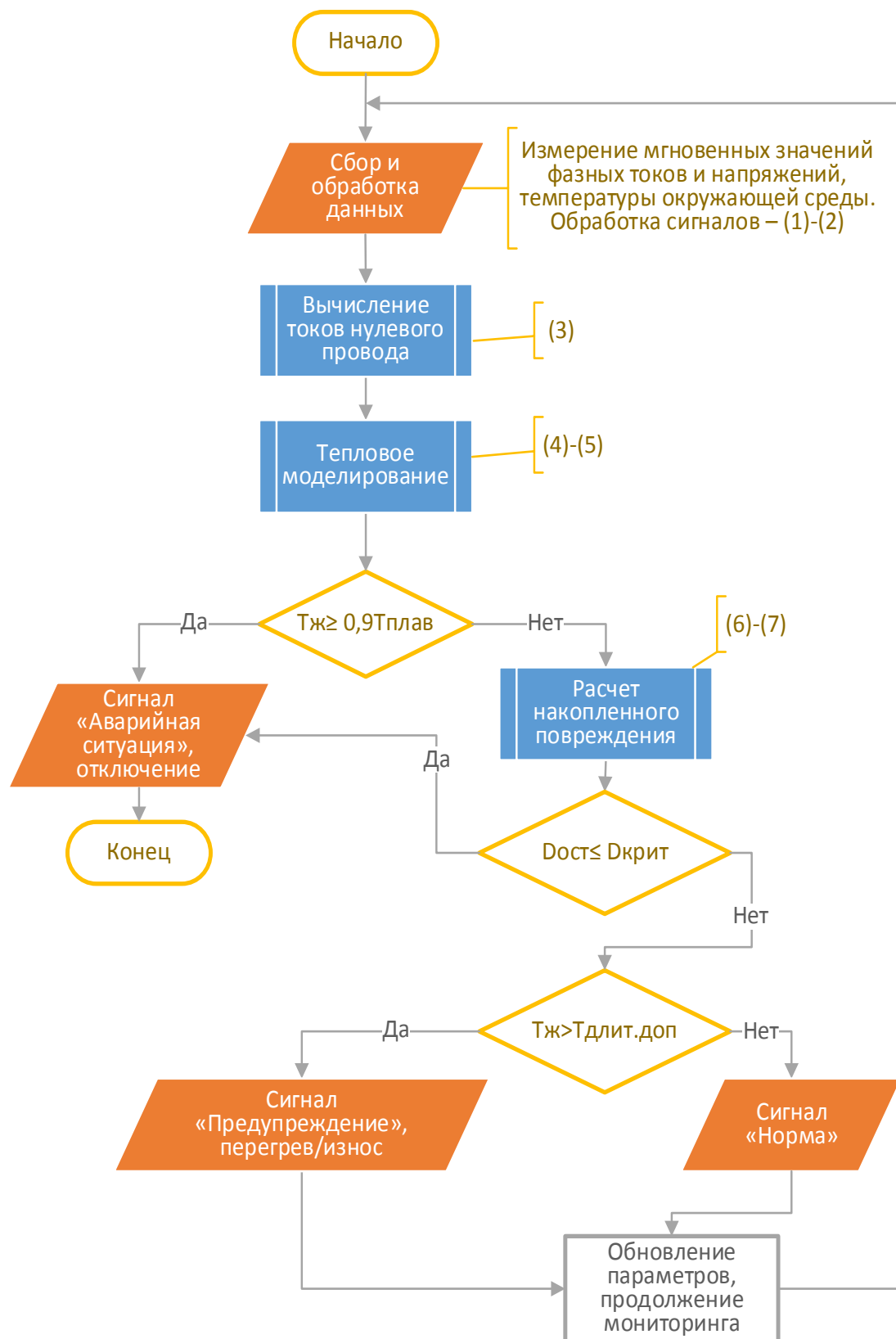


Рис. 4. Методика расчета теплового состояния проводника

На этапе сбора и обработки данных сигнал тока каждой фазы $i(t)$ на уровне разложения j представляется в виде:

$$i(t) = \sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_k W_{j,n}(k) \psi_{j,n,k}(t),$$

где $W_{j,n}(k)$ – вейвлет-коэффициенты узла n на уровне разложения j ; $\psi_{j,n,k}(t)$ – базисная функция вейвлета.

Действующее значение тока в n -м частотном узле:

$$I_{\text{узел}_n} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [W_{j,n}(k)]^2},$$

где $I_{\text{узел}_n}$ – действующее значение тока в n -м узле, А; N – количество отсчетов в окне анализа.

Переход от узловых значений $I_{\text{узел}_n}$ к селективным значениям гармоник фаз позволяет определить результирующий ток в нулевом проводе:

$$I_N = \sqrt{I_{0(50)}^2 + \sum_{h=3,9,\dots} I_{0(h)}^2}, \quad (1)$$

где $I_{0(50)}$ – действующее значение тока несимметрии основной частоты, А; $I_{0(h)}$ – действующее значение гармоник, кратных трем.

Вид формулы (1) обосновывается тем, что основную токовую нагрузку на нулевой рабочий провод в четырехпроводной сети создают токи нулевой последовательности основной частоты и токи высших нечетных гармоник, кратных трем [13].

Температура жилы $T_i(t)$ определяется из уравнения теплового баланса:

$$(I_N(t))^2 \cdot R(T(t)) = C \frac{dT_i}{dt} + \frac{T_i(t) - T_{\text{окр}}(t)}{R_T},$$

где $R(T(t))$ – активное сопротивление материала проводника, зависящее от температуры, Ом; C – аддитивная теплоемкость, Дж/°С; R_T – комплексное тепловое сопротивление «жила-окружающая среда», °С/Вт; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

Численное решение предлагается вести с использованием метода Эйлера при условии, что предполагаемый шаг Δt значительно меньше тепловой постоянной времени τ , а режим признается недопустимым при условии $T(t) > T_{\text{доп}}$:

$$T_i = T_{i-1} + \frac{\Delta t}{\tau} \cdot \left[T_{\text{окр},i} + (T_{\text{длит.доп}} - T_{\text{окр,ном}}) \cdot \left(\frac{I_i}{I_{\text{ном}}} \right)^2 - T_{i-1} \right],$$

где $T_{\text{окр},i}$ и $T_{\text{окр,ном}}$ – температура окружающей среды фактическая и номинальная соответственно, °С; $T_{\text{длит.доп}}$ – длительно допустимая температура, °С; I_i – текущее значение тока, А; $I_{\text{ном}}$ – длительно допустимый ток, А.

Введение постоянной времени нагрева позволяет исключить ложные пики температуры при кратковременных коммутационных искажениях, выделенных в ходе вейвлет-анализа. Расчет возможно вести по методу сосредоточенных параметров, определяя τ как произведение полного теплового сопротивления и теплоемкости кабеля (с учетом ГОСТ Р МЭК 60287-2-1), так как данный подход соответствует моделям, описанным в ГОСТ Р МЭК 60853. Для проводов малых сечений (2,5–16 мм²) τ имеет порядок нескольких минут. Исходя из условия устойчивости явного метода Эйлера Δt принимается равным 0,1 τ , что гарантирует сходимость алгоритма.

Переход от теплового воздействия к ресурсному показателю (остаточный ресурс $D_{\text{ост}}$) осуществляется путем расчета скорости деградации диэлектрика. Относительная скорость старения основана на законе Аррениуса, и, с учетом правила Монтзингера, описывается как:

$$W(T) = 2^{\frac{T - T_{\text{длит.доп}}}{\Delta_{\text{exp}}}},$$

где $T_{\text{длит.доп}}$ – номинальная температура эксплуатации, °C; Δ_{exp} – константа удвоения скорости старения.

Поскольку старение изоляции является необратимым процессом, необходимо учитывать суммирование превышений температуры за каждый момент времени работы:

$$D_{\text{ост}} = \int_0^{t_{\text{общ}}} \frac{W(T(t))}{D_{\text{норм}}} dt,$$

где $D_{\text{норм}}$ – номинальный ресурс (срок службы при номинальной температуре).

В качестве параметров, на основании которых принимается решение о состоянии объекта, использованы два температурных критерия, распределенные на трех уровнях оценки:

- норма: $T \leq T_{\text{длит.доп}}$ – соответствует нормальному длительно допустимому режиму;
- предупреждение: $T_{\text{длит.доп}} < T \leq 0,9T_{\text{плав}}$ – фиксируется перегрев, ведущий к сокращению службы изоляции;
- аварийная ситуация: $T > 0,9T_{\text{плав}}$ или $D_{\text{ост}} \leq D_{\text{крит}}$ – критическое состояние, связанное с возникновением потенциального источника зажигания (непосредственно за счет нагрева, а также в результате потери изоляционных свойств и возникновения высокотемпературной дуги).

В рамках данной модели в качестве критического порога $D_{\text{крит}}$ предлагается $k \cdot D_{\text{норм}}$, где коэффициент k определяется регламентами эксплуатирующей организации.

Таким образом, разработанная методика представляет собой совокупность аналитических зависимостей и физических моделей, определяющих причинно-следственную связь между характером нагрузок и ресурсным состоянием изоляции.

Для практической реализации данной методики был синтезирован вычислительный алгоритм, позволяющий оценивать состояние нулевого провода. Верификация алгоритма проводилась на массивах данных, полученных с помощью имитационной модели, разработанной в среде MATLAB/Simulink. Модель представляла собой четырехпроводную трехфазную сеть напряжением 0,4 кВ, питающую группу потребителей общественного здания [12]. В качестве нагрузки использовались блоки, имитирующие вольт-амперные характеристики импульсных источников питания с регулируемым коэффициентом гармоник и возможностью задания несимметрии по фазам. Параметры кабельной линии соответствовали характеристикам АВВГ 4х16.

Ключевое значение имеет визуализация результатов расчета по предлагаемому алгоритму: совмещение на графиках кривых тока, допустимых уровней тока и температуры позволяет мгновенно идентифицировать интервалы перегрузки и перегрева, оценить их продолжительность и величину. Так, графическое представление моделируемой ситуации (рис. 5–6) убедительно демонстрирует необходимость реализации мер по снижению нагрузки нейтрали.

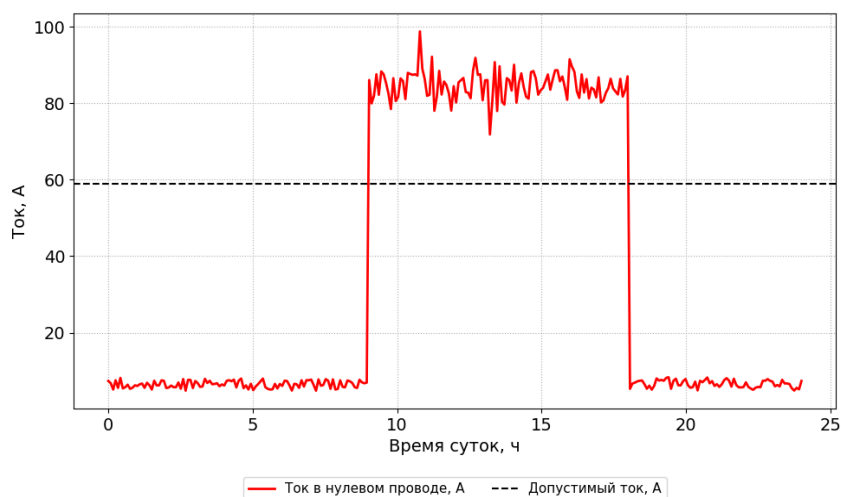


Рис. 5. График изменения тока в нулевом проводе



Рис. 6. График изменения температуры нагрева

Переходя к расчету изменения относительной скорости старения, возможно оценить снижение величины остаточного ресурса – для данного примера оно составило 1,2 % за сутки (рис. 7).

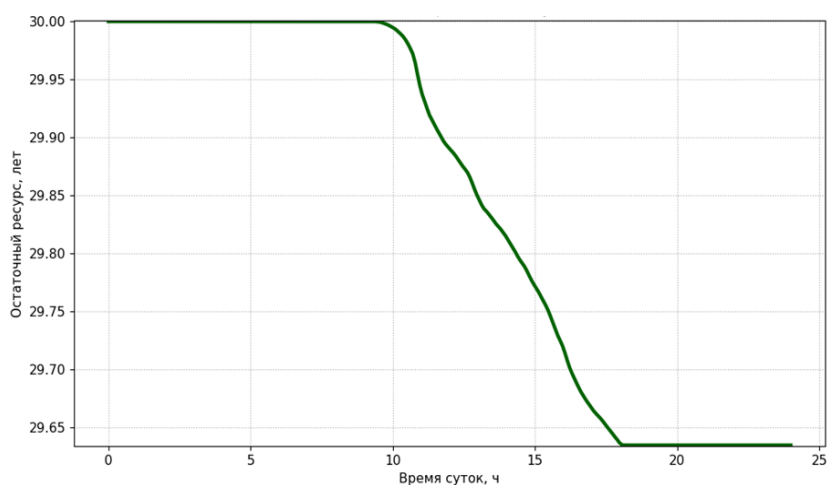


Рис. 7. График изменения остаточного ресурса

Заключение

В ходе исследования предложена и обоснована методика, использующая параметры фазных токов для косвенной оценки тепловых процессов в проводке, и применение которой обеспечивает контроль текущего состояния сети без необходимости прямого измерения температуры. Научная новизна полученных результатов заключается в систематизации расчетных зависимостей в единую методику, адаптированную для оценки пожарной опасности объектов защиты при возникновении перегрузки. Практические рекомендации по использованию разработанного алгоритма сводятся к его интеграции в существующие системы автоматизированного учета электроэнергии для выполнения анализа теплового состояния кабельных линий и проводки при отсутствии стационарных систем мониторинга. Дальнейшие исследования направлены на экспериментальную верификацию модели с использованием тепловизионного контроля, а также на разработку системы поддержки принятия решений в зависимости от полученных результатов оценки.

Список источников

1. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствия: информ.-аналитический сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. 80 с.
2. Huang X., Nakamura Yu. A Review of Fundamental Combustion Phenomena in Wire Fires. *Fire Technol.* 2020. № 56. P. 315–360.
3. A survey of Electrical Fire Causes Assessment Technology / H.D. Thai [et al.] // *IEEE Access.* 2024. Vol. 12. P. 1–17. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3437175
4. Effect of overload current values on the fire characteristics of polyethylene (PE) copper wires / J. Deng // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2023. Vol. 148. P. 11695–11705. DOI: 10.1007/s10973-023-12522-5
5. Shi B., Yang C., Long H. Research on the Fire Hazard of Different Cables Based on Cone Calorimetry // *Fire.* 2023. Vol. 6. Iss. 11. DOI: 10.3390/fire6110431
6. Оценка влияния горения кабельных линий в кабельных коробах на температуру ограждающих конструкций зданий и сооружений / М.В. Гравит [и др.] // *Безопасность труда в промышленности.* 2025. № 4. С. 36–42. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-36-42
7. Popławski T., Kurkowski M. Nonlinear Loads in Lighting Installations – Problems and Threats. *Energies.* 2024. № 16 (16). DOI: 10.3390/en16166024
8. Elsharkawy T.M.Z., Osman G.F.A., Salem W.A.A. The effect of nonlinear loads on the underground distribution cables: a case study // *Journal of Electrical Systems and Inf Technol.* 2022. Vol. 9. № 19. DOI: 10.1186/s43067-022-00061-2
9. Ghoneim S.S.M., Ahmed M., Sabiha N.A. Transient Thermal Performance of Power Cable Ascertained Using Finite Element Analysis. *Processes.* 2021. № 9. P. 438. DOI: 10.3390/pr9030438
10. Transient thermal circuit model optimization for power cables with axial heat dissipation / T. Qin [et al.] // *Front. Energy Res.* 2025. № 13. P. 1612773. DOI: 10.3389/fenrg.2025.1612773
11. Concepts and Methods to Assess the Dynamic Thermal Rating of Underground Power Cables / D. Enescu [et al.] // *Energies.* 2021. № 14. P. 2591. DOI: 10.3390/en14092591
12. Козлова Ю.С., Зыков В.И., Крупин М.В. Факторы несимметрии и несинусоидальности в электрических сетях при обеспечении пожарной безопасности электроустановок // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация.* 2025. № 4. С. 118–124. DOI: 10.25257/FE.2025.4.118-124
13. Юндин М.А., Кобзистый О.В., Рудь Е.В. Оценка влияния уровней несимметрии и высших гармоник на ток в нулевом рабочем проводнике сети 0,38 кВ // *Вестник аграрной науки Дона.* 2021. № 3 (55). С. 33–38.

References

1. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2024 g. Statistika pozharov i ih posledstviya: inform.-analiticheskij sb. Balashiha: FGBU VNIPO MCHS Rossii, 2025. 80 s.
2. Huang X., Nakamura Yu. A Review of Fundamental Combustion Phenomena in Wire Fires. *Fire Technol.* 2020. № 56. P. 315–360.
3. A survey of Electrical Fire Causes Assessment Technology / H.D. Thai [et al.] // *IEEE Access.* 2024. Vol. 12. P. 1–17. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3437175
4. Effect of overload current values on the fire characteristics of polyethylene (PE) copper wires / J. Deng // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2023. Vol. 148. P. 11695–11705. DOI: 10.1007/s10973-023-12522-5
5. Shi B., Yang C., Long H. Research on the Fire Hazard of Different Cables Based on Cone Calorimetry // *Fire.* 2023. Vol. 6. Iss. 11. DOI: 10.3390/fire6110431
6. Ocenka vliyaniya goreniya kabel'nyh linij v kabel'nyh korobah na temperaturu ograzhdayushchih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij / M.V. Gravit [i dr.] // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti.* 2025. № 4. S. 36–42. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-36-42
7. Popławski T., Kurkowski M. Nonlinear Loads in Lighting Installations – Problems and Threats. *Energies.* 2024. № 16 (16). DOI: 10.3390/en16166024
8. Elsharkawy T.M.Z., Osman G.F.A., Salem W.A.A. The effect of nonlinear loads on the underground distribution cables: a case study // *Journal of Electrical Systems and Inf Technol.* 2022. Vol. 9. № 19. DOI: 10.1186/s43067-022-00061-2
9. Ghoneim S.S.M., Ahmed M., Sabiha N.A. Transient Thermal Performance of Power Cable Ascertained Using Finite Element Analysis. *Processes.* 2021. № 9. P. 438. DOI: 10.3390/pr9030438
10. Transient thermal circuit model optimization for power cables with axial heat dissipation / T. Qin [et al.] // *Front. Energy Res.* 2025. № 13. P. 1612773. DOI: 10.3389/fenrg.2025.1612773
11. Concepts and Methods to Assess the Dynamic Thermal Rating of Underground Power Cables / D. Enescu [et al.] // *Energies.* 2021. № 14. P. 2591. DOI: 10.3390/en14092591
12. Kozlova Yu.S., Zykov V.I., Krupin M.V. Faktory nesimmetrii i nesinusoidal'nosti v elektricheskikh setyah pri obespechenii pozharnoj bezopasnosti elektroustanovok // *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya.* 2025. № 4. S. 118–124. DOI: 10.25257/FE.2025.4.118-124
13. Yundin M.A., Kobzistyj O.V., Rud' E.V. Ocenka vliyaniya urovnej nesimmetrii i vysshih garmonik na tok v nulevom rabochem provodnike seti 0,38 kV // *Vestnik agrarnoj nauki Dona.* 2021. № 3 (55). S. 33–38.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 02.03.2026; одобрена после рецензирования: 27.04.2026; принята к публикации: 25.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 02.03.2026; approved after review: 27.04.2026; accepted for publication: 25.05.2026

Информация об авторах:

Козлова Юлия Сергеевна, доцент Политехнической школы Югорского государственного университета (628011, Тюменская обл., ХМАО-Югра, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, д. 16), кандидат технических наук, e-mail: y_kozlova@ugrasu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6502-5921>, SPIN-код: 8371-6090

Information about the authors:

Kozlova Yulia S., associate professor at the polytechnic school of Yugra state university (628011, Tyumen Region, Khanty-Mansiysk, Chekhova str., 16), candidate of technical sciences, e-mail: y_kozlova@ugrasu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6502-5921>, SPIN: 8371-6090

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 504.03; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-176-185

ИЗУЧЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗГОРАНИЯ НА ПОЛИГОНАХ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

✉ Поплевин Александр Сергеевич;

Азаров Валерий Николаевич.

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия.

Манжиловская Светлана Евгеньевна.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

✉ sanya_poplevin@mail.ru

Аннотация. Пожары на объектах хранения и захоронения отходов в нашей стране являются актуальной экологической проблемой. Причинами возгораний на полигонах для размещения отходов могут являться самовозгорание отходов глубокого залегания, перегрев оборудования, механические повреждения, возгорание открытого огня, поджог, несоблюдение требований при изоляции отходов и другие причины. Пожары на полигонах отходов являются опасными чрезвычайными ситуациями техногенного характера, которые, безусловно, наносят ущерб атмосферному воздуху как компоненту окружающей среды, поскольку возгорания отходов, как правило, сопровождаются выделением токсичных веществ: диоксинов и фуранов. В рамках настоящей работы проанализировано воздействие пожаров на объектах захоронения твердых коммунальных отходов на атмосферный воздух на примере возгорания на полигоне твердых коммунальных отходов в Волгоградской обл., произошедшем в 2025 г., произведен расчет экологического вреда (ущерба) атмосферному воздуху в соответствии с действующими методиками, а также сформированы предложения для актуализации и совершенствования методики расчета вреда атмосферному воздуху в результате возгорания на полигоне твердых коммунальных отходов.

Ключевые слова: отходы производства и потребления, экологический вред, мероприятия по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, экологический ущерб, пожар, возгорание отходов

Для цитирования: Поплевин А.С., Азаров В.Н., Манжиловская С.Е. Изучение негативного воздействия на атмосферный воздух в результате возгорания на полигонах твердых коммунальных отходов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 176–185. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-176-185

Scientific article

**STUDY OF THE NEGATIVE IMPACT ON THE ATMOSPHERIC AIR
AS A RESULT OF FIRES AT SOLID MUNICIPAL WASTE LANDFILLS**✉ **Poplevin Alexander S.;****Azarov Valery N.****Volgograd state technical university, Volgograd, Russia.****Manzhilevskaya Svetlana E.****Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia**✉ **sanya_poplevin@mail.ru**

Abstract. Fires at waste storage and disposal facilities in our country are a pressing environmental issue. Fires at waste disposal sites can be caused by spontaneous combustion of deep-seated waste, overheating of equipment, mechanical damage, open flames, arson, failure to comply with waste containment requirements, and other factors. Landfill fires are hazardous man-made emergencies that undoubtedly damage atmospheric air, a component of the environment, as waste fires typically release toxic substances such as dioxins and furans. This study analyzes the impact of fires at municipal solid waste landfills on the atmosphere using the example of a fire at a municipal solid waste landfill in the Volgograd Region in 2025. It also calculates the environmental damage to the atmosphere using current methodologies. Proposals are provided for updating and improving the methodology for calculating the damage to the atmosphere as a result of municipal solid waste landfill fires.

Keywords: industrial and consumer waste, environmental damage, measures to reduce air pollutant emissions, environmental damage, fire, waste ignition

For citation: Poplevin A.S., Azarov V.N., Manzhilevskaya S.E. Study of the negative impact on the atmospheric air as a result of fires at solid municipal waste landfills // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 176–185. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-176-185

Введение

Специализированные объекты хранения и захоронения твердых коммунальных отходов (ТКО) представляют собой земельные участки, на которых осуществляется захоронение преимущественно ТКО, образующихся в результате жизнедеятельности человека. На объектах размещения отходов (ОРО) происходят многочисленные биологические и физико-химические процессы разложения, сопровождающиеся выделением загрязняющих веществ в атмосферу (преимущественно биогаз) и фильтрата. Выделение фильтрата на полигонах способствует загрязнению природных подземных и поверхностных вод, влечет химическое загрязнение почв [1].

Специализированные объекты хранения и захоронения ТКО представляют собой опасные антропогенные (техногенные) объекты повышенного экологического риска. Данный риск выражается в первую очередь в значительной пожароопасности, поскольку на ОРО сконцентрировано внушительное количество легковоспламеняющихся отходов (изделия из бумаги и картона, полиэтилентерефталата (ПЭТ), полимерные отходы). При воспламенении указанных компонентов ТКО происходит выделение загрязняющих веществ, оказывающих негативное воздействие на состояние воздушной среды и здоровье человека. Как правило, на ОРО, специализирующихся на захоронении ТКО, размещены преимущественно несортированные пищевые отходы из жилищ, отходы упаковки из бумаги и картона, полимерная упаковка, отходы изделий из стекла и текстиля, утратившие потребительские свойства [2].

Пожары на полигонах ТКО зачастую характеризуются сложностью локализации и устранения последствий возгорания, поскольку очаг возгорания расположен не на поверхности рабочей карты ОРО, на которой размещены свеживыгруженные отходы,

а в толще свалочных масс. В теле полигона может содержаться значительное количество кислорода), что обуславливает высокие темпы окисления органических и неорганических компонентов ТКО. В результате указанных процессов температура изолированного слоя отходов может достигать 70 °С [3].

Значительная часть объектов захоронения ТКО не оборудована современными системами сбора и утилизации биогаза, образующегося при биохимическом разложении ТКО, так как более 70 % объектов захоронения отходов в Российской Федерации введены в эксплуатацию в 1991–1997 гг. При этом ранее указанные объекты представляли собой несанкционированные городские свалки, бесконтрольно используемые для нужд населения и промышленных предприятий. Поскольку метан, входящий в состав биогаза, является легковоспламеняющимся веществом, отсутствие организованной системы сбора биогаза создает существенные трудности при локализации возгорания на объектах захоронения ТКО [4].

На данный момент существует множество способов предупреждения возгорания отходов на полигонах. К таким способам относятся: гидратация тела полигона, формирование системы отвода биогаза, изоляция отходов инертным грунтом. Вместе с тем единая стратегия и алгоритм действий, позволяющих сократить риск возгораний на ОРО, в настоящее время отсутствует, в связи с чем особую значимость приобретает процесс оценки экологического ущерба атмосферному воздуху от таких возгораний.

Методы исследования

На территории объектов захоронения ТКО основными причинами, способствующими возникновению пожаров, являются: несоблюдение требований безопасности при захоронении отходов; эксплуатация ОРО с отступлением от проектной документации на полигон, отсутствие организованной системы сбора биогаза, отсутствие противопожарного участка на территории полигона и др. [5].

Количественным показателем негативного воздействия пожаров на объектах захоронения ТКО является суммарный показатель экологического ущерба, рассчитанный в соответствии с установленными таксами и методиками [6].

Качественным показателем отрицательного влияния пожаров на ОРО является вред здоровью населения, проживающего вблизи объекта, на котором произошло возгорание [7].

Для предотвращения экологического ущерба атмосферному воздуху и здоровью человека большинство европейских стран в настоящее время отказываются от захоронения отходов как конечного этапа обращения с ТКО, отдавая приоритет утилизации (вторичному использованию) и обезвреживанию (изменение физико-химических свойств отходов) ТКО. Подобный подход минимизирует риски возгорания отходов на полигонах.

Важную роль играет деятельность контролирующих органов в сфере соблюдения противопожарных мер безопасности на полигонах и руководство полигона в области обеспечения объектов захоронения отходов современными системами сбора и утилизации свалочного газа, организации профилактических мероприятий по отдельному сбору легковоспламеняющихся отходов. Формирование экологической компетентности граждан также способствует снижению риска возгорания на полигонах [8–9].

Морфологический (компонентный) состав ТКО за последние годы претерпел значительные изменения [10].

Изменение состава ТКО за последние десятилетия связано с тем, что ранее образование отходов было высоким из-за численности населения, а основным компонентом отходов являлась разлагаемая органика [11, 12].

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения отходов полимерных изделий, входящих в состав более 80 % товаров и упаковки [13].

Поскольку именно полимерный компонент отходов при возгорании способствует поступлению в атмосферу наиболее токсичных для здоровья человека загрязняющих

веществ, прогнозирование и предотвращение пожаров на полигонах позволяет обеспечить санитарно-эпидемиологическое благополучие населения и экологическую безопасность региона [14].

Во избежание случаев возгорания на объектах захоронения отходов при проектировании полигона необходимо осуществить моделирование строительного процесса с целью анализа специфики района застройки и исходных данных компонентов окружающей среды (направление ветра, тип почвы и др.). Указанные сведения необходимо включить в организационный раздел проектной документации объекта размещения отходов [15–16].

В качестве примера расчета суммарного экологического ущерба атмосферному воздуху приведем расчет для пожара на полигоне захоронения отходов Волгоградской обл., произошедшего в июне 2025 г.

Так, 07.06.2025 г. в 3 ч 30 мин произошло возгорание отходов производства и потребления на площади 100 м². На месте возгорания находились вновь привезенные отходы в неуплотненном состоянии, их объем составлял 100 м³.

Методика определения ущерба атмосферному воздуху утверждена 28 января 2021 г. приказом Минприроды России № 59 «Методики исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды» (Методика № 59) и зарегистрирована Минюстом России 5 февраля 2021 г. (рег. № 62400).

Однако указанной Методикой не предусмотрен расчет массы загрязняющих веществ, выбрасываемых при горении отходов на полигонах.

Вместе с тем непроведение работы по исчислению размера вреда атмосферному воздуху вследствие возгорания отходов на специализированных полигонах может привести к необоснованному уклонению от предусмотренной гражданско-правовой ответственности лиц, чьи действия (бездействие) привели к возгоранию на полигоне.

Приведем пример расчета экологического ущерба атмосферному воздуху, как компоненту окружающей среды, в результате возгорания на полигоне ТКО в Волгоградской обл. в июне 2024 г. в соответствии с требованиями, установленными Методикой № 59.

При этом массу выбрасываемых загрязняющих веществ полагаем целесообразным рассчитать согласно Методике, разработанной Государственным научно-исследовательским институтом промышленной экологии (ФГБУ «ГосНИИЭНП») (Методика ГосНИИЭНП).

Исчисление размера вреда, причиненного атмосферному воздуху, как компоненту природной среды, осуществляется по формуле:

$$В_{онму} = \sum_{i=1}^n (H_i * M_i * K_{ин} * K_{охр}),$$

где $V_{онму}$ – размер экологического ущерба при возгорании отходов на полигоне при отсутствии неблагоприятных метеорологических условий (руб.); H_i – фиксированная такса, определяющая выброс в атмосферу конкретного загрязняющего вещества (руб. за тонну); $K_{охр}$ – коэффициент, учитывающий возможность расположения ОРО на территории, находящейся под особой охраной; полигон для захоронения ТКО, на котором произошло возгорание в 2025 г., расположен в степной промышленной зоне Волгоградской обл., в связи с чем, указанный коэффициент принимается равным 1; $K_{ин}$ – показатель, учитывающий инфляционную составляющую на территории Российской Федерации (согласно данным, размещенным на сайте Росстата в разделе Индексы потребительских цен на товары и услуги по Российской Федерации, указанный коэффициент за период с января 2021 по июнь 2025 г. после расчета и округления составляет 1,35); i – наименование конкретного загрязняющего вещества; n – общее количество загрязняющих веществ; M_i – масса выброса вредных (загрязняющих) веществ.

Объем сгоревших отходов в неуплотненном состоянии составил порядка 100 м³.

В этой связи применяется Методика, разработанная ФГБУ «ГосНИИЭНП».

В п. 2 Методики ГосНИИЭНП указана объемная плотность для неуплотненных отходов – 0,25 т/м³.

Согласно п. 3 Методики ГосНИИЭНП определение количественного показателя выброса загрязняющих веществ ($M_{гор.i}$) в атмосферу на ОРО захоронения ТКО при пожаре производится по формуле:

$$M_{гор.i} = (V * p_k) * q_i,$$

где q_i – значение удельного выброса i -го загрязняющего вещества (т), определяемого в соответствии с табл. 1 (п. 1 Методики); V – объем сгоревших отходов, м³; p_k – объемная плотность сгоревших отходов, т/м³.

Результаты исследования и их обсуждение

Табл. 1 содержит результаты расчета массы загрязняющих веществ, которая определяется как произведение массы сгоревших ТКО, с учетом объема сгоревших ТКО и их объемной плотности, на величину удельного выброса, а также таксы H_i , определяемой в зависимости от степени негативного воздействия конкретного загрязняющего вещества на атмосферный воздух и санитарно-эпидемиологическое благополучие населения.

Таблица 1

Результаты расчета массы вредного (загрязняющего) вещества, т, определяемой как произведение массы сгоревших ТКО на величину удельного выброса

Загрязняющее вещество	V – объем сгоревших отходов, м ³	Удельный выброс (т/т – тонн вещества на тонну ТКО)	q_i – значение удельного выброса i -го загрязняющего вещества	Масса вредного (загрязняющего) вещества, т	Такса для исчисления расчета вреда
Углерода оксид	100	0,2221	0,25	5,5525	5 000
Сероводород	100	0,0049	0,25	0,1225	500 000
Серы диоксид	100	0,007	0,25	0,175	110 723
Азота оксид и азота диоксид	100	0,0068	0,25	0,17	64 289
Взвешенные вещества (твердые частицы)	100	0,0130	0,25	0,325	344 850
Взвешенные вещества (сажа)	100	0,00062	0,25	0,0155	344 850

Выбросы веществ, относящихся к твердым частицам (оксиды железа, диоксид алюминия, абразивная пыль, сажа (углерод), полагаем необходимым учитывать при расчете в категории «взвешенные вещества».

Данные расчета размера ущерба, причиненного в результате сгорания твердых коммунальных отходов на полигоне Волгоградской обл., представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные расчета размера вреда, причиненного в результате сгорания твердых коммунальных отходов

Загрязняющее вещество	M_i , т	H_i , в руб. за т	$K_{охр}$	$K_{ин}$	$V_{онму}$, руб.
Углерода оксид	5,5525	5 000	1 0	1,35	37 479
Сероводород	0,1225	500 000	1	1,35	82 688
Серы диоксид	0,175	110 723	1	1,35	26 158
Азота оксид и азота диоксид	0,17	64 289	1	1,35	14 754
Взвешенные вещества (твердые частицы)	0,325	344 850	1	1,35	151 303
Взвешенные вещества (сажа)	0,0155	344 850	1	1,35	7 216

Суммируя результаты расчета экологического ущерба от выбросов конкретных загрязняющих веществ, получаем общую сумму вреда ($V_{онму}$), которая составит 319 598 руб.

На основании изложенного, размер ущерба атмосферному воздуху, причиненного в результате сгорания ТКО на полигоне в Волгоградской обл., произошедшего летом 2024 г., составил 319 598 (триста девятнадцать тысяч пятьсот девяносто восемь) руб.

Возгорания на территориях объектов размещения отходов и несанкционированных свалках оказывают значительное негативное влияние на состояние окружающей среды и здоровье человека.

С февраля 2025 г. дополнен перечень индикаторов риска наступления вреда окружающей среде. Так, поступление в контролирующие органы информации о пожаре на объектах хранения и захоронения ТКО является основанием для инициирования в отношении хозяйствующих субъектов контрольно-надзорных мероприятий и расчета соответствующего суммарного ущерба атмосферному воздуху.

При этом, ранее для расчета размера вреда атмосферному воздуху использовались «Временные рекомендации по расчету выбросов вредных веществ в атмосферу в результате сгорания на полигонах твердых бытовых отходов и размера предъявляемого иска за загрязнение атмосферного воздуха», утвержденные приказом Минприроды России от 2 ноября 1992 г. (Временные рекомендации, Рекомендации).

Однако со времени утверждения Временных рекомендаций произошли значительные изменения в морфологическом и химическом составе ТКО, в научных исследованиях о процессах горения, в том числе и ТКО. Все это привело к необходимости разработки на основании Временных рекомендаций Методики ФГБУ «ГосНИИЭНП» с целью обоснования уточнения (корректировки) значений удельных показателей выбросов в атмосферу при свободном горении ТКО на ОРО, приведенных во Временных рекомендациях.

Расчет вреда атмосферному воздуху по Методике ФГБУ «ГосНИИЭНП» контролирующими органами, в большинстве случаев, не осуществляется.

Методика ФГБУ «ГосНИИЭНП» предназначена только для определения удельных показателей выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в результате сгорания на полигонах ТКО с последующим использованием полученных значений для расчета размера вреда с помощью Методики № 59.

В настоящее время Министерством природных ресурсов Российской Федерации, совместно с Росприроднадзором, производится работа над актуализацией Методики № 59 в части формирования расчетных формул для расчета вреда атмосферному воздуху в результате возгораний на полигоне ТКО.

Полученные расчеты позволяют определить количество вредных (загрязняющих) веществ, поступающих в атмосферный воздух в результате горения ТКО при пожарах, которые в дальнейшем могут быть использованы в качестве исходных данных для математического моделирования опасных зон распространения продуктов горения в окружающей среде.

Заключение

Возгорания отходов на специализированных полигонах остаются одной из актуальных экологических проблем на территории Российской Федерации. Пожары влекут за собой причинение ущерба компонентам окружающей среды, особенно атмосферному воздуху в результате аварийного выброса загрязняющих веществ.

Для целей расчета ущерба атмосферному воздуху в результате возгорания ТКО в настоящее время используется только Методика исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху, как компоненту природной среды, утверждённая приказом Минприроды России от 28 января 2021 г. № 59, а также Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу в результате сгорания на полигонах бытовых отходов, разработанная ФГБУ «ГосНИИЭНП».

При этом указанными Методиками предусмотрен расчет массы выбросов шести загрязняющих веществ от возгорания ТКО на полигонах (оксид углерода, сероводород, диоксид серы, оксиды азота, взвешенные вещества).

Однако с оптимизацией сферы товаров и услуг, расширением полимерных, химических и синтетических производств за последнее десятилетие, в состав ТКО, поступающих на захоронение на ОРО, входят вещества, при сгорании которых в атмосферу поступают такие токсичные вещества, как: акрилонитрил, цианистый водород, сернистый газ, фторфосген, изоцианид, фтористый водород, хлористый водород, фенол, метанол, предельные и непредельные углеводороды, арены (бензол, толуол, ксилол), ацетальдегид, уксусная кислота.

Таким образом, продукты горения ТКО содержат опасные токсиканты (диоксины, полиароматические углеводороды, производные серы, хлористый водород и др.), расчет массы которых не предусмотрен действующими Методиками.

В этой связи целесообразно расширение указанного перечня загрязняющих веществ в Методиках с применением ставок платы за выбросы вышеприведенных веществ, актуальных на год, в который произошло возгорание ТКО. Подобное расширение перечня загрязняющих веществ, выбрасываемых при сгорании ТКО в атмосферный воздух, будет иметь стимулирующий характер для лиц, эксплуатирующих ОРО, по соблюдению комплекса противопожарных мероприятий.

Список источников

1. Губайдуллина И.Н., Забара К.С. Экологические последствия пожаров твердых коммунальных отходов // Проблемы развития современного общества: сб. научных статей VIII Всерос. нац. науч.-практ. конф.: в 4-х т. / под ред. В.М. Кузьминой. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2023. Т. 4. С. 121–125.
2. Твердые бытовые отходы (сбор, транспорт и обезвреживание) / В.Г. Систер [и др.]. М.: АКХ им. К.Д. Памфилова, 2001. С. 54.
3. Получение свалочного газа – экономия первичных природных энергоресурсов: сб. тезисов Междунар. науч.-практ. конф. / А.М. Шаимова [и др.] // Нефтегазопереработка и нефтехимия. 2006. С. 246–248.

4. Сауц А.В. Прогнозирование экологических последствий загрязненности воздуха свалочным газом в жилой застройке // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 3. С. 354–366.
5. Ишмеева А.С., Губайдуллина И.Н. Применение искусственного интеллекта в обеспечении пожарной безопасности // Естественные науки и пожаробезопасность: проблемы и перспективы исследований: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. С. 335–338.
6. Алёшина Т.А. Причины возгорания на свалках ТБО // Безопасность строительных систем. Экологические проблемы в строительстве. Геоэкология. С. 119–124.
7. Анопоченко Т.Ю. Подходы к оценке эколого-экономического риска // Экономический вестник Южного федерального округа. 2006. № 4. С. 10–15.
8. Попович Е.В., Губайдуллина И.Н. Современные средства защиты человека от опасных и вредных факторов пожара // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сб. материалов XI Всерос. науч.-практ. конф. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. С. 300–303.
9. Easterlin R.A., Angelescu L. Modern economic growth and quality of life: Cross sectional and time series evidence / Forthcoming in K. C. Land (Ed.), Handbook of Social Indicators and Quality-of-Life Research. New York and London: Springer, 2011. P. 15–16.
10. Lu H.F., Nair J. Impact of waste landfill and composting on greenhouse gas emissions – a review // Bioresource Technol. 2009. № 100. P. 3792–3798.
11. Said M.O., Hasan M.N., Mujibu M.A. Assessment of Municipal Solid Waste Generation and Recyclable Material Potential in Kuala Lumpur, Malaysia // Waste Management. 2009. № 29. P. 2209–2213.
12. Alamgir M., Ahsan A. Characterization of MSW and Nutrient Content of Organic Matter in Bangladesh // Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. 2007. № 6 (4). P. 1945–1956.
13. Moghadam M.R.A., Mokhtarani N., Mokhtarani B. Country Report: Municipal Solid Waste Management in Rasht City, Iran // Waste Management. 2009. № 29. P. 485–489.
14. Current Situation of Municipal Solid Waste Management in Tibet / J. Jiang [et al.] // Waste Management. 2009. № 29. P. 1186–1191.
15. Sanchugov V.I., Rekadze P.D. Determination of the dynamic characteristics of a gear pump by the load variation method using special bench systems // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2022. Vol. 22. P. 130–141. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-130-141
16. Kouame A.B., Smirnov I.V. Determinants Factors in Predicting Life Expectancy Using Machine Learning // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2022. Vol. 22. P. 373–383. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-4-373-383

References

1. Gubajdullina I.N., Zabara K.S. Ekologicheskie posledstviya pozharov tverdyh kommunal'nyh othodov // Problemy razvitiya sovremennogo obshchestva: sb. nauchnyh statej VIII Vseros. nac. nauch.-prakt. konf.: v 4-h t. / pod red. V.M. Kuz'minoy. Kursk: Yugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet, 2023. T. 4. S. 121–125.
2. Tverdye bytovye othody (sbor, transport i obezvrezhivanie) / V.G. Sister [i dr.]. M.: AKKH im. K.D. Pamfilova, 2001. S. 54.
3. Poluchenie svalochnogo gaza – ekonomiya pervichnyh prirodnih energoresursov: sb. tezisev Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / A.M. Shaimova [i dr.] // Neftegazopererabotka i neftekhimiya. 2006. S. 246–248.
4. Sauc A.V. Prognozirovanie ekologicheskikh posledstvij zagryaznennosti vozduha svalochnym gazom v zhiloy zastroyke // Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Ser.: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2018. T. 26. № 3. S. 354–366.
5. Ishmееva A.S., Gubajdullina I.N. Primenenie iskusstvennogo intellekta v obespechenii pozharnoj bezopasnosti // Estestvennye nauki i pozharobezopasnost': problemy i perspektivy

issledovaniy: sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2024. S. 335–338.

6. Alyoshina T.A. Prichiny vozgoraniya na svalkah TBO // Bezopasnost' stroitel'nyh sistem. Ekologicheskie problemy v stroitel'stve. Geoekologiya. S. 119–124.

7. Anopchenko T.Yu. Podhody k ocenke ekologo-ekonomicheskogo riska // Ekonomicheskij vestnik Yuzhnogo federal'nogo okruga. 2006. № 4. S. 10–15.

8. Popovich E.V., Gubajdullina I.N. Sovremennye sredstva zashchity cheloveka ot opasnyh i vrednyh faktorov pozhara // Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya inzhenernyh sistem obespecheniya pozharnoj bezopasnosti ob'ektov: sb. materialov XI Vseros. nauch.-prakt. konf. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2024. S. 300–303.

9. Easterlin R.A., Angelescu L. Modern economic growth and quality of life: Cross sectional and time series evidence / Forthcoming in K. C. Land (Ed.), Handbook of Social Indicators and Quality-of-Life Research. New York and London: Springer, 2011. P. 15–16.

10. Lu H.F., Nair J. Impact of waste landfill and composting on greenhouse gas emissions – a review // Bioresource Technol. 2009. № 100. P. 3792–3798.

11. Said M.O., Hasan M.N., Mujibu M.A. Assessment of Municipal Solid Waste Generation and Recyclable Material Potential in Kuala Lumpur, Malaysia // Waste Management. 2009. № 29. P. 2209–2213.

12. Alamgir M., Ahsan A. Characterization of MSW and Nutrient Content of Organic Matter in Bangladesh // Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. 2007. № 6 (4). P. 1945–1956.

13. Moghadam M.R.A., Mokhtarani N., Mokhtarani B. Country Report: Municipal Solid Waste Management in Rasht City, Iran // Waste Management. 2009. № 29. P. 485–489.

14. Current Situation of Municipal Solid Waste Management in Tibet / J. Jiang [et al.] // Waste Management. 2009. № 29. P. 1186–1191.

15. Sanchugov V.I., Rekadze P.D. Determination of the dynamic characteristics of a gear pump by the load variation method using special bench systems // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2022. Vol. 22. P. 130–141. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-130-141

16. Kouame A.B., Smirnov I.V. Determinants Factors in Predicting Life Expectancy Using Machine Learning // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2022. Vol. 22. P. 373–383. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-4-373-383

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 12.03.2026; одобрена после рецензирования: 27.03.2026;
принята к публикации: 30.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 12.03.2026; approved after review: 27.03.2026;
accepted for publication: 30.04.2026

Информация об авторах:

Поплевин Александр Сергеевич, кафедра «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве» Института архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета (400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1), e-mail: sanya_poplevin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5677-9063>, SPIN-код: 9421-2655

Азаров Валерий Николаевич, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве» Института архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета (400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1), e-mail: azarovpubl@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0944-0232>, SPIN-код: 9887-0836

Манжилевская Светлана Евгеньевна, доцент кафедры «Технология строительного производства» Донского государственного технического университета (344001, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, e-mail: smanzhilevskaya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7065-3726>, SPIN-код: 9612-8379

Information about authors:

Poplevin Alexander S., department of life safety in construction and municipal economy of Institute of architecture and construction of Volgograd state technical university (400074, Volgograd, Akademicheskaya str., 1), e-mail: sanya_poplevin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5677-9063>, SPIN: 9421-2655

Azarov Valery N., head of the department of life safety in construction and municipal economy of Institute of architecture and construction of Volgograd state technical university (400074, Volgograd, Akademicheskaya str., 1), e-mail: azarovpubl@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0944-0232>, SPIN: 9887-0836

Manzhilevskaya Svetlana E., associate professor of department of construction technology of Don state technical university (344001, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), candidate of technical sciences, e-mail: smanzhilevskaya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7065-3726>, SPIN: 9612-8379

Научная статья

УДК 662.6; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-186-197

АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО: МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

✉Травин Игорь Александрович;

Козодаев Алексей Станиславович;

Кондратьева Мария Владимировна.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

✉7greenline@mail.ru

Аннотация. Рассматривается актуальная проблема вовлечения твердых коммунальных отходов в энергетический баланс через производство альтернативного топлива (RDF – Refuse Derived Fuel). Проанализирован зарубежный опыт промышленного применения RDF, в первую очередь в цементной индустрии, как наиболее технологически подготовленной для его использования. Описаны технология производства RDF, критерии качества и классификации, а также экологические и технические требования к его сжиганию. Также приведен опыт развития производства RDF зарубежом. Показано, что для стран с низким качеством исходного сырья и высокими требованиями к стабильности производства (включая Россию) газификация RDF с подачей синтез-газа в кальцинатор является более перспективной стратегией, чем попытки адаптировать печи под прямое сжигание низкосортного топлива. Особое внимание уделено анализу факторов, влияющих на развитие отрасли RDF в России с учетом текущей структуры топливно-энергетического комплекса, состояния системы обращения с отходами и нормативно-правовой базы. На основании проведенного анализа предложены решения, необходимые для устойчивого внедрения RDF в российской экономике в соответствии с принципами наилучших доступных технологий и экологической безопасности.

Ключевые слова: RDF-топливо, твердые коммунальные отходы, энергия из отходов, замещающее топливо, цементная промышленность, совместная переработка (co-processing), обращение с отходами, экологические требования, экономика замкнутого цикла

Для цитирования: Травин И.А., Козодаев А.С., Кондратьева М.В. Альтернативное топливо: международный опыт и возможности применения в Российской Федерации // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 186–197. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-186-197

Scientific article

ALTERNATIVE REFUSE DERIVED FUELS: INTERNATIONAL EXPERIENCE AND APPLICATION PROSPECTS IN THE RUSSIAN FEDERATION

✉Travin Igor A.;

Kozodaev Aleksey S.;

Kondratyeva Maria V.

Bauman Moscow state technical university, Moscow, Russia

✉7greenline@mail.ru

Abstract. The article discusses the current problem of involving municipal solid waste in the energy balance through the production of alternative fuel (RDF – Refuse Derived Fuel). It analyzes the foreign experience of industrial application of RDF, primarily in the cement industry, as the most technologically prepared for its use. The article describes the technology of RDF production, quality and classification criteria, as well as environmental and technical requirements for its combustion. It also provides an overview of the development of RDF

production abroad. It is shown that for countries with low-quality raw materials and high requirements for production stability (including Russia), RDF gasification with the supply of synthesis gas to the calcinator is a more promising strategy than attempts to adapt furnaces for direct combustion of low-grade fuel. Special attention is paid to the analysis of factors affecting the development of the RDF industry in Russia, taking into account the current structure of the fuel and energy complex and the state of the recycling system.

Keywords: RDF-fuel, municipal solid waste, energy from waste, replacement fuel, cement industry, co-processing, waste management, environmental requirements, closed-loop economics

For citation: Travin I.A., Kozodaev A.S., Kondratyeva M.V. Alternative refuse derived fuels: international experience and application prospects in the Russian Federation // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 186–197. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-186-197

Введение

Вопросы энергообеспечения и утилизации накапливающихся отходов относятся к числу ключевых задач для устойчивого развития. Топливо-энергетический баланс Российской Федерации исторически базируется на ископаемых ресурсах, доля которых в производстве электроэнергии, по данным на текущий период, составляет порядка 66 %, в то время как на атомную и гидроэнергетику приходится оставшаяся треть [1]. Параллельно острой проблемой остается накопление твердых коммунальных отходов (ТКО), основная масса которых размещается на полигонах, что приводит к отчуждению земель и рискам для окружающей среды. Значительную часть ТКО составляют горючие фракции, что создает потенциал для их использования в энергетических целях.

Мировой практикой, направленной на сокращение захоронения отходов и диверсификацию топливной базы, является производство стандартизированного альтернативного топлива из отходов – RDF (Refuse Derived Fuel). Его применение позволяет решать две задачи одновременно: утилизировать неперерабатываемую часть ТКО и замещать традиционное ископаемое топливо в энергоемких производствах. Целью данной статьи является комплексный анализ международного опыта производства и использования RDF, оценка технологического и экономического потенциала его внедрения в России, а также формулирование условий, необходимых для его экологически безопасного применения.

1. Топливо-энергетический контекст и проблема отходов в России

Российская Федерация характеризуется высоким уровнем потребления как электрической, так и тепловой энергии, что обусловлено климатическими условиями, развитием промышленности и структурой ЖКХ. В промышленных секторах, требующих высоких температур (цементное производство, металлургия и др.), энергия зачастую получается путем прямого сжигания топлива [2]. Несмотря на значительные запасы ископаемых энергоресурсов, актуальными становятся вопросы ресурсоэффективности, снижения углеродного следа и поиска альтернативных источников энергии.

Одновременно с этим система обращения с ТКО в России исторически была ориентирована на полигонное захоронение. Согласно оценкам коммунальные отходы в значительной степени состоят из горючих компонентов, часть из которых может быть выделена в качестве вторичного сырья.

Объем захоронения отходов в России составляет 89 % [3]. Это порождает вопрос о необходимости переработки сырья или энергетической утилизации для сокращения объемов захоронения.

Разрешение этой дилеммы в современной практике определяется как рыночными механизмами, так и регулирующим воздействием государства. Отсутствие дефицита традиционного топлива в стране долгое время сдерживало развитие индустрии RDF, однако исчерпание возможности расширения полигонов, особенно в густонаселенных регионах, делает развитие этого направления необходимым.

2. Технология производства и характеристика RDF

RDF – это твердое топливо, производимое из горючей фракции ТКО, прошедшей специальную подготовку. Термин является аббревиатурой от английского Refuse Derived Fuel. Процесс включает следующие этапы в соответствии с рис. 1 [4].

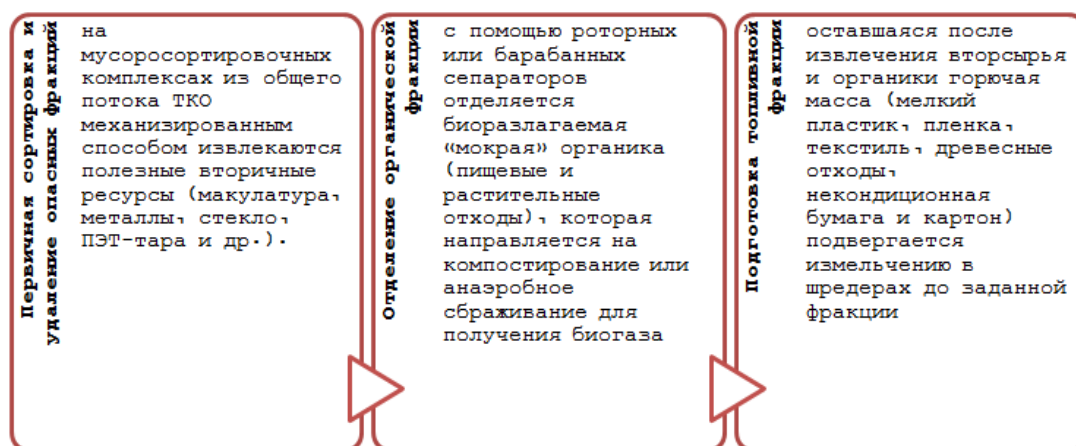


Рис. 1. Этапы производства RDF-топлива

Измельченная масса подсушивается в сушильных барабанах для снижения влажности, после чего уплотняется и гранулируется (или брикетируется) в соответствии с установленным технологическим регламентом.

Полученные гранулы (брикеты) представляют собой товарное RDF-топливо. Его ключевые потребительские свойства – теплотворная способность и зольность – напрямую зависят от компонентного состава исходной массы. Более высокое содержание углеводородных материалов (пластики, резина) и целлюлозы (бумага, древесина) повышает теплоту сгорания и снижает зольность. На основании этих параметров RDF классифицируется по категориям, что определяет возможные области его применения [5].

3. Международный опыт применения RDF: акцент на цементной промышленности

Мировой опыт свидетельствует, что наиболее технологически и экологически обоснованной сферой для использования RDF является цементная промышленность. Вращающиеся печи для обжига цементного клинкера работают при температурах от 1 450 °C до 2 000 °C, что обеспечивает полное термическое разложение (пиролиз) сложных органических соединений, включая потенциально опасные [6, 7]. Высокие температуры, длительное время пребывания материала в зоне горения и щелочная среда способствуют нейтрализации кислотных газов (например, HCl, SO₂). Кроме того, образующаяся зола инкорпорируется в матрицу клинкера, превращаясь в компонент конечного продукта, что исключает необходимость ее отдельной утилизации как отхода.

В странах Европейского союза совместная переработка отходов в цементных печах признана одной из наилучших доступных технологий [8, 9]. Например, в Германии доля альтернативных видов топлива в топливном балансе цементных заводов достигает 90 %¹. В Швейцарии, где на полигоны направляется лишь около 1 % отходов, до 50 % бытового мусора перерабатывается в RDF и сжигается с получением энергии. Швеция, имеющая

¹ Альтернативное топливо RDF в цементных печах: технология применения. URL: <https://inner.su/articles/alternativnoe-toplivo-rdf-v-tsementnykh-pechakh-tehnologiya-primeneniya/> (дата обращения: 20.01.2026)

развитую сеть мусоросжигательных заводов и заводов по производству RDF, испытывает дефицит вторичного топлива и импортирует отходы из соседних стран [10].

Критическим условием безопасного применения RDF является строгий входной контроль сырья и мониторинг технологического процесса. Особое внимание уделяется снижению содержания хлора (не более 0,1 %). Это связано с тем, что его повышенные концентрации могут приводить к образованию диоксинов [4]. Поэтому в производстве RDF недопустимо использование неподготовленных ТКО или опасных фракций.

Значительная часть исследований посвящена не только технологическим, но и экономическим, а также историческим аспектам интеграции RDF в цементную индустрию в контексте построения экономики замкнутого цикла. Как отмечается в исследовании [11], развитие циклических процессов и, как следствие, интереса к вторичным ресурсам связан с мировым нефтяным кризисом 1970-х гг. В этот период в Германии и Швейцарии начинается промышленное использование отходов в цементной промышленности. Таким образом, к 2018 г. альтернативное топливо покрывало уже более двух третей спроса в Германии [11].

Анализ современных тенденций, проведенный в исследовании [12] на базе отраслевых изданий (CemNet.com, Global CemFuels), позволяет выделить несколько ключевых векторов развития рынка RDF за рубежом (рис. 2), которые могут служить ориентиром для России.



Рис. 2. Ключевые векторы развития рынка RDF за рубежом

Существенный вклад в понимание не только технологических преимуществ, но и системных барьеров на пути внедрения RDF вносит исследование [13], посвященное анализу перспектив совместной переработки RDF в цементных печах Индии. Авторы исходят из предпосылки, что цементная промышленность, являясь энергоинтенсивным сектором, где стоимость топлива составляет до 30–35 % себестоимости продукции, остро нуждается в альтернативных источниках энергии на фоне дефицита и волатильности цен на традиционный уголь и ПЭТ-кокс. Одновременно с этим быстрая урбанизация создает критическую нагрузку на систему обращения с отходами, что делает утилизацию неперерабатываемой фракции ТКО в виде RDF экономически и экологически оправданной.

Опираясь на данные Центрального совета по контролю загрязнения (CPCB) и Цементной ассоциации Индии (CMA), исследователи [13] проводят количественную оценку потенциала замещения. Они отмечают, что правительством Индии введены правила, обязывающие промышленные предприятия в радиусе 100 км от заводов по производству RDF замещать не менее 5 % своего топлива RDF. Однако, согласно их расчетам, использование только отходов, генерируемых в этом радиусе, позволило бы достичь уровня замещения тепловой энергии (Thermal Substitution Rate, TSR) лишь на уровне 0,48 %. Это демонстрирует, что для масштабного внедрения RDF необходима не только развитая сеть его производства, но и эффективная логистика, выходящая далеко за пределы ближайших территорий.

Результат исследования [13] систематизирует факторы, препятствующие широкому распространению совместной переработки. Авторы выделяют три основные группы проблем в соответствии с рис. 3.

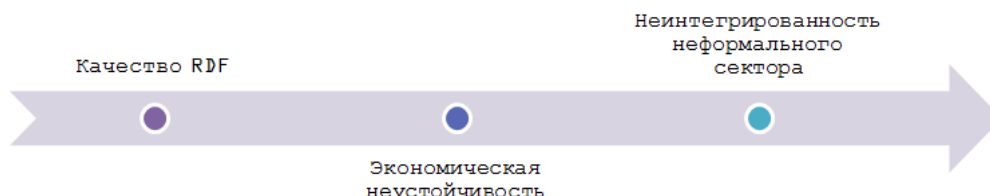


Рис. 3. Группы проблем, препятствующие широкому распространению совместной переработки

Основным препятствием является несоответствие производимого топлива жестким технологическим требованиям цементных печей. Авторы приводят целевые параметры качества для RDF, пригодного к совместной переработке: размер частиц менее 35 мм, низшая теплота сгорания 2 500–3 500 ккал/кг, влажность менее 25 %, зольность менее 20 % и, что наиболее критично, содержание хлора менее 1 % [13–19]. Кроме того, производители RDF не имеют гарантий сбыта своей продукции, а цементные заводы, в свою очередь, не готовы инвестировать в модернизацию (например, установку байпасных систем) без уверенности в долгосрочных и качественных поставках. В Индии значительная часть сбора и сортировки отходов осуществляется неформальными сборщиками, которые не встроены в официальную систему. Это приводит к тому, что качество исходного сырья для RDF остается низким, а наиболее загрязненные фракции, пригодные для энергетической утилизации, теряются [18–25].

На основе проведенного анализа [13] предлагаются три бизнес-модели для обеспечения устойчивости проектов совместной переработки (рис. 4).



Рис. 4. Бизнес-модели для обеспечения устойчивости проектов совместной переработки

Существует направление исследований, в которых для оценки экологической эффективности использования RDF применяется методология анализа жизненного цикла. Например, в работе [14] количественно сопоставлены три сценария обращения с ТКО в условиях реально действующего промышленного кластера (рис. 5).



Рис. 5. Сценарии обращения с ТКО в Юго-Восточной Азии

Объектом исследования стал опыт взаимодействия цементной компании (PT Indocement) с деревенским предприятием (BUMDES), которое с 2008 г. перерабатывает отходы окрестных деревень в RDF. Авторы подчеркивают, что цементная промышленность рассматривается правительством Индонезии как один из приоритетных секторов для реализации программ по снижению выбросов парниковых газов, поскольку до 86 % выбросов CO_2 в этой отрасли связаны со сжиганием ископаемого топлива [15]. Производство RDF, таким образом, решает две задачи: сокращение объемов захоронения отходов и замещение угля в энергоемком производстве.

Авторы исследования [14] рассчитали материальные потоки для установки мощностью переработки около 2,26 т отходов в сутки, из которых производится 966 кг RDF со средним размером частиц 5–10 мм и теплотворной способностью, достигающей 67 % от теплотворной способности угля.

Результаты демонстрируют экологические преимущества использования RDF по всем ключевым показателям воздействия в соответствии с табл.

Таблица

Оценка воздействия на жизненный цикл

	Потенциал глобального потепления	Токсичность для человека	Потенциал эвтрофикации
RDF	0,84 кг CO_2 – экв.	0,22 кг 1,4-дихлорбензол – экв.	0,000736 кг PO_4 – экв.
Открытый полигон	8,36 кг CO_2 – экв.	0,23 кг 1,4-дихлорбензол – экв.	0,000718 кг PO_4 – экв.

Авторы исследования [14] объясняют данные табл. 1 тем, что производство RDF, в отличие от открытого полигона, предотвращает образование метана при разложении органики, а в отличие от сжигания – исключает эмиссию тяжелых металлов и диоксинов из-за отсутствия на этапе подготовки RDF сепарации опасных фракций. Производство RDF дополнительно снижает нагрузку на полигоны вследствие получения компоста и биомассы.

В то время как большая часть исследований фокусируется на прямом сжигании RDF в цементных печах и кальцинаторах, в работе [16] осуществляется анализ альтернативного подхода – интеграции процесса газификации RDF в технологическую линию цементного завода. Авторы отмечают, что, несмотря на высокие показатели термического замещения (TSR), достигаемые в Европе (до 80–100 % в кальцинаторе), прямое сжигание RDF сопряжено с рядом нерешенных операционных проблем. К ним относятся: неполное сгорание крупных частиц, колебания температуры факела, повышенный удельный расход тепла и, что наиболее критично, образование кольцевых настывлей в печи из-за высокого содержания хлора и щелочей в золе RDF [18–23].

Подчеркивается, что для Индии, где уровень TSR составляет лишь около 5 % при целевом показателе 25 % к 2025 г., эти проблемы стоят особенно остро. Низкое качество RDF (теплота сгорания до 1 800 ккал/кг, высокая влажность и засоренность) делает его прямое сжигание в существующих печах без дорогостоящей модернизации (например, установки байпасных систем) экономически и технологически проблематичным [16].

В качестве решения предлагается рассматривать не прямое сжигание, а предварительную газификацию RDF с последующим использованием полученного синтез-газа (syngas) в цементной печи и/или кальцинаторе. На рис. 6 представлены преимущества использования газификации RDF-топлива.

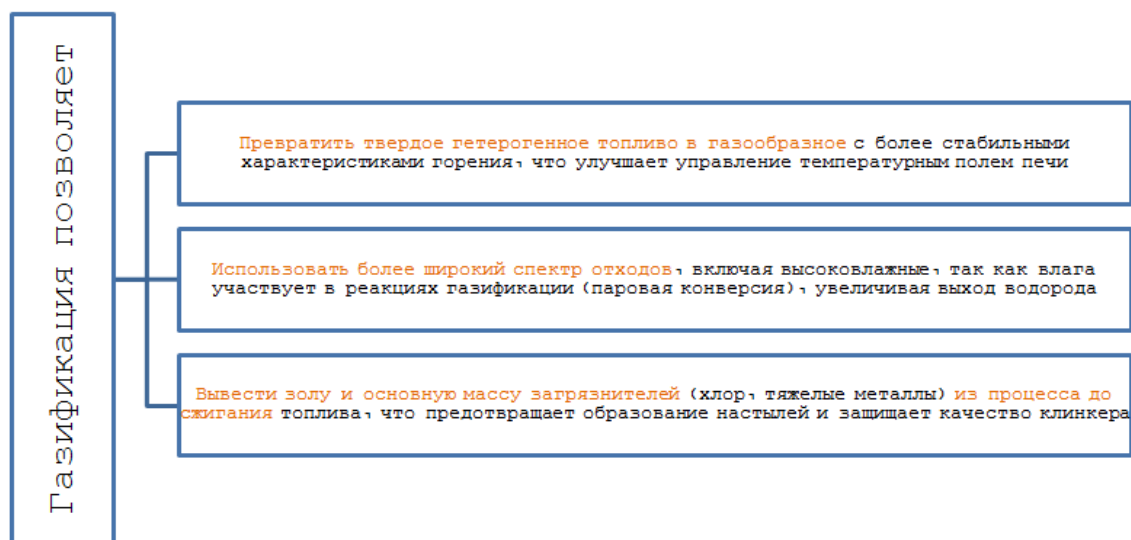


Рис. 6. Преимущества использования газификации RDF-топлива

Таким образом, для стран с низким качеством исходного сырья и высокими требованиями к стабильности производства (включая Россию) газификация RDF с подачей синтез-газа в кальцинатор является более перспективной стратегией, чем попытки адаптировать печи под прямое сжигание низкосортного топлива.

4. Потенциал и барьеры внедрения RDF в России

По расчетам, проведенным международными экспертами по заказу Всемирного банка, в 2016 г. в городах мира было произведено 2,01 млрд т ТКО, что в среднем составляет 0,74 кг на человека в день [26].

Российская Федерация обладает значительным ресурсным потенциалом для развития индустрии RDF, учитывая объемы образующихся ТКО и наличие энергоемких производств. Потенциальными потребителями могут выступать цементные заводы, крупные котельные, некоторые металлургические производства, а также специализированные мусоросжигательные заводы, вырабатывающие электрическую и тепловую энергию.

В 2023 г. в России был принят ГОСТ Р 70719–2023 «Обращение с отходами. Методические рекомендации по подготовке альтернативного топлива из твердых коммунальных отходов. Основные требования», что создало нормативную основу для производства стандартизированного RDF. Отечественные компании разрабатывают и предлагают технологические линии для его производства, а также системы автоматической подачи в печи.

Однако существуют значительные барьеры для широкого внедрения:

- инфраструктурные: недостаточный уровень развития системы селективного сбора отходов по всей стране, дефицит современных мусоросортировочных комплексов;

- технологические: необходимость модернизации многих промышленных предприятий (в первую очередь цементных заводов) для организации приема, хранения и сжигания RDF с соблюдением всех экологических норм;

- экономические: требуются значительные капитальные вложения как в создание производств RDF, так и в модернизацию потребителей. Конкуренция с относительно дешевым природным газом создает необходимость в специальных экономических стимулах;

- социально-экологические: отсутствие общественного доверия к технологиям сжигания отходов, связанное с опасениями по поводу выбросов токсичных веществ.

Ориентировочная потребность лишь одного среднестатистического цементного завода (например, мощностью около 1 млн т клинкера в год) может составлять до 25–30 тыс. т RDF в год, что эквивалентно такому же объему перерабатываемых отходов, отвлеченных от захоронения.

5. Комплекс мер для устойчивого развития индустрии RDF в Российской Федерации

Для успешной интеграции RDF в экономику и энергетику России необходим системный подход, включающий следующие ключевые направления:

1. Детализация требований к качеству RDF, условиям его производства, транспортировки и использования в рамках существующих законов («Об отходах производства и потребления», «Об охране окружающей среды») и в соответствии с принципами НДТ.

2. Введение механизмов, делающих использование RDF экономически привлекательным для промышленности. Это может включать меры налогового регулирования, целевое субсидирование проектов модернизации, учет «зеленых» технологий в системе государственных закупок.

3. Ускоренное внедрение повсеместного селективного сбора ТКО с обязательным отделением опасных фракций (батареи, ртутные лампы, электроника). Стимулирование инвестиций в строительство современных сортировочных и перерабатывающих комплексов, способных производить качественное RDF.

4. Обязательное оснащение всех объектов, использующих RDF, системами непрерывного автоматического мониторинга выбросов (CAM) с передачей данных в надзорные органы. Отнесение таких объектов к I категории негативного воздействия на окружающую среду.

5. Развитие направлений по применению золы при ее образовании на специализированных заводах в строительной индустрии (дорожное строительство, производство строительных материалов), что соответствует принципам экономики замкнутого цикла.

6. Поддержка исследований в области технологий производства и сжигания RDF, разработки отечественного оборудования. Включение соответствующих дисциплин в образовательные программы технических вузов.

7. Формирование общественного мнения через просветительские кампании, обеспечение доступа к данным мониторинга выбросов, диалог с местными сообществами.

Заключение

Производство и использование топлива из отходов представляет перспективное технологическое направление, позволяющее решать комплекс задач, среди них, возможность сокращения полигонного захоронения ТКО, замещение ископаемого топлива, снижение углеродного следа энергоемких производств. Международный опыт, в частности, в странах Европы и Азии, доказывает возможность перехода на циклический процесс переработки отходов при условии выполнения требований производства.

На сегодняшний день в России существуют ограничения перехода к экономике замкнутого цикла – инфраструктурных, экономических и социальных. Реализация такой модели возможна только при комплексном совершенствовании законодательства, создании экономических стимулов, масштабных инвестиций в инфраструктуру, внедрения передовых технологий контроля качества и последовательную работу по экологическому просвещению.

Список источников

1. Development of experience in the application of technologies in the field of alternative energy: World experience, Russian practice / I.A. Kapitonov [et al.] // *Renewable Energy*. 2021. Т. 165. С. 773–782.
2. Валинеева А.А., Степанова Т.А. RDF как альтернативный источник энергии // *ИБД*. 2020. № 3 (63). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rdf-kak-alternativnyy-istochnik-energii> (дата обращения: 20.01.2026).
3. Осипов В.И. Что лучше – сжигать или разлагать твёрдые коммунальные отходы? *Вестник Российской академии наук*, 2021. Т. 91. № 8. С. 769–778.
4. CSI (Cement Sustainability Initiative). 2005. Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland.
5. De Bas P. The Economics of Measurement of Emissions into the Air. 2002.
6. Cembureau. 2004. Guidelines on Co-Processing of Waste Materials in Cement Production. Cembureau, Brussels, Belgium.
7. Михайлова Н.В., Феоктистов А.Ю., Бернштейн Л.Г. Перспективы использования дополнительного топлива из твердых бытовых отходов при производстве цемента // *Строительные материалы*. 2013. № 1. С. 10–11.
8. Сухоруков А.И., Захарова Е.А. Актуальные подходы к развитию экономики замкнутого цикла в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами // *Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова*. 2021. № (5). С. 33–44.
9. Ламзина И.В., Желтобрюхов В.Ф., Шайхиев И.Г. Зарубежная практика использования альтернативного топлива из отходов для цементной промышленности // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. № 17.
10. Федотов А.В. Зарубежный опыт организации и стимулирования раздельного сбора и утилизации твердых бытовых отходов на региональном уровне // *Вопросы региональной экономики*. 2019. Т. 4. № 41. С. 54–62.
11. Пинкальский М.А., Федотова Г.В. Использование зарубежного опыта применения альтернативного топлива в цементной промышленности при построении экономики замкнутого цикла // *Вестник Дагестанского государственного университета*. Сер. 3: Общественные науки. 2024. Т. 39. № 4. С. 29–38.

12. Prospects for using the liquid fraction of biogas digestate as a substrate additive for growing mushrooms / S. Kataki [et al.] // *Advances in Waste Management: Selected Papers from the Recycle 2016 Conference*. Singapore: Springer Singapore, 2018. P. 445–465.
13. Application of nutrients increased the growth and nitrate concentration in lettuce grown hydroponically using biogas slurry / V.K. Liu [et al.] // *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil Science and Plant Production*. 2011. Vol. 61. № 5. P. 391–394.
14. Chandrasekhar K., Pandey S. Joint Processing of RDF in Cement Plants // *Energy Recovery Processes from Waste*. Singapore: Springer Singapore, 2019. P. 225–236; *Assessment of the Life Cycle of Waste-Derived Fuel (RDF) for the Recycling of Municipal Solid Waste (MSW): An Example of the Cement Industry in Cirebon, Indonesia* / T.T. Anastasiya [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. Vol. 778. № 1. P. 012146; *Trends in Global CO₂ and Greenhouse Gas Emissions* / J. G. J. Olivier [et al.] // *Netherlands Environmental Assessment Agency*. 2017. Vol. 5. № 1.
15. Sharma P., Sheth P.N., Mohapatra B.N. Recent progress in the joint processing of fuel production waste (RDF) in cement production: direct firing in a kiln/calciner against the integration of RDF gasification processes // *Waste and Biomass Valorization*. 2022. Vol. 13. № 11. P. 4347–4374.
16. Decarbonising of the Indian Cement Industry Through Alternative Fuels—Challenge of Transfer Chute Jamming / K. Kukreja [et al.] // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2023. T. 20. № 5. C. 71–77.
17. Refuse derived fuel (RDF) Co-processing in kiln main burner in a cement plant: a case study / P. Sharma [et al.] // *International Conference on Advances in Energy Research*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. C. 331–339.
18. Qazi U.Yu. Future of hydrogen as an alternative fuel for next-generation industrial applications; challenges and expected opportunities // *Energies*. 2022. T. 15. № 13. C. 4741.
19. The future prospects of alternative fuels / E. Uludamar [et al.] // *Frontiers in Energy Research*. 2024. T. 12. C. 1482062.
20. Viczek S.A. Origins, Distribution, and Fate of Contaminants and Ash Constituents in Waste for SRF Production and Co-Processing. 2021.
21. Güereca L.P., Torres N., Juárez-López C.R. The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach // *Journal of Cleaner Production*. 2015. T. 107. C. 741–748.
22. Integrating Municipal Solid Wastes as Refuse-Derived Fuels in Cement Co-processing: A Circular Economy Approach for Sustainable Resource Management / H.S. Patra [et al.] // *Sustainable Municipal Waste Management with a Zero Waste Approach*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. C. 323–343.
23. Overview of municipal solid wastes-derived refuse-derived fuels for cement co-processing / G.L. Tihin [et al.] // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. T. 84. C. 153–174.
24. Numerical investigation of co-firing of RDF and pulverized coal in precalciners: Impacts on combustion characteristics and pollutant emissions / Z. Zhang [et al.] // *Fuel*. 2026. T. 417. C. 138647.
25. Saha P.K., Karstensen K.H. Co-processing of Alternative Fuels // *Waste Valorisation and Recycling: 7th IconSWM—ISWMAW*. 2017. Vol. 2. 2019. T. 2. C. 19.
26. Шилкина С.В. Управление пластиковыми отходами: российский и зарубежный опыт // *Отходы и ресурсы*. 2022. Т. 9. № 1.

References

1. Development of experience in the application of technologies in the field of alternative energy: World experience, Russian practice / I.A. Kapitonov [et al.] // *Renewable Energy*. 2021. T. 165. S. 773–782.

2. Valineeva A.A., Stepanova T.A. RDF kak al'ternativnyj istochnik energii // IVD. 2020. № 3 (63). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rdf-kak-alternativnyy-istochnik-energii> (data obrashcheniya: 20.01.2026).
3. Osipov V.I. Chto luchshe – szhigat' ili razlagat' tvorydye kommunal'nye othody? Vestnik Rossijskoj akademii nauk, 2021. T. 91. № 8. S. 769–778.
4. CSI (Cement Sustainability Initiative). 2005. Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland.
5. De Bas P. The Economics of Measurement of Emissions into the Air. 2002.
6. Cembureau. 2004. Guidelines on Co-Processing of Waste Materials in Cement Production. Cembureau, Brussels, Belgium.
8. Mihajlova N.V., Feoktistov A.Yu., Bernshtejn L.G. Perspektivy ispol'zovaniya dopolnitel'nogo topliva iz tverdyh bytovyh othodov pri proizvodstve cementa // Stroitel'nye materialy. 2013. № 1. S. 10–11.
9. Suhorukov A.I., Zaharova E.A. Aktual'nye podhody k razvitiyu ekonomiki zamknutogo cikla v sfere obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi othodami // Vestnik Rossijskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova. 2021. № (5). S. 33–44.
10. Lamzina I.V., Zheltobryuhov V.F., Shajhiev I.G. Zarubezhnaya praktika ispol'zovaniya al'ternativnogo topliva iz othodov dlya cementnoj promyshlennosti // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. № 17.
11. Fedotov A.V. Zarubezhnyj opyt organizacii i stimulirovaniya razdel'nogo sbora i utilizacii tverdyh bytovyh othodov na regional'nom urovne // Voprosy regional'noj ekonomiki. 2019. T. 4. № 41. S. 54–62.
12. Pinkal'skij M.A., Fedotova G.V. Ispol'zovanie zarubezhnogo opyta primeneniya al'ternativnogo topliva v cementnoj promyshlennosti pri postroenii ekonomiki zamknutogo cikla // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 3: Obshchestvennye nauki. 2024. T. 39. № 4. S. 29–38.
13. Prospects for using the liquid fraction of biogas digestate as a substrate additive for growing mushrooms / S. Kataki [et al.] // Advances in Waste Management: Selected Papers from the Recycle 2016 Conference. Singapore: Springer Singapore, 2018. P. 445–465.
14. Application of nutrients increased the growth and nitrate concentration in lettuce grown hydroponically using biogas slurry / V.K. Liu [et al.] // Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil Science and Plant Production. 2011. Vol. 61. № 5. P. 391–394.
15. Chandrasekhar K., Pandey S. Joint Processing of RDF in Cement Plants // Energy Recovery Processes from Waste. Singapore: Springer Singapore, 2019. P. 225–236; Assessment of the Life Cycle of Waste-Derived Fuel (RDF) for the Recycling of Municipal Solid Waste (MSW): An Example of the Cement Industry in Cirebon, Indonesia / T.T. Anastasiya [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 778. № 1. P. 012146; Trends in Global CO₂ and Greenhouse Gas Emissions / J. G. J. Olivier [et al.] // Netherlands Environmental Assessment Agency. 2017. Vol. 5. № 1.
16. Sharma P., Sheth P.N., Mohapatra B.N. Recent progress in the joint processing of fuel production waste (RDF) in cement production: direct firing in a kiln/calciner against the integration of RDF gasification processes // Waste and Biomass Valorization. 2022. Vol. 13. № 11. P. 4347–4374.
17. Decarbonising of the Indian Cement Industry Through Alternative Fuels—Challenge of Transfer Chute Jamming / K. Kukreja [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2023. T. 20. № 5. S. 71–77.
18. Refuse derived fuel (RDF) Co-processing in kiln main burner in a cement plant: a case study / P. Sharma [et al.] // International Conference on Advances in Energy Research. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. S. 331–339.
19. Qazi U.Yu. Future of hydrogen as an alternative fuel for next-generation industrial applications; challenges and expected opportunities // Energies. 2022. T. 15. № 13. S. 4741.

20. The future prospects of alternative fuels / E. Uludamar [et al.] // *Frontiers in Energy Research*. 2024. T. 12. S. 1482062.
21. Viczek S.A. Origins, Distribution, and Fate of Contaminants and Ash Constituents in Waste for SRF Production and Co-Processing. 2021.
22. Güereca L.P., Torres N., Juárez-López C.R. The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach // *Journal of Cleaner Production*. 2015. T. 107. S. 741–748.
23. Integrating Municipal Solid Wastes as Refuse-Derived Fuels in Cement Co-processing: A Circular Economy Approach for Sustainable Resource Management / H.S. Patra [et al.] // *Sustainable Municipal Waste Management with a Zero Waste Approach*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. S. 323–343.
24. Overview of municipal solid wastes-derived refuse-derived fuels for cement co-processing / G.L. Tihin [et al.] // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. T. 84. S. 153–174.
25. Numerical investigation of co-firing of RDF and pulverized coal in precalciners: Impacts on combustion characteristics and pollutant emissions / Z. Zhang [et al.] // *Fuel*. 2026. T. 417. S. 138647.
26. Saha P.K., Karstensen K.H. Co-processing of Alternative Fuels // *Waste Valorisation and Recycling: 7th IconSWM—ISWMAW*. 2017. Vol. 2. 2019. T. 2. S. 19.
27. Shilkina S.V. Upravlenie plastikovymi othodami: rossijskij i zarubezhnyj opyt // *Othody i resursy*. 2022. T. 9. № 1.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 18.03.2026; одобрена после рецензирования: 23.04.2026; принята к публикации: 05.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 18.03.2026; approved after review: 23.04.2026; accepted for publication: 05.05.2026

Информация об авторах:

Травин Игорь Александрович, инженер кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5), e-mail: 7greenline@mail.ru

Козодаев Алексей Станиславович, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5), доктор технических наук, профессор, e-mail: kozodaev@bmstu.ru, SPIN-код: 7802-8001

Кондратьева Мария Владимировна, ассистент кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5), e-mail: tmv@bmstu.ru, SPIN-код: 6392-9471

Information about the authors:

Travin Igor A., engineer of the department of ecology and industrial of safety Bauman Moscow state technical university (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5), e-mail: 7greenline@mail.ru

Kozodaev Alexey S., professor of the department of ecology and industrial safety of Bauman Moscow state technical university (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5), doctor of technical sciences, professor, e-mail: kozodaev@bmstu.ru, SPIN: 7802-8001

Kondratyeva Maria V., assistant at the department of ecology and industrial safety of Bauman Moscow state technical university (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5), e-mail: tmv@bmstu.ru, SPIN: 6392-9471

Научная статья

УДК 621.436.068; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-198-209

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ**

✉ Мельберт Алла Александровна;

Машенская Екатерина Александровна.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,
Россия✉ aamelbert@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения экологической безопасности автотракторной техники путем снижения токсичности отработавших газов дизеля за счет охлаждения наддувочного воздуха после турбокомпрессора и применения каталитической очистки в нейтрализаторе конструкции Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. По результатам испытаний по 13-режимному испытательному циклу на дизеле 6ЧН15/18, обнаружено, что при снижении температуры наддувочного воздуха с 423 до 303 К на режиме полной мощности, хотя выбросы и превышают допустимые значения по нормам ЕВРО и России, но наблюдается уменьшение оценочных показателей по выбросам оксидов азота с 2,26 до 1,45 раза для ЕВРО-3 и с 2,26 до 1,21 – для России, по твердым частицам оценочные показатели уменьшились с 1,4 до 1,1 раза. Поэтому охлаждение наддувочного воздуха следует рассматривать как эффективное средство воздействия на рабочий процесс. Наблюдалось снижение техногенной нагрузки на окружающую среду в 1,39 раза. При установке в систему выпуска каталитического нейтрализатора появляются реальные перспективы выполнения норм ЕВРО-3, ЕВРО-4 и России по нормируемым компонентам. Оценочные показатели по оксидам азота – снизились на 47 %; по оксиду углерода – на 79 %; по углеводородам – на 57 %; по твердым частицам – более чем в три раза. Техногенная нагрузка при установке каталитического нейтрализатора уменьшилась в 1,98 раза. Экспериментально подтверждено, что охлаждение наддувочного воздуха после турбокомпрессора может приводить к снижению выбросов NO_x через воздействие на рабочий процесс, сократить техногенную нагрузку на окружающую среду от вредных веществ 1,39 раз и рекомендуется к использованию для выполнения норм ЕВРО и России в перспективе. Применение каталитического нейтрализатора в системе выпуска отработавших газов позволило снизить техногенную нагрузку от вредных выбросов на окружающую среду в 1,98 раза. Необходимо применение комплексных мероприятий, например, применение охлаждения наддувочного воздуха и каталитической очистки отработавших газов.

Ключевые слова: вредные выбросы, охлаждение, наддувочный воздух, дизельный двигатель, отработавшие газы, каталитический, нейтрализатор

Для цитирования: Мельберт А.А., Машенская Е.А. Совершенствование экологических показателей дизельных двигателей автотракторной техники // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 198–209. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-198-209

Scientific article

IMPROVING THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF DIESEL ENGINES IN TRACTOR VEHICLES

✉Melbert Alla A.;

Mashenskaya Ekaterina A.

Polzunov Altai state technical university, Barnaul, Russia

✉aamelbert@mail.ru

Abstract. The article discusses the issues of ensuring the environmental safety of motor vehicles by reducing the toxicity of diesel exhaust gases through cooling the charge air (CA) after the turbocharger and using catalytic cleaning in the neutralizer designed by Polzunov Altai state technical university. According to the test results for the 13-mode test cycle on a 6HH 15/18 diesel engine, it was found that when the charge air temperature is reduced from 423 to 303 K at full power, although the emissions exceed the permissible values according to EURO and Russian standards, there is a decrease in nitrogen oxide emission rates by a factor of 2,26 to 1,45 for EURO-3 and from 2,26 to 1,21 for Russia, while solid particle emission rates decreased by a factor of 1,4 to 1,1. Therefore, charge CA should be considered as an effective means of influencing the working process. A decrease in the technogenic load on the environment by a factor of 1,39 was observed. When a catalytic converter is installed in the exhaust system, real prospects emerge for meeting EURO-3, EURO-4, and Russian standards for regulated components. Emission indicators for nitrogen oxides decreased by 47%; for carbon monoxide – by 79 %; for hydrocarbons – by 57 %; for particulate matter – by more than three times. The technogenic load when installing the catalytic converter decreased by a factor of 1,98. Conclusions. It has been experimentally confirmed that CA after the turbocharger can reduce NO_x emissions through its impact on the working process, reduce the technogenic load from harmful substances by a factor of 1,39, and is recommended for meeting EURO and Russian standards in the future. The use of a catalytic converter in the exhaust gas system has reduced the technogenic load from harmful emissions by a factor of 1,98. The application of comprehensive measures, such as charge CAr cooling and catalytic exhaust gas cleaning, is necessary.

Keywords: harmful emissions, cooling, supercharged air, diesel engine, exhaust gases, catalytic converter

For citation: Melbert A.A., Mashenskaya E.A. Improving the environmental performance of diesel engines in tractor vehicles // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 198–209. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-198-209

Введение. Состояние проблемы

Проблема снижения вредных выбросов дизельных двигателей приобретает все большую значимость в современных условиях из-за все ужесточающихся требований стандартов к экологической безопасности и комфортности, предъявляемых к автотракторной технике [1–3]. Целым рядом производителей дизелей не достигнуто соответствие уровней вредных выбросов стандартам ЕВРО-4, ЕВРО-5 и ЕВРО-6 [2, 4]. Согласно экспериментальным данным на режимах полной нагрузки концентрация вредных веществ в отработавших газах дизельных двигателей варьируется в широких пределах. Так, удельные выбросы оксидов азота (NO_x) составляют от 10 до 30 г/(кВт·ч), оксида углерода (CO) – от 1,5 до 12 г/(кВт·ч), оксидов серы (SO_x) – от 0,4 до 2,5 г/(кВт·ч). Суммарные углеводороды (C_xH_y) находятся в интервале 1,5–8,0 г/(кВт·ч), альдегиды – 0,06–0,2 г/(кВт·ч), а бенз(а)пирен – 1·10^{–6}–2·10^{–6} г/(кВт·ч). Выбросы твердых частиц (ТЧ) достигают 0,25–2,00 г/(кВт·ч). Указанные уровни эмиссии обуславливают повышенную техногенную нагрузку на окружающую среду [5, 6].

Вопросы снижения экологической нагрузки от поршневых двигателей нашли отражение в исследованиях как отечественных, так и зарубежных авторов, включая В.Н. Луканина, В.Ф. Кутенева, В.А. Звонова, Н.А. Иващенко, Л.А. Новикова, Д.О. Онищенко, Н.Н. Патрахальцева, В.Ф. Фомина, И.В. Кузнецова, Р.В. Малова, В.И. Панчишного, а также К.С. Taylor, J.B. Heywood, J.A. Dumesic, N.Yu. Topsøe, G.C. Koltakis, G.N. Pontikakis, D.L. Chatterjee и др. [6–11].

В настоящее время достижение требований нормативных документов ЕВРО-4, ЕВРО-5 и ЕВРО-6 не представляется возможным с помощью отдельных технических решений [3, 5, 12, 13]. Обобщение опыта, накопленного в области совершенствования дизельных двигателей с целью сокращения выбросов вредных веществ при одновременном улучшении топливной эффективности, показывает, что в обозримой перспективе конкурентоспособность сохраняют как атмосферные дизели, так и агрегаты с газотурбинным наддувом [14, 15]. Наряду с ужесточением нормативов наблюдается и смещение акцентов в системе приоритетных требований к дизельным двигателям [3, 14]. Если в 1990-х гг. для автомобильных дизелей основными критериями выступали динамические качества, расход топлива, его доступность, токсичность отработавших газов и технологичность производства, то современная иерархия приоритетов смещена в сторону ресурсосбережения, экологических показателей, экономичности, динамики и производственных возможностей [10, 14, 15].

Обеспечение выполнения требований стандартов – актуальная проблема, решение которой не должно приводить к снижению топливной экономичности дизелей [3, 5, 14]. Проведенный анализ отечественных и зарубежных разработок показал, что основные направления в решении проблемы снижения вредных выбросов с отработавшими газами дизелей сводятся к следующим:

- совершенствование рабочих процессов дизелей;
- применение малотоксичных регулировок топливной аппаратуры и систем дизелей;
- использование газотурбинного наддува с охлаждением наддувочного воздуха (ОНВ);
- управление составом топлив и применение специальных присадок в них;
- применение каталитической очистки отработавших газов [9, 16–19].

Эффективность снижения токсичности отработавших газов дизеля за счет ОНВ после турбокомпрессора подтверждена результатами многочисленных исследований. Данный подход характеризуется как экономически целесообразный и технологически эффективный способ увеличения мощностных показателей, уменьшения тепловой напряженности деталей двигателя и сокращения эмиссии оксидов азота при одновременном росте эффективного коэффициента полезного действия на 2–4 %.

Согласно данным компании Cummins Inc. возможный прирост эффективного КПД (η_e) при реализации различных технических решений составляет: применение компаундной турбины – 7 %; повышение энергии впрыска топлива – 2 %; увеличение КПД турбокомпрессора – 5 %; использование теплозащитных покрытий – 3 %; установка преобразователей импульсов перед турбокомпрессором – 2 %. Допускается также комбинирование перечисленных мероприятий с различными способами смесеобразования.

Применение каталитических нейтрализаторов для очистки отработавших газов дизелей описаны в работах Б.А. Адамовича, С.В. Белова и Л.Л. Морозова, И.Л. Варшавского и Р.В. Малова, В.Я. Груданова, Г.С. Дугина, О.И. Жегалина и Н.А. Китросского, Ю.С. Медведева, А.Л. Новоселова, М.О. Османова, В.И. Смайлиса, К.С. Taylor, J.B. Heywood, J.A. Dumesic и др. [6–9, 11–13, 15–20].

Согласно оценкам ведущих специалистов в области дизелестроения, автомобилестроения и тракторостроения выполнение перспективных нормативных требований к выбросам вредных веществ в атмосферу предполагает обязательное применение фильтров ТЧ и каталитических нейтрализаторов отработавших газов. Использование таких устройств обеспечивает снижение содержания продуктов неполного сгорания топлива на 85–90 % [6–8, 13, 16, 18–20].

Цель настоящей работы – повышение уровня экологической безопасности автотракторной техники путем сокращения эмиссии вредных веществ за счет ОНВ после турбокомпрессора и применения каталитической очистки отработавших газов в нейтрализаторах с каталитическими блоками, полученными методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Объекты, методика и результаты исследования

Испытания были проведены в два этапа. На первом этапе испытаний была оценена возможность снижения токсичности отработавших газов дизеля путем ОНВ после турбокомпрессора. Эксперимент заключался в следующем: на установившихся режимах проводился отбор отработавших газов дизеля на анализ их состава и определение дисперсности ТЧ при изменении температуры наддувочного воздуха после турбокомпрессора перед впрыском в цилиндры с 423 до 303 К путем увеличения потока охлаждающей воды в теплообменники типа «воздух – вода». Экспериментальные исследования выполнялись в соответствии с 13-режимным испытательным циклом на дизельном двигателе 6ЧН15/18, имеющем следующие основные характеристики: номинальная мощность – 250 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1900 мин⁻¹, удельный эффективный расход топлива – 220 г/(кВт·ч), угар масла – 0,29 % от расхода топлива. В качестве топлива использовался продукт марки Л-0,2-40 по ГОСТ 305–2013 «Топливо дизельное. Технические условия», смазочный материал – масло МТ-16П, предназначенное для автомобильной техники.

Условия проведения испытаний характеризовались следующими параметрами: температура воздуха в боксе 295–297 К, атмосферное давление 750–752 мм рт. ст., относительная влажность 76–80 %.

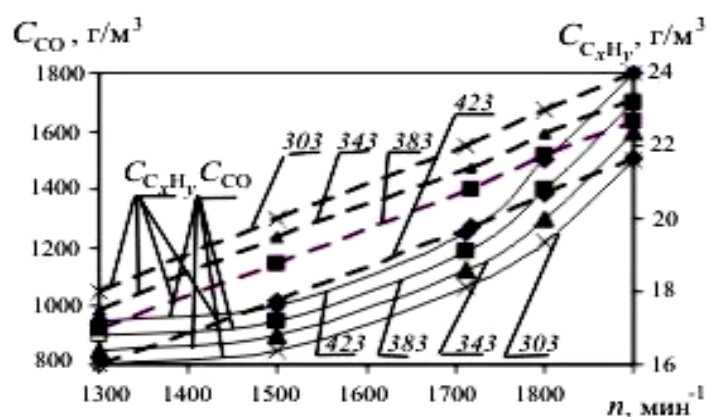
На втором этапе были проведены испытания каталитического нейтрализатора конструкции Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. (АлтГТУ) по патенту МПКF01N3/28 № 2854468 С1 и оценка эффективности очистки отработавших газов. Эксперимент проводился при следующих параметрах внешней среды: температура воздуха в боксе поддерживалась в диапазоне 296–303 К, атмосферное давление соответствовало интервалу 748–750 мм рт. ст., относительная влажность варьировалась в пределах 72–74 %. При испытаниях на установившихся режимах проводили отбор отработавших газов, анализ их состава и определялась дисперсность ТЧ при пропускании газов через каталитический нейтрализатор (КН).

Результаты и их обсуждение

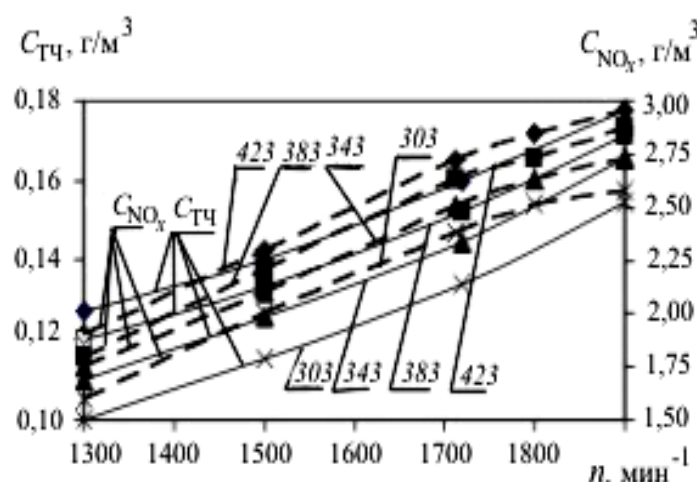
В результате оценки возможности снижения токсичности отработавших газов дизеля путем ОНВ после турбокомпрессора было обнаружено, что снижение температуры наддувочного воздуха при давлении наддува $P_k = 0,223$ МПа значительно влияет на уровни вредных выбросов, что объясняется увеличением коэффициента наполнения η_v . Так, при $n=1900$ мин⁻¹ и $N_e = 250$ кВт $\eta_v = 0,88$ ($P_k = 0,23$ МПа). Это сопровождается снижением уровней выбросов NO_x и C_xH_y (рис. 1).

Изменение выбросов СО при ОНВ объясняется увеличением полноты сгорания при увеличении коэффициента избытка воздуха α . Выбросы C_xH_y увеличиваются при более интенсивном ОНВ, на взгляд авторов, вследствие трехмерного охлаждения пристеночных зон при наполнении цилиндров холодным воздухом и появлении зон у стенок с пониженными температурами (рис. 1 а).

Изменения характера выбросов NO_x (рис. 1 б) можно объяснить тем, что температура газов в цилиндре снижается и условие для окисления азота ухудшаются. При одинаковых параметрах впрыска топлива ухудшаются условия его испарения, а период задержки воспламенения возрастает.



а)



б)

Рис. 1. Влияние температуры наддувочного воздуха на уровни вредных выбросов с дизеля 6ЧН15/18 по внешней скоростной характеристике

В целях определения возможности применения фильтров ТЧ в выпускной системе проведен анализ дисперсного состава ТЧ в зависимости от изменения температуры наддувочного воздуха. Результаты оценки обработки фильтров, полученные с помощью дымометра Bosch, представлены на графиках рис. 2 и показывают, что глубокое охлаждение T_K приводит к увеличению дисперсности ТЧ.

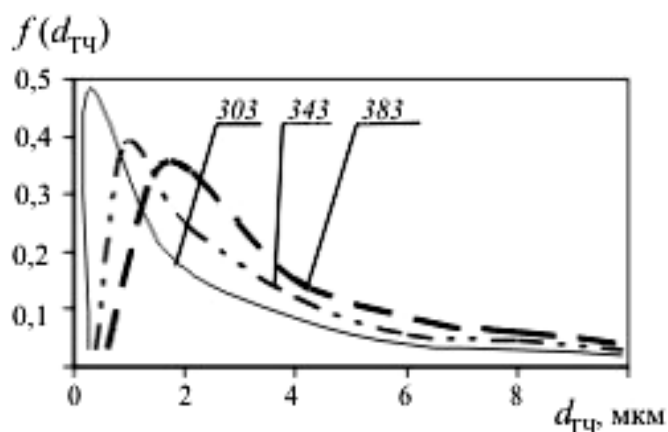


Рис. 2. Дисперсность ТЧ при изменении температуры наддувочного воздуха

Установлено, что усиление интенсивности ОНВ способствует существенному сокращению эмиссии ТЧ с отработавшими газами.

Происходит это вследствие снижения интенсивности процессов крекинга капель топлива и увеличения скорости выгорания ТЧ.

Влияние газотурбинного наддува и ОНВ на выбросы ТЧ показано на графиках рис. 3 и 4.

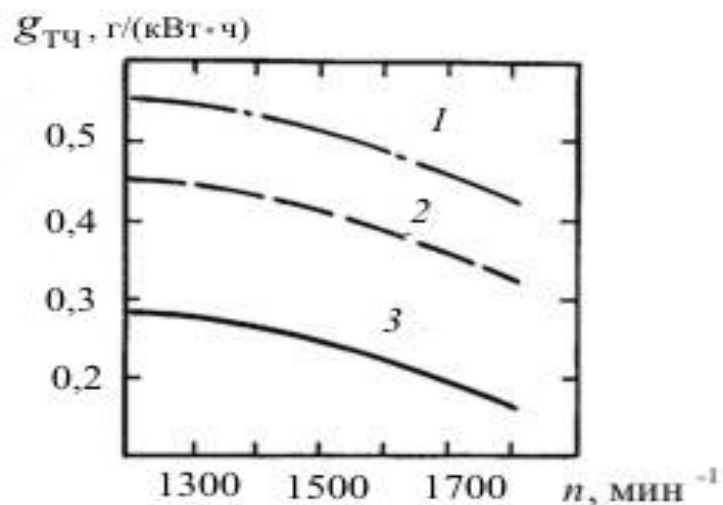


Рис. 3. Зависимость выбросов ТЧ от частоты вращения коленчатого вала при работе дизеля по внешней скоростной характеристике: 1 – без наддува; 2 – с газотурбинным наддувом (ГТН); 3 – с ГТН и ОНВ

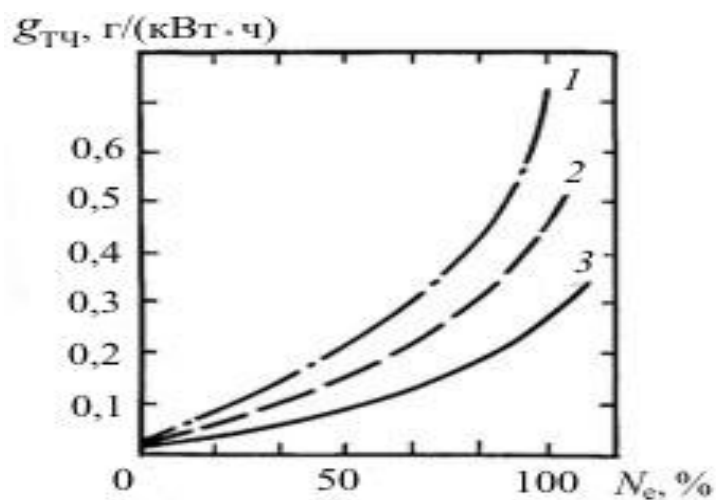


Рис. 4. Зависимость выбросов ТЧ от нагрузки при частоте вращения коленчатого вала 1 900 мин⁻¹: 1 – без наддува; 2 – с ГТН; 3 – с ГТН и ОНВ

В табл. 1 представлены полученные оценочные показатели и степень их превышения по стандартам ЕВРО и России при изменении температуры наддувочного воздуха после компрессора (T_k).

Таблица 1

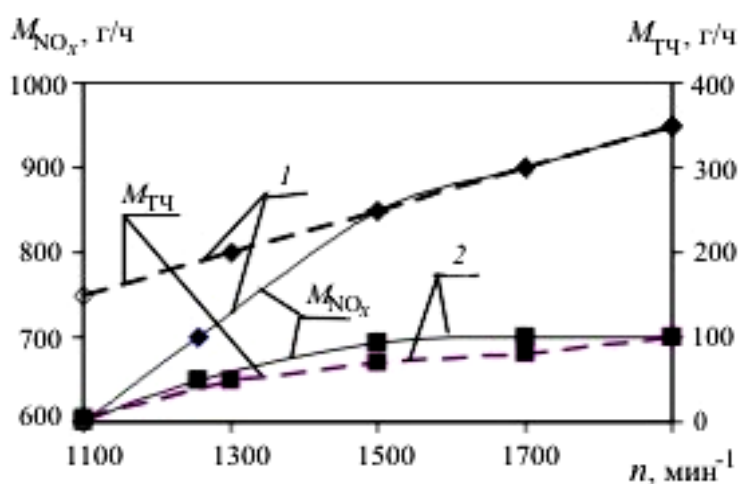
Влияние ОНВ на удельные выбросы вредных веществ

Вещество	Удельные выбросы вредных веществ, г/(кВт·ч)								
	Фактические значения при T_k , К,				Норматив / превышение (+) или снижение (–) относительно норматива при $T_k = 303$ К				
	423	383	343	303	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5	ЕВРО-6	для России (с 2021 г.)
ТЧ	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10 / +10 %	0,02 / +450 %	0,02 / +450 %	0,01 / +1 000 %	0,10 / +10 %
C_xH_y	1,70	1,95	2,04	2,40	0,60 / +300 %	0,46 / +422 %	0,25 / +860 %	0,13 / +1 746 %	0,40 / +500 %
СО	10,5	8,82	7,52	6,11	2,00 / +206 %	1,50 / +307 %	1,50 / +307 %	1,50 / +307 %	3,50 / +75 %
NO_x	11,3	9,72	8,06	7,26	5,00 / +45 %	3,50 / +107 %	2,00 / +263 %	0,40 / +1 715 %	6,00 / +21 %

Анализ данных табл. 1 показал, что при снижении температуры наддувочного воздуха с 423 до 303 К на режиме полной мощности, хотя выбросы и превышают допустимые значения по нормам ЕВРО и России, но наблюдается уменьшение оценочных показателей по выбросам оксидов азота с 2,26 до 1,45 раза для ЕВРО-3 и с 2,26 до 1,21 – для России, по ТЧ оценочные показатели уменьшились с 1,4 до 1,1 раза. Поэтому ОНВ следует рассматривать как эффективное средство воздействия на рабочий процесс.

При серийной комплектации (температура наддувочного воздуха $T_k = 383$ К) значение техногенной нагрузки на окружающую среду составило 79,63 ут/г. Снижение температуры наддувочного воздуха до $T_k = 303$ К позволило уменьшить данный показатель до 57,22 ут/г, что соответствует сокращению техногенной нагрузки в 1,39 раза.

Результаты экспериментальной оценки влияния установки КН в выпускную систему дизеля 5Д6–192 на уровни вредных выбросов с отработавшими газами, полученные по внешней скоростной характеристике, приведены на рис. 5.



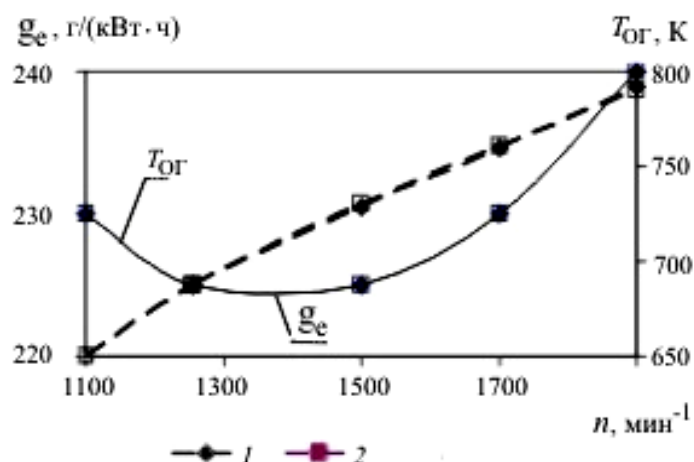


Рис. 5. Влияние установки КН в систему выпуска дизеля 5Д6-192 на уровни вредных выбросов с отработавшими газами по внешней скоростной характеристике:
1 – без нейтрализатора; 2 – с нейтрализатором

С целью определения целесообразности применения фильтров ТЧ в выпускном тракте выполнен анализ дисперсного состава ТЧ. По результатам обработки фильтров, полученных с помощью дымометра Bosch, выявлены распределения ТЧ по фракциям (рис. 6).

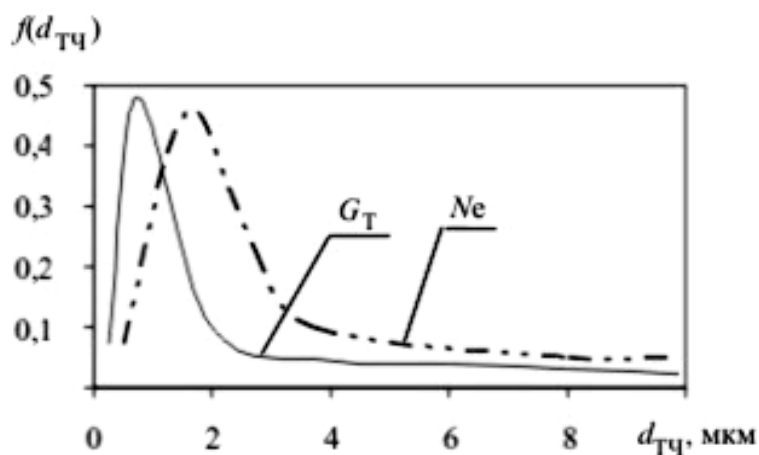


Рис. 6. Дисперсность ТЧ

В табл. 2 приведены данные по оценке эффективности очистки в КН.

Таблица 2

Эффективность очистки отработавших газов в КН

Вещество	Удельные выбросы, г/(кВт·ч)		Норматив / превышение (+) или снижение (–) относительно норматива при установке КН, %				
	без КН	с КН	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5	ЕВРО-6	для России (с 2021 г.)
ТЧ	0,35	0,13	0,10 / +30 %	0,02 / +550 %	0,02 / +550 %	0,01 / +1 200 %	0,10 / +30 %
C _x H _y	0,33	0,12	0,60 / –80 %	0,46 / –74 %	0,25 / –52 %	0,13 / –8 %	0,40 / –70 %
СО	11,90	2,62	2,00 / +31 %	1,50 / +75 %	1,50 / +75 %	1,50 / +75 %	3,50 / –25 %
NO _x	11,13	5,93	5,00 / +19 %	3,50 / +69 %	2,00 / +197 %	0,40 / +1 383 %	6,00 / –1 %

Анализ данных табл. 2 показал, что при установке в систему выпуска КН появляются вполне реальные перспективы выполнения норм ЕВРО-3, ЕВРО-4, России по выбросам оксидов азота, оксида углерода, углеводородов. Обнаружено, что при установке КН в систему выпуска оценочные показатели вредных выбросов изменяются следующим образом: по оксидам азота – снижаются на 47 %; по оксиду углерода – на 79 %; по углеводородам – на 57 %; по ТЧ – более чем в три раза.

Значение техногенной нагрузки при серийной комплектации составило 53,44 ут/г, тогда как при использовании нейтрализатора данный показатель снизился до 26,52 ут/г, что соответствует уменьшению в 1,98 раза.

Заключение

1. ОНВ после ТКР может через воздействие на рабочий процесс приводить к значительному снижению выбросов NO_x , и его следует использовать для выполнения норм ЕВРО и в дальнейшем.

2. ОНВ позволило сократить техногенную нагрузку на окружающую среду от вредных веществ в составе отработавших газов в 1,39 раза.

3. Применение КН в системе выпуска отработавших газов позволило снизить техногенную нагрузку от вредных выбросов на окружающую среду в 1,98 раза.

4. Выполнение норм ЕВРО-4, ЕВРО-5, ЕВРО-6 по выбросам ТЧ будет затруднено без применения специальных систем фильтрации отработавших газов.

5. Необходимо применение комплексных мероприятий по снижению общей техногенной нагрузки на окружающую среду, например, применение ОНВ и каталитической очистки отработавших газов.

Список источников

1. Черноиванов В.И., Колчин А.В., Мехлин В.М. Обеспечение экологической безопасности тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин при эксплуатации // Тракторы и с.-х. машины. 2004. № 2. С. 83–89. EDN: RZXIIX.

2. Johnson T. Diesel Emission Control in Review/T/ Johnson // SAEInt J.Fuels Lubr. 2009. № 2 (1). Р. 68–81.

3. Стрельников В.А. Разработка и исследование способов снижения токсичности выхлопа дизеля: монография. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2014. 352 с. EDN: TIGVAZ.

4. Козлов А.В., Теренченко А.С., Васильев А.В. Анализ экологических требований «ЕВРО-6» к автомобильным дизелям // Журнал автомобильных инженеров. 2017. № 3. С. 40–46. EDN: YQFRRZ.

5. Мельберт А.А., Нгуен Ч.Х., Машенский А.В. Применение топливopодpающей аппаратуры с увеличенным давлением впрыска для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89. № 5. С. 325–331. DOI: 10.17816/0321-4443-108145

6. Панчишный В.И. Нейтрализаторы отработавших газов дизелей // Автомобильная промышленность. 2008. № 11. С. 6–8. EDN: JXFCNH.

7. К вопросу повышения эффективности работы каталитического нейтрализатора / В.А. Соломин [и др.] // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. Т. 11. № 1. С. 63. EDN: YZNNHH.

8. Нелидкин А.В., Бoryчев С.Н., Олейник Д.О. Устройство для очистки отработавших газов дизельных двигателей внутреннего сгорания // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 8 (202). С. 92–97. DOI: 10.53083/1996-4277-2021-202-08-92-97

9. Результаты применения пористых проницаемых СВС-каталитических блоков в многоступенчатых нейтрализаторах отработавших газов дизелей / А.А. Мельберт [и др.] // Известия МГТУ МАМИ. 2022. Т. 16. № 3. С. 201–208. DOI: 10.17816/2074-0530-106160

10. Majewski W. Diesel Oxidation Catalyst [Electronic resource] // DieselNet Technology Guide. 2012.

11. Real world CO₂ and NO_x emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars / R. O'Driscoll [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 621. № 15. P. 282–290. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.271
12. Measurement of Gaseous Exhaust Emissions of Light-Duty Vehicles in Preparation for Euro 7: A Comparison of Portable and Laboratory Instrumentation / V. Valverde [et al.] // *Energies* 2023. № 16. P. 2561. DOI: 10.3390/en16062561
13. Яшник С.А. Каталитические системы нейтрализации выбросов автомобилей с дизельным двигателем: современные задачи и технологические решения по улучшению окислительного катализатора // *Катализ в промышленности*. 2022. Т. 22. № 2. P. 25–41. DOI: 10.18412/1816-0387-2022-2-25-41
14. Методы снижения токсичности отработавших газов дизеля / П. Гаврилов [и др.] // *Наука и техника Казахстана*. 2019. № 1. С. 75–83. EDN: ZZDMHJ.
15. Гриценко А.В. Анализ методов диагностирования каталитических нейтрализаторов и разработка эффективных методик их контроля // *Известия Дагестанского ГАУ*. 2025. Т. 2. № 26. С. 230–240. DOI: 10.52671/26867591-2025-2-230
16. Рассел А., Эплинг У.С. Катализаторы окисления дизельного топлива *Cat. Rev.* // *Sci. Eng.* 2011. № 53 (4). P. 337–423. DOI: 10.1080/01614940.2011.596429
17. Бадалян Л.Х., Курдюков В.Н., Алейникова А.М. Теоретические основы системы учета фактических выбросов загрязняющих веществ автотранспортом // *Безопасность жизнедеятельности*. 2013. № 5. С. 31–37. EDN: QAIAGJ.
18. Ерохов В.И., Надарейшвили Г.Г., Блинов А.С. Анализ эффективности использования восстановителя оксидов азота отработавших газов дизелей // *Двигателестроение*. 2022. № 3 (289). С. 48–63. DOI: 10.18698/jec.2022.3.48-63
19. Setten B., Makkee M., Moulijn J. Science and technology of catalytic diesel particulate filters // *Catalyses reviews*. 2001. № 43. P. 489–564. DOI: 10.1081/CR-120001810
20. Measurement and prediction of filtration efficiency evolution of soot loaded diesel particulate filters / P. Tandon [et al.] // *Chemical Engineering Science*. 2010. Vol. 65. № 16. P. 4751–4760. DOI: 10.4271/2012-01-0363

References

1. Chernouvanov V.I., Kolchin A.V., Mekhlin V.M. Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti traktorov i samohodnyh sel'skohozyajstvennyh mashin pri ekspluatatsii // *Traktory i s.-h. mashiny*. 2004. № 2. S. 83–89. EDN: RZXIIX.
2. Johnson T. Diesel Emission Control in Review/T/ Johnson // *SAEInt J.Fuels Lubr.* 2009. № 2 (1). P. 68–81.
3. Strel'nikov V.A. Razrabotka i issledovanie sposobov snizheniya toksichnosti vyhlopa dizelya: monografiya. Saarbyrukken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 352 s. EDN: TIGVAZ.
4. Kozlov A.V., Terenchenko A.S., Vasil'ev A.V. Analiz ekologicheskikh trebovanij «EVRO-6» k avtomobil'nyh dizelyam // *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*. 2017. № 3. S. 40–46. EDN: YQFRRZ.
5. Mel'bert A.A., Nguen Ch.H., Mashenskij A.V. Primenenie toplivopodayushchej apparatury s uvelichennym davleniem vpryska dlya snizheniya tekhnogennoj nagruzki na okruzhayushchuyu sredu // *Traktory i sel'hozmashiny*. 2022. Т. 89. № 5. S. 325–331. DOI: 10.17816/0321-4443-108145
6. Panchishnyj V.I. Nejtralizatory otrabotavshih gazov dizelej // *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2008. № 11. S. 6–8. EDN: JXFCNH.
7. K voprosu povysheniya effektivnosti raboty kataliticheskogo nejtralizatora / V.A. Solomin [i dr.] // *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2017. Т. 11. № 1. С. 63. EDN: YZNNHH.
8. Nelidkin A.V., Borychev S.N., Olejnik D.O. Ustrojstvo dlya ochistki otrabotavshih gazov dizel'nyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya // *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021. № 8 (202). S. 92–97. DOI: 10.53083/1996-4277-2021-202-08-92-97

9. Rezul'taty primeneniya poristyh pronicaemyh SVS-kataliticheskikh blokov v mnogostupenchatykh nejtralizatorah otrabotavshih gazov dizelej / A.A. Mel'bert [i dr.] // Izvestiya MGTU MAMI. 2022. T. 16. № 3. С. 201–208. DOI: 10.17816/2074-0530-106160
10. Majewski W. Diesel Oxidation Catalyst [Electronic resource] // DieselNet Technology Guide. 2012.
11. Real world CO₂ and NO_x emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars / R. O'Driscoll [et al.] // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 621. № 15. P. 282–290. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.271
12. Measurement of Gaseous Exhaust Emissions of Light-Duty Vehicles in Preparation for Euro 7: A Comparison of Portable and Laboratory Instrumentation / V. Valverde [et al.] // Energies 2023. № 16. P. 2561. DOI: 10.3390/en16062561
13. Yashnik S.A. Kataliticheskie sistemy nejtralizacii vybrosov avtomobilej s dizel'nym dvigatelem: sovremennye zadachi i tekhnologicheskie resheniya po uluchsheniyu okislitel'nogo katalizatora // Kataliz v promyshlennosti. 2022. T. 22. № 2. P. 25–41. DOI: 10.18412/1816-0387-2022-2-25-41
14. Metody snizheniya toksichnosti otrabotavshih gazov dizelya / P. Gavrilov [i dr.] // Nauka i tekhnika Kazakhstana. 2019. № 1. S. 75–83. EDN: ZZDMHJ.
15. Gricenko A.V. Analiz metodov diagnostirovaniya kataliticheskikh nejtralizatorov i razrabotka effektivnykh metodik ih kontrolya // Izvestiya Dagestanskogo GAU. 2025. T. 2. № 26. С. 230–240. DOI: 10.52671/26867591-2025-2-230
16. Rassel A., Epling U.S. Katalizatory okisleniya dizel'nogo topliva Cat. Rev. // Sci. Eng. 2011. № 53 (4). P. 337–423. DOI: 10.1080/01614940.2011.596429
17. Badalyan L.H., Kurdyukov V.N., Alejnikova A.M. Teoreticheskie osnovy sistemy ucheta fakticheskikh vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv avtotransportom // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2013. № 5. S. 31–37. EDN: QAIAGJ.
18. Erohov V.I., Nadarejshvili G.G., Blinov A.S. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya vosstanovitelya oksidov azota otrabotavshih gazov dizelej // Dvigatelsestroenie. 2022. № 3 (289). S. 48–63. DOI: 10.18698/jec.2022.3.48-63
19. Setten V., Makkee M., Moulijn J. Science and technology of catalytic diesel particulate filters // Catalyses reviews. 2001. № 43. P. 489–564. DOI: 10.1081/CR-120001810
20. Measurement and prediction of filtration efficiency evolution of soot loaded diesel particulate filters / P. Tandon [et al.] // Chemical Engineering Science. 2010. Vol. 65. № 16. P. 4751–4760. DOI: 10.4271/2012-01-0363

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 31.03.2026; одобрена после рецензирования: 27.04.2026;
принята к публикации: 07.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 31.03.2026; approved after review: 27.04.2026;
accepted for publication: 07.05.2026

Сведения об авторах:

Мельберг Алла Александровна, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (656038, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46), доктор технических наук, профессор, e-mail: aamelbert@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3973-8315>, SPIN-код: 5949-5831

Машенская Екатерина Александровна, ведущий инженер по эксплуатации, ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (656038, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46), e-mail: suzuki468@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3122-0412>, SPIN-код: 8323-5725

Information about the authors:

Melbert Alla A., professor of department of life safety of Polzunov Altai state technical university (656038, Barnaul, Leninaave, 46), doctor of technical sciences, professor, e-mail: aamelbert@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3973-8315>, SPIN: 5949-5831

Mashenskaya Ekaterina A., leading operations engineer, assistant, of department of life safety of Polzunov Altai state technical university (656038, Barnaul, Leninaave, 46), e-mail: suzuki468@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3122-0412>, SPIN: 8323-5725

Научная статья

УДК 631.1: 711.14: 504.61; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-210-219

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СЛЕД СИСТЕМ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕЛЬСКИХ И ДРУГИХ ТЕРРИТОРИЙ СТРУКТУР ОБЩЕРОССИЙСКОГО КЛАССИФИКАТОРА ВИДОВ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ: СОСТОЯНИЕ, ПОСЛЕДСТВИЯ И ПУТИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ

✉ Шкрабак Роман Владимирович;

Шкрабак Владимир Степанович.

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург – Пушкин, Россия.

Савельев Анатолий Петрович.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Республика Мордовия, г. Саранск, Россия

✉ Shkrabakrv@mail.ru

Аннотация. Экологические следы современных производств в стране и мире достигли значений, существенным образом влияющих на климат, и нуждаются в оперативном их сокращении. Мировое внимание проблемам экологической безопасности современной цивилизации является результатом несовершенства технологий многообразных производств и методов и средств их реализации. Последние, как известно, в части видов деятельности применительно к сельским территориям ориентированы на продовольственное обеспечение населения. Работа авторов в решении разнообразных теоретико-практических вопросов в этом направлении подтверждает приведенными в статье результатами наличие резервов в части сокращения влияния экологических следов аграрного производства (растениеводства, животноводства, птицеводства, плодоовощеводства, переработки, хранения, реализации и других мероприятий) на климат планеты. Анализ показывает, что каждое из направлений жизнедеятельности аграрного сектора Общероссийского классификатора видов экономической деятельности аграрного производства обладает резервами в части повышения эффективности производств и сокращения их отходов, включая бытовые. В этом направлении по линии государства совершенствуется комплекс мер, способствующих достижению желаемых результатов. Основными путями их решения являются новации по всем без исключения направлениям жизнедеятельности сельских территорий – фундамента обеспечения продовольственной безопасности. Отличительной особенностью современности в обсуждаемом направлении является неполное соответствие равновесия потребности общества в продовольствии и экологических следов тех производств, которые обеспечивают продовольственную достаточность. Целью исследований является оценка экологического следа структур жизнедеятельности сельских территорий, их последствий в сравнении с данными структур Общероссийского классификатора видов экономической деятельности и путей нейтрализации авторскими инновационными решениями.

Ключевые слова: жизнедеятельность сельских территорий, структуры Общероссийского классификатора видов экономической деятельности, экологический след, состояние, последствия, пути нейтрализации

Для цитирования: Шкрабак Р.В., Шкрабак В.С., Савельев А.П. Экологический след систем жизнедеятельности сельских и других территорий структур Общероссийского классификатора видов экономической деятельности: состояние, последствия и пути нейтрализации // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 210–219. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-210-219

Scientific article

THE ECOLOGICAL FOOTPRINT OF THE VITAL ACTIVITY SYSTEMS OF RURAL AND OTHER TERRITORIES OF THE ALL-RUSSIAN CLASSIFIER OF ECONOMIC ACTIVITIES STRUCTURES: CONDITION, CONSEQUENCES AND WAYS OF NEUTRALIZATION

✉ Shkrabak Roman V.;

Shkrabak Vladimir S.

Saint-Petersburg state agrarian university, Saint-Petersburg – Pushkin, Russia.

Savelyev Anatoly P.

National research Mordovian state university named after N.P. Ogareva,

The Republic of Mordovia, Saransk, Russia

✉ Shkrabakrv@mail.ru

Abstract. The environmental footprints of modern production in the country and in the world have reached values that have a significant impact on the climate, and they need to be reduced promptly. The global attention to the environmental safety of modern civilization is a result of the imperfections in the technologies and methods of various production processes. As we know, these methods are focused on providing food for the population in rural areas. The authors' work in solving various theoretical and practical issues in this area confirms, based on the results presented in the article, the existence of reserves for reducing the impact of the environmental footprints of agricultural production (plant growing, animal husbandry, poultry farming, horticulture, processing, storage, sales, and other activities) on the planet's climate. The analysis shows that each of the areas of activity in the agricultural sector of the All-Russian Classifier of Economic Activities in Agricultural Production has reserves for improving the efficiency of production and reducing waste, including household waste. In this area, the government is improving a set of measures to achieve the desired results. The main ways to solve these problems are innovations in all areas of rural life, which are the foundation of food security. A distinctive feature of the current situation in this area is the incomplete balance between the needs of society for food and the environmental impact of the production processes that ensure food sufficiency. The purpose of the research is to assess the environmental footprint of rural areas and their consequences in comparison with the data from the All-Russian Classifier of Economic Activities and the ways to neutralize them using innovative solutions.

Keywords: vital activity of rural areas of All-Russian Classifier of Types of Activities structures, ecological footprint, condition, consequences, ways of neutralization

For citation: Shkrabak R.V., Shkrabak V.S., Savelyev A.P The ecological footprint of the vital activity systems of rural and other territories of the All-Russian classifier of types of activities structures: state, consequences and ways of neutralization // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 210–219. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-210-219

Введение

Можно отметить, что проблемы экологической безопасности в последнее десятилетие обоснованно подвергнуты широкому обсуждению в стране и мире в части влияния продовольственного сектора на ситуацию [1–13]^{1,2,3}. Речь идёт о животноводстве (крупный

¹ О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года: Указ Президента Рос. Федерации от 19 апр. 2017 г. № 176. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

² Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 8 сент. 2022 г. № 2567-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

³ Влияние сельского хозяйства на окружающую среду // Национальный проектный институт «Экология будущего». 2022. 14 дек. С. 4.

рогатый скот, свиноводство, коневодство, кролиководство, звероводство – норки, лисицы, песец, нутрии и др.), птицеводство (кура, утки, гуси, индюшки, перепела и др.). Кроме того, в экологическом плане дискуссионны экологические проблемы систем жизнедеятельности структур агропромышленного комплекса (АПК), в числе которых: котельные, тепло-, водо-, газо-, электро- и канализационные сети, используемое оборудование, техника, ремонтные мастерские, гаражи, ремонтно-строительные объекты, хранилища, пункты производственного характера по предпродажной подготовке урожаев, объекты ЖКХ, социальные объекты и другие, которые вносят весомый вклад в обсуждаемую проблему. Вполне очевидно, что перечисленные и другие виды деятельности в сельскохозяйственном производстве и АПК в целом в определённой степени влияют на экологическую безопасность. Анализ показывает, что все ОКВЭД оставляют экологический след в окружающей среде, отличаясь количественно и качественно.

В нашей стране данной проблеме уделяется внимание, на что ориентирует нормативно-правовая база, включая Конституцию Российской Федерации и ряд законов по охране окружающей среды на её основе. В числе основных из них: Федеральный закон от 10 января 2022 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»⁴, в котором изложены основы государственной политики в области охраны окружающей среды для сохранения природных ресурсов, обеспечивая экологическую безопасность. В Федеральном законе от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» изложены основы обращения с отходами производства и потребления, их складирования, переработки без ущерба природе и здоровью населения⁵. Федеральный закон № 109-ФЗ от 19 июля 1997 г. «О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами» определяет правила обращения с указанными в нём веществами⁶.

Отметим, что нормативно-правовое обеспечение экологической безопасности в результате экологических следов перечисленными и другими видами деятельности является базой для обеспечения требуемых условий жизнедеятельности по параметрам экологической безопасности.

Целью исследований является оценка экологического следа структур жизнедеятельности сельских территорий, их последствий в сравнении с данными структур Общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД) и путей нейтрализации авторскими инновационными решениями.

Методы исследований

Для анализа экологических следов структур систем жизнедеятельности сельских территорий, их последствий использовались методы статистического анализа применительно к многообразным структурам жизнедеятельности сельских территорий. При анализе и обосновании путей нейтрализации экологических опасностей внимание уделялось логическому анализу инновационных возможностей нейтрализации экологических опасностей и вредностей.

Результаты исследований и их обсуждение

Многообразие структур жизнедеятельности сельских территорий, как известно, в решающей степени связано с вопросами производства продовольственных культур, выращивания животных и птицы, частичной переработкой урожаев и множеством других видов

⁴ Об охране окружающей среды: Федер. закон от 10 янв. 2022 г. № 7-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

⁵ Об отходах производства и потребления: Федер. закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

⁶ О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами: Федер. закон от 19 июля 1997 г. № 109-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

работ в направлении продовольственного обеспечения населения страны. При этом веками остаётся стабильным стремление к повышению результативности и эффективности по всей номенклатуре требуемых для этого видов работ, невзирая на периоды года с учётом потребностей по технологиям и срокам их реализации при работе с растениями, животными, птицей, оборудованием и механизмами, агрохимикатами и другими материалами, обеспечивающими целевые потребности населения. Изложенные положения реализуются на основе Конституции Российской Федерации и ряде документов на её базе: номенклатура их приведена в Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 г. (Стратегия), утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 сентября 2022 г. № 2567-Р⁷. В Стратегии определены пути перспективного развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплекса с обеспечением его в первую очередь определяющим ресурсом страны – сельскими территориями. В основе их развития – продовольственное обеспечение в целях социального благополучия и высоких стандартов жизни населения. Изложенное предполагает и обеспечение экологической безопасности – важнейшей составляющей жизнедеятельности современного мира.

Касаясь сельскохозяйственного производства, реализуемого на сельскохозяйственных территориях, отметим, что, несмотря на то, что оно является далеко не самым благоприятным из всех структур ОКВЭД, к нему привлечено особое внимание в связи с важнейшей составляющей жизнедеятельности – обеспечением продовольствием. Речь идёт о базовых составляющих аграрного производства – растениеводстве, животноводстве, птицеводстве, плодоовощеводстве и других направлениях, производящих продукцию для продовольственного обеспечения. Можно отметить справедливость обвинений в неполной экологичности перечисленных видов деятельности сельскохозяйственного сектора экономики и обслуживающих их структур и видов деятельности. Кратко обозначим основной перечень обоснованных нареканий в части экологической безопасности по видам деятельности сельскохозяйственного производства, предварительно заметив, что повышение эффективности данных производств связано с необходимостью удовлетворения растущих потребностей увеличивающейся численности населения страны и континентов мира. Так, к примеру, достижения современного производства немыслимы без генетики и селекции применительно к локальным природно-климатическим зонам. Далее – без повышения плодородия земель повышение эффективности растениеводства по многообразию выращиваемых культур (зерновые, бобовые, бахчевые, плодоовощные, цитрусовые и другие культуры) невозможно. Необходимо постоянно возвращать в почвенно-плодородный слой забранные из него предыдущими урожаями элементы. Как известно, возврат достигается органическими и минеральными удобрениями, использованием севооборотов и рядом других агроприёмов [14]. Потребность в органике в настоящее время обеспечивается отходами животноводства, птицеводства, растениеводства и другими источниками, включая отходы быта и разных производств, подготовленных соответствующим образом для внесения их в почву с целью повышения плодородия. Кроме того, плоды растениеводства, плодоовощеводства – источник питания для различных насекомых. Следовательно, необходимы меры борьбы с насекомыми и разного рода болезнями растений. Эти меры, как известно, в открытом (поля) и защищённом (теплицы, парники) грунте реализуются биологическими и химическими методами (в виде различных энтомофагов, различных агрохимикатов, пестицидов). Наличие этих потребностей имеют свои экологические особенности в виде опасностей и вредностей. Напомним, что необходимые мероприятия в масштабах полей реализуются с помощью средств электромеханизации при соответствующих технологиях, которые также характеризуются соответствующими

⁷ Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 8 сент. 2022 г. № 2567-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

экологическими следами. Вполне очевидно, что легко достичь желаемых экологических и экономических результатов в растениеводстве с его отходами (солома зерновых, стебли кукурузы, подсолнуха, бахчевых, плодоовощных, столовых корнеплодов, их корневых систем, лиственной части) не представляется возможным. Способом урегулирования разногласий на современном этапе жизнедеятельности в аграрном (и не только в нём) секторе экономики является обеспечение нормируемых (допустимых) значений вредностей и опасностей в структурах жизнедеятельности с целью минимизации ущерба здоровью работников и окружающей среде. Вопросам обсуждаемой проблемы в последнее десятилетие уделяется особое внимание [7, 14, 15]. Справедливо отметить, что к этому есть все основания.

В масштабах страны данные вопросы обобщенно изложены в Указе Президента Российской Федерации от 19 апр. 2017 г. № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года». В текущем пятилетии проблема не осталась без внимания. Так вопросу оценки качества атмосферного воздуха на основе дифференцированных и качественных показателей уделено внимание в работах [9, 16–18]. Проблеме уделено внимание и в Стратегии, где отмечается ключевая роль и важность сельских территорий в развитии АПК.

Логично полагать, что с развитием производства будут расти отходы, осложняя экологическую обстановку. Вероятно, что противодействия негативным факторам всех структур ОКВЭД скачкообразно не улучшатся, учитывая эволюционные пути совершенствования технологий производства, методов и средств их освоения с учётом динамики развития науки и передовой практики в части улучшения экологических показателей. Подробным аспектам проблемы применительно к АПК с 2020 по 2023 гг. уделено внимание в работе [1]. Продолжая исследования в этом направлении, авторам представляется целесообразным детализация некоторых положений проблемы по линии благополучия населения в отрасли по официальным данным Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека [19]. Доклад информирует о контролируемой стабильной и управляемой ситуации в 2024 г. в Российской Федерации в части санитарно-эпидемиологической обстановки. Изложенному способствуют стабильность в социальной сфере, гибкость и устойчивость государственного управления, исполнение федеральных и национальных проектов. В этом залог для динамики темпов улучшения санитарно-гигиенического благополучия и состояния здоровья населения страны. Общеизвестно, что данные показатели достигаются обеспечением нормативного состояния множества факторов среды обитания, в числе которых определяющими в 2024 г. являлись три группы. К первой группе относят санитарно-гигиенические (микробиологические, физические и химические) факторы, оказывающие комплексное воздействие на уровень загрязнения воды, почвы, продуктов питания; их воздействию подвержены в части выраженного влияния на здоровье около 87,6 млн чел. в 48 субъектах страны (это 60 % населения). Ко второй группе относят социальные и экономические факторы, в числе которых уровень социального благополучия, промышленное, экономическое развитие территорий, условия труда, обучение и воспитание детей, состояние с обеспечением медицинской помощи, уровень социальной напряжённости: этой группе факторов подвержены 86,9 млн чел. в 50 субъектах страны. К третьей группе относят факторы образа жизни, в числе которых отклонение потребления продуктов питания от норм, потребление алкогольных напитков, табака (подвержены 76,3 млн чел. в 52 субъектах страны – 52,3 % населения). Отметим, что средняя численность населения страны, подверженная выраженному влиянию санитарно-гигиенических факторов среды обитания, в последнее десятилетие составляла 91,1 млн чел.; по сравнению с 2014 г. значение этих показателей снизилось на 2,7 млн чел. – то есть на 3 %. Имеет место также снижение численности населения, подверженного влиянию социально-экономических факторов среды обитания до 86,9 % при среднегодовом за десятилетие 91,9 млн чел. (снижение на 5,7 %). По влиянию факторов образа жизни на состояние здоровья населения отметим, что ситуация не отличается стабильностью.

В числе формирующих тенденции в состоянии здоровья населения в 2024 г. значимы социально-экономические факторы (заболеваемость, отравления, травмы) при численности подверженных рассматриваемому фактору 86,4 млн чел. в 51 субъекте страны. В части санитарно-гигиенических факторов, влияющих на состояние здоровья населения, в 2024 г. были: комплексная химическая нагрузка – химическое загрязнение питьевой воды, воздуха, почвы, продуктов питания, которым подвержены 70,1 млн чел. в 39 субъектах (52,4 % населения страны); биологические нагрузки – им подвержены 63,8 млн чел. в 35 субъектах страны; нагрузки, связанные с физическими факторами (вибрация, шум, ультразвук, электромагнитные излучения) – им подвергнуты 62,4 млн чел. в 29 субъектах страны.

Отметим, что по годам динамика перечисленных факторов и численность населения не являются устойчивыми. Негативному влиянию факторов условий труда на состояние здоровья было подвержено около 16,8 млн чел. в 37 субъектах Российской Федерации.

В дополнение к изложенному отметим, что в 2024 г. на территориях городских и сельских поселений страны исследовалось 1 665,2 тыс. проб атмосферного воздуха, что на треть больше, чем в 2015 г. При этом доля проб с превышением предельных концентраций снизилась за последнее десятилетие с 0,81 % в 2015 г. до 0,66 % в 2024 г. На территории городских поселений страны отобрано проб воздуха в 2024 г. 1 457,2 тыс. (на 35 % больше, чем в 2015 г.); при этом число проб с превышением гигиенических нормативов снизилось в 1,2 раза (с 0,85 % в 2015 г. до 0,71 % в 2024 г.). На территории сельских поселений страны в 2024 г. было отобрано более 207,9 тыс. проб, что на 13,2 % больше, чем в 2015 г.; удельный вес проб с превышением ПДК в сельских поселениях сократился в 1,6 раза (с 0,58 % в 2015 г. до 0,37 % в 2024 г.).

Вышеизложенное не является полным перечнем обстоятельств и источников экологической опасности в аграрном комплексе. Кроме этого, напомним о существенном влиянии на обсуждаемую проблему обстоятельств с чрезвычайными ситуациями, а также последствиями биологических опасностей, что требует отдельного анализа.

Важнейшим этапом рассматриваемой проблемы являются пути решения указанных выше проблем. С точки зрения авторов, имеется ряд потенциальных возможностей для согласованного решения противоречий. Радикальными путями являются совершенствование технологий, методов и средств их реализации производства продовольствия в направлении минимизации вреда окружающей среде. В этом направлении важно применение в технологическом процессе безотходного производства. Дополнительным путём в решении проблемы может быть процесс этапирования реализуемых технологий с обеспечением нормативных экологических и технологических требований. До момента обоснования и освоения таких технологий необходимы профилактические меры по динамичному снижению и ликвидации последствий экологических опасностей.

Авторами приведен ряд обоснованных и реализованных инновационных патентных решений, касающихся экологичности структур систем жизнедеятельности. Так для улучшения экологической обстановки в технологиях посадки картофеля предложено «Устройство для протравливания корнеклубнеплодов» (патент № 2530991 Российская Федерация [20]), исключаящее загрязнение окружающей среды. Вопросы профилактики тепловых ударов с летальными исходами работников открытых рабочих зон (полей, объектов с повышенными температурами в летнее и другие времена года) обеспечиваются «Теплоотражательной каской с воздушным охлаждением» (патент № 2444966 Российской Федерации [21]), способствуя снижению температуры в зоне головы оператора на 4 °С. Снижению температуры в той же зоне на 6 °С способствует «Теплоотражательная каска с водяным охлаждением» (патент № 2464921 Российская Федерация [22]). Обеззараживание воздуха в животноводческих, птицеводческих, складских и других помещениях обеспечивается «Устройством для фотокаталитической обработки воздуха» (патент № 192214 Российская Федерация [23]). Эффективность предложенных инновационных решений подтверждена лабораторными и полевыми испытаниями.

Заключение

Анализ приведенных в статье материалов подтверждает необходимость усиления внимания вопросам экологической безопасности всех структур систем жизнедеятельности ОКВЭД страны. Это является общей оценкой ситуации, влияющей на условия труда и здоровье населения.

Применительно к сельским территориям определяющими видами экологических следов являются направления жизнедеятельности, ориентированные на производства, обеспечивающие продовольственную безопасность. Практика подтверждает, что этот вид деятельности и реализуемых ими мероприятий является в определяющем смысле источником экологических следов самого разнообразного характера, связанных с эрозией почв, обеднением плодородного слоя земли требуемыми микроэлементами, снижением качества и количества выращиваемых плодов растений. Этому способствует ряд объективных обстоятельств, в числе которых генетические и селекционные, технологические с необходимостью совершенствования методов и средств производства с целью сокращения отходов производства и быта. Анализ даёт основания утверждать о наличии спектра возможностей в части сокращения отходов производства в жизнедеятельности сельских территорий по производству продовольствия, его сохранности и повышению многообразия продукции растениеводства, плодовоовощеводства, пчеловодства, животноводства, птицеводства и их комбинаций. В этом направлении необходимы актуальные научные разработки и их практическое использование в производстве. Приведенные в статье в качестве примера авторские инновационные решения – тому свидетельства.

В части оперативности и результативности желаемых достижений авторы убеждены, что для сокращения экологических следов жизнедеятельности сельских территорий необходим учёт производств, где выявлены несовершенные технологии. В этом направлении необходима активизация деятельности в научном обосновании технологических процессов, решения организационных, кадровых и локально-территориальных проблем. Результативным путём достижения желаемых успехов в части снижения экологических следов жизнедеятельности сельских территорий является решение проблем на местах за счет привлечения квалифицированного кадрового состава, владеющего компетенциями в сфере современных и экологичных технологий.

Список источников

1. Шкрабак В.С. Источники экологической опасности структур АПК: пути динамичного снижения и ликвидации // Аграрный научный журнал. 2025. № 4. С. 135–141.
2. Повышение экологической устойчивости животноводческих объектов / Р.В. Шкрабак [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. 2023. № 9 (273). С. 39–45.
3. Экология и охрана труда. Проблемы автомобильного транспорта в больших городах и пригородах / П.С. Орлов [и др.] // Аграрный научный журнал. 2020. № 2. С. 83–87.
4. Астахов В.С., Рендов А.К. К вопросу обеспечения экологической безопасности сельскохозяйственной отрасли // Конструирование, использование и надёжность машин сельскохозяйственного назначения. 2023. № 1 (22). С. 192–199.
5. Калафатов Э.А. Устойчивые сельскохозяйственные и экологические системы // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 5-2 (92). С. 175–177.
6. Климентова Э.А., Дубовицкий А.А. Экологические аспекты формирования продовольственной безопасности // Экономические и социальные проблемы России. 2023. № 1 (53). С. 148–165.
7. Матисова Д.Д. Пути снижения негативного воздействия сельскохозяйственного производства на окружающую среду // Научный аспект. 2024. Т. 29. № 2. С. 3705–3711.

8. Путиловская Т.Б., Подсеваткина Е.А. Эколого-экономическая устойчивость сельского хозяйства как стратегическая цель национальной безопасности // Экономика сельского хозяйства России. 2023. № 9. С. 31–41.
9. Джаббаров Н.И., Шкрабак В.С., Шкрабак Р.В. Методика эколого-экономической оценки эффективности технологий возделывания сельскохозяйственных культур // Вестник международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. С. – П., 2025. Т. 30. № 3. С. 26–44.
10. Характеристика условий и безопасности труда операторов на объектах сортировки столовых корнеплодов и картофеля / В.Ф. Богатырёв [и др.] // Аграрный научный журнал. 2023. № 7. С. 125–135.
11. Березовская Д. Техногенные катастрофы: уроки прошлого и вызовы будущего // Рос. газ. 2023. 21 дек. 38 с.
12. Запылённость воздуха на приёжном после выгрузки подсолнечного шрота / Т.И. Белова [и др.] // Известия Международной академии аграрного образования. 2023. № 65. С. 104–113.
13. Проблемы определения дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны комбикормовых предприятий / Т.И. Белова [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. 2022. № 9 (261). С. 24–30.
14. Биоразлагаемые мульчирующие материалы для сельского хозяйства: технологии и экологическая безопасность / А.Х. Нугманов [и др.] // Вестник Новосибирского ГАУ. 2024. № 1 (70). С. 95–111.
15. Зимин А.Е. Цифровизация и устойчивое развитие: революция в сельском хозяйстве для более «зелёного» будущего // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 3 (399). С. 341–344.
16. Раковская Е.Г. К вопросу оценки качества атмосферного воздуха на основе дифференцированных и комплексных показателей // Вестник международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности. С. – П., 2025. Т. 30. С. 12–15.
17. Выбор технологических параметров регулирования запылённости воздуха приёжного пункта комбикормового производства / Т.И. Белова [и др.] // Вестник международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности. С. – П., 2025. Т. 30. С. 61–68.
18. Сакович Н.Е., Христофоров Е.Н., Везубова И.А. Техногенные и природные ситуации в Брянской области за 2022–2023 г. // Вестник международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности. С. – П., 2025. Т. 30. С. 68–77.
19. О состоянии санитарно-гигиенического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 г.: гос. доклад. М., 2025. 424 с.
20. Устройство для протравливания корнеклубнеплодов: пат. 2530991 Рос. Федерация: МПК А01 С 1/08 / Р.В. Шкрабак, А.В. Мартынов, Г.А. Логинов, П.В. Демко. № 2013114872/13; заявл. 02.04.13; опубл. 20.02.14, Бюл. № 29.
21. Теплоотражательная каска с воздушным охлаждением: пат. 2444966 Рос. Федерация: МПК А 42 / Шкрабак В.В., Шкрабак Р.В., Сатюкова Л.А. [и др.]. № 2010142966/12; заявл. 21.10.10; опубл. 20.03.12, Бюл. № 8.
22. Теплоотражательная каска с водяным охлаждением: пат. № 2464921 Рос. Федерация: МПК А 42В 3/00 / Р.В. Шкрабак, В.В. Шкрабак, И.П. Милованов [и др.]. № 201114174/12; заявл. 11.04.11; опубл. 27.10.12, Бюл. № 30.
23. Устройство фотокаталитической обработки воздуха: пат. № 192214 Рос. Федерация: МПК А 61L 9/20 / Е.И. Гаврикова, В.С. Шкрабак, Р.В. Шкрабак. № 2019114615, заявл. 13.05.19; опубл. 06.09.19, Бюл. № 265.

References

1. Shkrabak V.S. Istochniki ekologicheskoy opasnosti struktur APK: puti dinamichnogo snizheniya i likvidacii // *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2025. № 4. S. 135–141.
2. Povyshenie ekologicheskoy ustojchivosti zhivotnovodcheskih ob'ektov / R.V. Shkrabak [i dr.] // *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2023. № 9 (273). S. 39–45.
3. Ekologiya i ohrana truda. Problemy avtomobil'nogo transporta v bol'shih gorodah i prigorodah / P.S. Orlov [i dr.] // *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2020. № 2. S. 83–87.
4. Astahov V.S., Rendov A.K. K voprosu obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti sel'skohozyajstvennoj otrasli // *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadyozhnost' mashin sel'skohozyajstvennogo naznacheniya*. 2023. № 1 (22). S. 192–199.
5. Kalafatov E.A. Ustojchivye sel'skohozyajstvennye i ekologicheskie sistemy // *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk*. 2024. № 5-2 (92). S. 175–177.
6. Klimentova E.A., Dubovickij A.A. Ekologicheskie aspekty formirovaniya prodovol'stvennoj bezopasnosti // *Ekonomicheskie i social'nye problemy Rossii*. 2023. № 1 (53). S. 148–165.
7. Matisova D.D. Puti snizheniya negativnogo vozdejstviya sel'skohozyajstvennogo proizvodstva na okruzhayushchuyu sredu // *Nauchnyj aspekt*. 2024. T. 29. № 2. S. 3705–3711.
8. Putilovskaya T.B., Podsevatkina E.A. Ekologo-ekonomicheskaya ustojchivost' sel'skogo hozyajstva kak strategicheskaya cel' nacional'noj bezopasnosti // *Ekonomika sel'skogo hozyajstva Rossii*. 2023. № 9. S. 31–41.
9. Dzhabborov N.I., Shkrabak V.S., Shkrabak R.V. Metodika ekologo-ekonomicheskoy ocenki effektivnosti tekhnologij vozdeystviya sel'skohozyajstvennyh kul'tur // *Vestnik mezhdunarodnoj akademii nauk ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti*. S. – P., 2025. T. 30. № 3. S. 26–44.
10. Harakteristika uslovij i bezopasnosti truda operatorov na ob'ektah sortirovki stolovyh korneplodov i kartofelya / V.F. Bogatyryov [i dr.] // *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2023. № 7. S. 125–135.
11. Berezovskaya D. Tekhnogennye katastrofy: uroki proshlogo i vyzovy budushchego // *Ros. gaz*. 2023. 21 dek. 38 s.
12. Zapylyonnost' vozduha na priyomnom posle vygruzki podsolnechnogo shrota / T.I. Belova [i dr.] // *Izvestiya Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2023. № 65. S. 104–113.
13. Problemy opredeleniya dispersnogo sostava pyli v vozduhe rabochej zony kombikormovyh predpriyatij / T.I. Belova [i dr.] // *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2022. № 9 (261). S. 24–30.
14. Biorazlagaemye mul'chiruyushchie materialy dlya sel'skogo hozyajstva: tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost' / A.H. Nugmanov [i dr.] // *Vestnik Novosibirskogo GAU*. 2024. № 1 (70). S. 95–111.
15. Zimin A.E. Cifrovizaciya i ustojchivoe razvitiye: revolyuciya v sel'skom hozyajstve dlya bolee «zelyonogo» budushchego // *Mezhdunarodnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal*. 2024. № 3 (399). S. 341–344.
16. Rakovskaya E.G. K voprosu ocenki kachestva atmosfernogo vozduha na osnove differencirovannyh i kompleksnyh pokazatelej // *Vestnik mezhdunarodnoj akademii ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti*. S. – P., 2025. T. 30. S. 12–15.
17. Vybor tekhnologicheskikh parametrov regulirovaniya zapylyonnosti vozduha priyomnogo punkta kombikormovogo proizvodstva / T.I. Belova [i dr.] // *Vestnik mezhdunarodnoj akademii ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti*. S. – P., 2025. T. 30. S. 61–68.
18. Sakovich N.E., Hristoforov E.N., Verezubova I.A. Tekhnogennye i prirodnye situacii v Bryanskoy oblasti za 2022–2023 g. // *Vestnik mezhdunarodnoj akademii ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti*. S. – P., 2025. T. 30. S. 68–77.
19. O sostoyanii sanitarno-gigienicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Rossijskoj Federacii v 2024 g.: gos. doklad. M., 2025. 424 s.
20. Ustrojstvo dlya protravlivaniya korneklubneplodov: pat. 2530991 Ros. Federaciya: MPK A01 S 1/08 / R.V. Shkrabak, A.V. Martynov, G.A. Loginov, P.V. Demko. № 2013114872/13; zayavl. 02.04.13; opubl. 20.02.14, Byul. № 29.

21. Teplootrazhatel'naya kaska s vozdušnym ohlazhdeniem: pat. 2444966 Ros. Federaciya: MPK A 42 / Shkrabak V.V., Shkrabak R.V., Satukova L.A. [i dr.]. № 2010142966/12; zayavl. 21.10.10; opubl. 20.03.12, Byul. № 8.

22. Teplootrazhatel'naya kaska s vodyanym ohlazhdeniem: pat. № 2464921 Ros. Federaciya: MPK A 42V 3/00 / R.V. Shkrabak, V.V. Shkrabak, I.P. Milovanov [i dr.]. № 201114174/12; zayavl. 11.04.11; opubl. 27.10.12, Byul. № 30.

23. Ustrojstvo fotokataliticheskoj obrabotki vozduha: pat. № 192214 Ros. Federaciya: MPK A 61L 9/20 / E.I. Gavrikova, V.S. Shkrabak, R.V. Shkrabak. № 2019114615, zayavl. 13.05.19; opubl. 06.09.19, Byul. № 265.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 17.04.2026; одобрена после рецензирования: 27.05.2026; принята к публикации: 29.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 17.04.2026; approved after review: 27.05.2026; accepted for publication: 29.05.2026

Сведения об авторах:

Шкрабак Роман Владимирович, заведующий кафедрой «Безопасность технологических процессов и производств» Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2), кандидат технических наук, доцент, e-mail: shkrabakrv@mail.ru, SPIN-код: 5773-7541

Шкрабак Владимир Степанович, профессор кафедры «Безопасность технологических процессов и производств» Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2), доктор технических наук, e-mail: v/shkrabak@mail.ru, SPIN-код: 1017-8986

Савельев Анатолий Петрович, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), доктор технических наук, e-mail: tbsap52@mail.ru, SPIN-код: 2865-2693

Information about the authors:

Shkrabak Roman V., head of the department «safety of technological processes and productions» of Saint-Petersburg state agrarian university (Saint-Petersburg, Pushkin, Peterburgskoye sh., 2), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: shkrabakrv@mail.ru, SPIN: 5773-7541

Shkrabak Vladimir S., doctor of technical sciences, professor of the department of safety of technological processes and productions of Saint-Petersburg state agrarian university (Saint-Petersburg, Pushkin, Peterburgskoye sh., 2), e-mail: v/shkrabak@mail.ru, SPIN: 1017-8986

Savelyev Anatoly P., professor of the department of life safety of National research Mordovia state university named after N.P. Ogarev (Saransk, Bolshevistskaya st., 68/1), e-mail: tbsap52@mail.ru, doctor of technical sciences, SPIN: 2865-2693

Научная статья

УДК 692.41; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-220-230

ПРИМЕНЕНИЕ «ЗЕЛЕННЫХ» КРЫШ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДСКОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

✉ Сысоева Елена Владимировна.

Московский национальный строительный университет, Москва, Россия

✉ SysoevaEV@mgsu.ru

Аннотация. Воздух включает в себя не только смесь газов, которые необходимы для жизни на планете, но и загрязняющие пылевые взвешенные частицы, состав которых зависит от многих природных и антропогенных факторов, климата, объемно-планировочного решения рассматриваемой территории.

Представленная статья анализирует причины увеличения концентрации $PM_{2,5}$ и PM_{10} частиц, источники загрязнения, их дисперсный состав. Сделан обзор работ по методам и методикам исследования состава пыли, распределения загрязнителей РМ на различной высоте в воздухе. Показано, насколько сильно дисперсный состав влияет на последствия их попадания в организм человека, приводя не только к хроническим заболеваниям, мешающим нормальному функционированию организма, но и к летальному исходу. Приведены экспериментально подтвержденные факты о том, что растительный покров не только уменьшает концентрацию непосредственно над зелеными насаждениями, но и на расстоянии 10 м от границы исследования.

Статья предлагает универсальную методику уменьшения концентрации взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в атмосферном воздухе с помощью применения «зеленых» крыш, то есть компенсационного озеленения города второго уровня.

В статье рассмотрена ретроспектива термина «зеленые» крыши и описана методика экспериментального натурного исследования «зеленой» крыши, построенной на территории г. Рязани компанией ТЕХНОНИКОЛЬ.

Выводы посвящены обзору по предложенному вопросу и экспериментальной части работы.

Ключевые слова: обеспечение экологической безопасности городской воздушной среды, «зеленые» крыши, распределение загрязнителей РМ в воздухе, твердые взвешенные частицы $PM_{2,5}$ и PM_{10} , методы изучения состава пыли

Для цитирования: Сысоева Е.В. Применение «зеленых» крыш для обеспечения экологической безопасности городской воздушной среды // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 220–230. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-220-230

Scientific article

**USING GREEN ROOFS TO ENSURE ENVIRONMENTAL SAFETY
IN THE URBAN AIR ENVIRONMENT**

✉ Sysoeva Elena V.

Moscow national research university of civil engineering, Moscow, Russia

✉ SysoevaEV@mgsu.ru

Abstract. Air includes not only a mixture of gases that are necessary for life on the planet, but also polluting dust particles, the composition of which depends on many natural and anthropogenic factors, climate, and the spatial layout of the area in question.

This article analyzes the causes of increased concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ particles, the sources of pollution, and their dispersed composition. It provides a review of research methods and techniques for studying the composition of dust, the distribution of PM pollutants at different altitudes in the air, and the distribution of particles along the human body. It is shown how much the dispersed composition affects the consequences of their entry into the human body, leading not only to chronic diseases that interfere with the normal functioning of the body, but also to death.

The article presents experimentally confirmed facts that plant cover not only reduces the concentration directly above green spaces, but also at a distance of 10 m from the study boundary.

The article proposes a method for managing the environmental risk of air contamination with PM_{2.5} and PM₁₀ suspended particles by using not only traditional landscaping, but also compensatory landscaping of the second-level city, so the use of green roofs. The article provides a retrospective of the term «green» roofs and describes the methodology of an experimental field study of a «green» roof in Ryazan by the company TEKHNONIKOL.

The conclusions are devoted to a review of the proposed issue and the experimental part of the work.

Keywords: ensuring the environmental safety of the urban air environment, «green» roofs, distribution of PM pollutants in the air, solid suspended particles PM_{2.5} and PM₁₀, methods for studying the composition of dust

For citation: Sysoeva E.V. Using green roofs to ensure environmental safety in the urban air environment // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 220–230. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-220-230

Введение

Охраной окружающей среды занимаются все страны и государства по всему миру, поскольку чистота и состав воздуха непосредственно влияют не только на здоровье людей, но на качество и производительность труда, и в конечном счете – на продолжительность жизни.

В каждой стране созданы нормативные документы, постановления правительств для нормирования загрязняющих веществ в воздухе, предельно допустимых выбросов вредных веществ и разрешения на предельную концентрацию этих выбросов в атмосферный воздух. В последние четыре столетия наблюдается резкое увеличение размеров территорий городов в мире благодаря увеличению населения планеты. При этом в Евразии самая высокая плотность населения от 11–40 чел./км² до более 500 чел./км², что превышает плотность населения на других континентах более чем в два раза.

По данным Организации Объединенных Наций, число городов с населением более 10 млн чел. увеличилось на 37 % и достигло 48 %. Если в 1700 г. на планете было 600 млн чел., то на данный момент планету заселяют 7,7 млрд чел., а в перспективе к 2100 г. предполагается, что эта цифра увеличится до 10,9 млрд чел. При этом в последние несколько десятилетий наблюдается самая высокая скорость увеличения населения планеты, 65 % которого живет в городах [1].

Увеличение населения и миграции в города ведет за собой увеличение мощности промышленных предприятий и строительства, а также увеличение высотности зданий, и, в конечном счете – уменьшение природных зеленых насаждений и даже мест для их компенсации.

Значительный вклад в состав загрязняющих веществ в воздухе приносят взвешенные твердые частицы $PM_{2,5}$ и PM_{10} [2–3]. По статистическим данным, наиболее сильное влияние на здоровье городского населения имеют заболевания системы органов дыхания, пищеварительного тракта, кожные заболевания, включая аллергические реакции, и составляют 30 % от всех факторов, которые в итоге могут стать источником тяжелых хронических заболеваний и привести к уменьшению трудоспособности и даже летальному исходу. Именно эти заболевания и являются результатом, в том числе, влияния взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} на организм человека.

Качество атмосферного воздуха на большей территории планеты в рамках градостроительных систем не соответствует гигиеническим нормативам по содержанию твердых взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$.

Авторы [4] сделали натурный эксперимент по распределению PM частиц в дыхательных путях человека. Они выяснили, что оседание мелких и мельчайших частиц $PM_{2,5}$ по всему дыхательному тракту от носоглотки и гортани до нижних отделов, то есть бронхов, происходит неравномерно. В верхней части более 65 % частиц имеют диаметр более 10 мкм, а в нижних долях $PM_{2,5}$ составляет более 60 %, остальные – до 1,5 мкм. Именно эти частицы вызывают такие заболевания, как рак легких, бронхит, астма и хронические заболевания легких и крови.

Для того чтобы оценить качество воздуха, применяют следующие показатели: максимальный разрешенный предельно допустимый уровень концентрации вещества в воздухе (ПДК); предельно допустимую среднесуточную концентрацию (ПДСК); максимальную разовую концентрацию (МРК); индекс AQI (Air Quality Index). Важным показателем считается концентрация взвешенных твердых частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} , которые и являются представителями самых опасных элементов атмосферного воздуха для здоровья людей.

Методами и мероприятиями по уменьшению концентрации взвешенных загрязняющих частиц в воздухе являются градостроительные планировочные методы (уменьшение плотности автомобилей на дорогах, организация разноуровневых пересечений дорог); технологические, включающие совершенствование работы двигателей автотранспорта, использование альтернативного топлива; санитарно-технические (каталитический дожиг выхлопных газов, фильтрация твердых частиц и выхлопных газов) и административно-нормативные, то есть установление более строгих нормативов для предельной концентрации различных загрязняющих веществ в воздухе для фоновое загрязнение или одиночных промышленных выбросов.

Одним из методов уменьшения концентрации пыли в городах является их озеленение, что зафиксировано в нескольких нормативных документах по благоустройству территории. После аналитического исследования всех нормативных документов в области благоустройства территории и устройства «зеленых» крыш выявлено, что среди перечисленных нормативных документов впервые введено понятие озелененная («зеленая») крыша в ГОСТ Р 58875–2020 «Зеленые» стандарты. Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений и разделены понятия «субстрат» и «почва». Но ни в одном из представленных нормативных документов «зеленые» крыши не учитываются в озеленении города, хотя их применение вносит существенный вклад в общее озеленение города – более 12–32 % [5].

Источником загрязнений во всех крупных городах являются автомагистрали, дорожная пыль (80 %) и локальные источники в виде заводов, теплоэлектроцентралей и пр. (20 %). При этом при увеличении скорости оседания взвешенных частиц их диаметр (от 0,6 до 0,9 м/с) увеличивается вдвое (от 1,6 мкм до 33 мкм). Авторы акцентируют внимание на том, что уменьшение PM_{10} частиц происходит благодаря высадке зеленых насаждений.

Ученые во всех городах и странах использовали следующие методы и методики изучения дисперсного состава пыли: метод «рассечения» [6], метод электронной микроскопии [7], метод

использования мобильного поста отбора проб пыли, содержащейся в атмосферном воздухе, со стратификацией по высоте, биоиндикационные методы [8] и различные методики микроскопического анализа пыли с применением персонального компьютера [9].

Свойства взвешенных твердых частиц продолжают изучаться по всему миру для получения базы понимания процесса переноса аэрозолей и взаимного влияния на них климатических характеристик [10–13].

В Московском регионе с 2019 г. на базе Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН проводятся исследования концентрации загрязняющих веществ, в том числе PM_{10} и $PM_{2,5}$, в приземном слое на территории центральной части Москвы. Были определены максимальные и минимальные значения концентрации загрязняющих веществ в течение дня, месяца, сравнений с временами года и атмосферными изменениями.

Губанова Д.П., В.М. Копейкин и А.А. Виноградова на основе проведенных исследований получили подтверждение следующим фактам:

1. Минимальные концентрации взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ в центральной части Москвы были получены в мае и сентябре при достаточно низкой температуре атмосферного воздуха.

2. Среднемесячная концентрация взвешенных частиц минимальна в зимнее время, когда земля покрывается снегом, так как именно частицы почвы и пыли являются главными составляющими элементами твердых взвешенных частиц.

3. Метеоусловия слабо влияют на изменение концентрации пылевых масс по сравнению с другими элементами возмущения.

Экспериментальная часть

С 2025 г. на крыше офисно-производственного здания компанией ТЕХНОНИКОЛЬ в г. Рязани начат масштабный эксперимент по влиянию «зеленой» крыши на экологическое состояние прилегающей территории и границ этого влияния (рис. 1).



Рис. 1. Модули высадок
в г. Рязани в районе Восточный
Промышленный узел, июнь 2025 г.



Рис. 2. Метеостанция RS485,
модель 486 в г. Рязани в районе
Восточный Промышленный узел,
июнь 2025 г.

Экспериментальная территория расположена в окружении двух дорог с северо-запада – Куйбышевского шоссе (примерно 24 м шириной), с северной стороны – Восточная Окружная дорога. Со стороны Новосёлковской ул. – Куйбышевское шоссе находится в непосредственной близости от шламонакопителя в балке Подрябинка, где хранятся отходы нефтепродуктов. С северной стороны расположены озера природного происхождения в Хамбушево. Хамбушевская роща примыкает к Восточному Промузлу. На расстоянии 1,5 км с северной стороны от исследуемого объекта находится Карцевский лес. В 10 км от него расположена р. Ока шириной 24,5 м с западной стороны.

В июне 2025 г. на экспериментальной территории установлена метеостанция RS485, модель 486, которая в непрерывном дистанционном режиме дает мониторинг концентрации взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} , что дает представление о запыленности территории и отклонениях в зависимости от силы и направления ветра, температуры, осадков и атмосферного давления (рис. 2).



Рис. 3. Модули высадок в г. Рязани в районе Восточный Промышленный узел, сентябрь 2025 г.



Рис. 4. Модули высадок в г. Рязани в районе Восточный Промышленный узел, апрель 2026 г.

На крыше здания высажены растения: очиток Эверса, очиток скальный «Ангелина», очиток «Едкий» и очиток ложный «Пурпурный ковер». Высота растения достигнет от 10 до 70 см. В зависимости от разновидностей очитка цветение приходится на весну, лето или осень. Растения посажены в начале лета и к октябрю 2025 г. плотность распространения растения показана на рис. 3, 4.

В начале марта 2026 года модули зеленых насаждений имели уплотненный снежный покров, колеблющийся в пределах 65 см–85 см (рис. 5).



Рис. 5. Модули высадок в г. Рязани в районе Восточный Промышленный узел, март 2026 г.

Снег собирал пылевые взвешенные частицы РМ на всей территории «зеленой» крыши, покрытой снежным покровом, и приобрел сероватый оттенок. Каждый новый слой снега опускал взвешенные частицы в субстрат. Это говорит о том, что «зеленая» крыша продолжает работать и в зимнее время не только как традиционное утепление, но и поглощение субстратом пылевых взвешенных частиц.

Результаты обработки данных эксперимента

По результатам экспериментального исследования за последние 10 месяцев с июня 2025 г. по апрель 2026 г. выполнены графики концентрации взвешенных частиц РМ₁₀ и РМ_{2,5} атмосферного воздуха, осадков, колебаний температуры в атмосфере и скорости ветра в один и тот же промежуток времени. На экспериментальном участке крыши производится непрерывный мониторинг температуры и влажности воздуха и субстрата. С регулярностью

один раз в два месяца берутся образцы грунта и пылевых частиц с зеленых насаждений для фиксации и дальнейшего сравнения фракционного и дисперсного состава.

По полученным данным метеорологической станции сделаны сравнения максимальных и минимальных значений концентрации взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в зависимости от климатических характеристик тех дат, которые соответствовали этим максимальным отметкам $PM_{2,5}$ и PM_{10} (рис. 6, 7).



Рис. 6. График изменения концентрации взвешенных частиц $PM_{2,5}$ атмосферного воздуха в г. Рязани в районе Восточный Промышленный узел, апрель 2026 г.

Средний уровень концентрации пыли на выбранной территории составляет 22 мкг/м³, что абсолютно сходится с данными сайта IQAir с аэрологической станции и лаборатории контроля загрязнения атмосферы на базе Гидрометбюро по Верхне-Волжскому управлению по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, открытой приказом № 12 от 18 января 1988 г.



Рис. 7. График изменения концентрации взвешенных частиц как PM_{10} атмосферного воздуха в г. Рязани в районе Восточный Промышленный узел, апрель 2026 г.

Данные за половину 2025 г. показали, что средний уровень концентрации взвешенных твердых частиц $PM_{2,5}$ превышает рекомендации Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) в 4,45 раза, а всплески повышенной концентрации $PM_{2,5}$ частиц превышают данные ВОЗ в 43,4 раза.

По требованиям ГН 2.1.6.3492–17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» средняя фоновая концентрация пыли находится на верхней границе, а средние и максимальные

всплески концентрации $PM_{2,5}$ превышают в 2,4 и в 8,7 раза соответственно, что серьезно угрожает здоровью горожан.

Выявлено, что во всех случаях максимальных значений концентрации взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} влажность атмосферного воздуха колебалась от 60 до 95 %. Осадки колебались от 0 до 14 мм, кроме даты 4 июля 2025 г., когда осадки из всех дней максимальны и равны 86 мм.

При сравнении двух графиков (рис. 6, 7) выявлено, что концентрации $PM_{2,5}$ и PM_{10} частиц примерно сохраняются одинаковыми и равномерными в течение всего рассматриваемого периода. Пробы брались через каждые 30 мин.

Все измерения производились на высоте 2,5 м от уровня крыши, то есть в приземном слое влияния взвешенных частиц на дыхание человека.

Температура не зависимо от концентрации взвешенных частиц колебалась от $-20^{\circ}C$ до $+20^{\circ}C$ и не являлась причиной изменения концентрации взвешенных частиц (рис. 8).

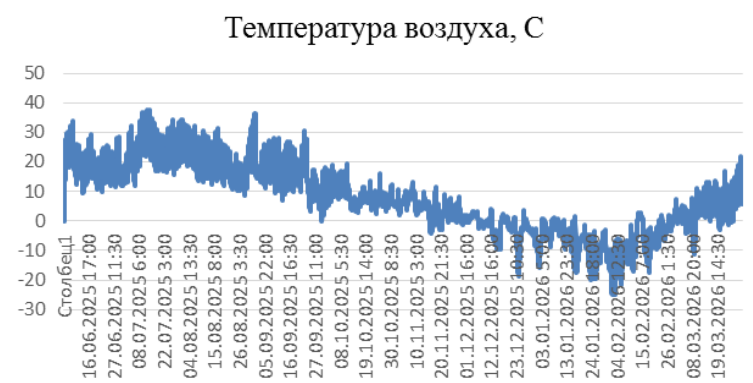


Рис. 8. График изменения температуры воздуха в г. Рязани в районе Восточный Промышленный узел, апрель 2026 г.

При высокой влажности до 86,2 % с 29 июня в течение суток концентрация взвешенных частиц PM_{10} уменьшалась до 3 мкг/м^3 , а $PM_{2,5}$ — с 16 до 0 мкг/м^3 (рис. 9).

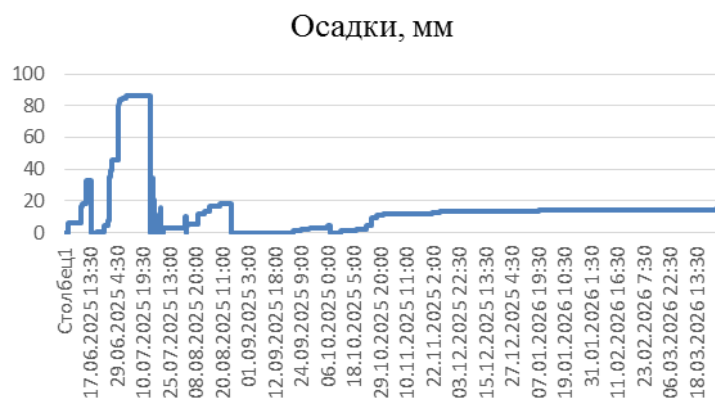


Рис. 9. График изменения осадков в г. Рязани в районе Восточный Промышленный узел, апрель 2026 г.

При смене температуры с положительной на отрицательную в атмосферном воздухе частицы PM_{10} и $PM_{2,5}$ резко сократили свою концентрацию до $1\text{--}15 \text{ мкг/м}^3$ и до $0\text{--}2,5 \text{ мкг/м}^3$ соответственно.

При нескольких порывах южного, северного и юго-западного ветра, по силе достигающего до 7 баллов по шкале Бофорта (15–17 м/с), концентрация взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ колебалась в обычных пределах, отвечая закону случайных величин (рис. 10).



Рис. 10. График изменения скорости ветра в г. Рязани в районе Восточный Промышленный узел, апрель 2026 г.

Обсуждение и перспективы

Растения поглощают осадки, которые выпадают на этой площади, поглощают пылевые частицы PM не только непосредственно под зелеными насаждениями, но и вокруг здания. Для дальнейшей верификации данных концентрации $PM_{2,5}$ и PM_{10} частиц в апреле – мае 2026 г. будет установлена вторая метеорологическая станция непосредственно на территории «зеленой» крыши. Все полученные данные будут сравниваться со станцией.

Сравнение концентрации $PM_{2,5}$ и PM_{10} частиц, скорости оседания, осадков, влажности, силы и направления ветра на исследуемом участке даст возможность создания программы по уменьшению концентрации пылевых взвешенных частиц на территории городов России и, в конечном итоге, – улучшения качества и продления жизни горожан.

Для дальнейшей верификации данных концентрации $PM_{2,5}$ и PM_{10} частиц в апреле – мае 2026 г. будет установлена вторая метеорологическая станция непосредственно на территории «зеленой» крыши.

Заключение

1. Распределение взвешенных частиц $PM_{2,5}$ по высоте происходит неравномерно: примерно с 0,5 до 1,5 м этих частиц в процентном отношении меньше всех остальных. Среднее значение минимальной концентрации пыли в зоне дыхания человека (0,5–2 м), оказалось на высоте 0,5 м и составляет $0,17 \text{ мкг/м}^3$.

2. Распределение взвешенных частиц PM_{10} по высоте происходит относительно равномерно по всему столбу до 10 м [14]. Исключение составляет локальное происхождение источников загрязнения в виде промышленных заводов с большим выбросом твердых взвешенных частей.

3. При максимальной скорости оседания PM частицы имеют диаметр в два раза больше, чем при минимальной скорости оседания.

4. Концентрация взвешенных частиц увеличивается при повышении температуры атмосферного воздуха.

5. На о. Русский воздействие пылевых частиц сосредоточено на фракциях от 0,1 до 10 мкм, на континентальной части в г. Владивостоке – на фракции размером 0,1–50 мкм,

что связано с тем, что на территории города температурно-влажностная инверсия в приземном слое имеет большие градиенты.

6. Массовое содержание PM_{10} в общем пылевом загрязнении колеблется в диапазоне 73–81 %, а концентрация мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ колеблется в пределах двух узких диапазонов около 11,6 и около 7 мкм. Исследование доли $PM_{2,5}$ от общей концентрации показало, что она составляет в среднем порядка 20 %.

7. При увеличении температуры атмосферного воздуха, что часто бывает в месте концентрации автомобильных трасс, концентрация взвешенных частиц увеличивается.

8. В городах концентрация взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в атмосферном воздухе может быть уменьшена за счет применения озеленения, в том числе компенсационного озеленения на крышах зданий [15].

Список источников

1. Suggested citation: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition. 2018. URL: <https://population.un.org/wup/maps?tab=Growth%20Rates%20of%20Urban%20Agglomerations&year=2018-2030> (дата обращения: 18.02.2026).

2. Губанова Д.П., Копейкин В.М., Виноградова А.А. Изменчивость содержания минеральной и сажевой компонент приземного аэрозоля в Москве в 2022 году // Атмосферная радиация и динамика (МСАРД–2023): сб. трудов Междунар. симпозиума. СПб.: ООО «Издательство ВВМ», 2023. С. 137–141. EDN ICQBYJ.

3. Сысоева Е.В., Морозов И.В. Экономическая эффективность применения «зеленых» крыш на примере крупных городов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 4 (97). С. 254–263. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_254

4. Распределение твёрдых частиц микроразмерного диапазона в дыхательных путях человека: натурный эксперимент / Н.В. Зайцева [и др.] // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 5. С. 412–420. EDN IMNZUS. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-5-412-420

5. Сысоева Е.В., Безбородов Е.Л. Влияние «зеленых» крыш на экологическое состояние воздуха в крупных городах России // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 4 (48). Р. 52–61. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.52-61

6. Мобильный пост отбора проб пыли приземного слоя атмосферного воздуха со стратификацией по высоте / Е.М. Баглаева [и др.] // Экологические системы и приборы. 2017. № 7. С. 23–32. EDN ZCSUVX.

7. Лясин Р.А., Багров А., Азарова М.Д. Определение морфологического состава пылевых частиц // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6 (90). С. 759–765. EDN BAZEXF.

8. Васильев А.В. Инструментальный анализ источников промышленных выбросов и выбросов автотранспорта в воздушную среду в условиях урбанизированных территорий (на примере городского округа Тольятти) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 5 (121). С. 184–195. EDN YJCSNJ. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-5-184-195

9. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) / В.Н. Азаров [и др.] // Законодательная и прикладная метрология. 2004. № 1. С. 46–48.

10. Seasonal distribution and vertical structure of different types of aerosols in southwest China observed from CALIOP / T. Liao [et al.] // Atmospheric Environment. 2021. Vol. 246. P. 118145. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.118145

11. Evaluation of vertical and horizontal distribution of particulate matter near an urban roadway using an unmanned aerial vehicle / R. Dubey [et al.] // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 836. P. 155600. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155600

12. Effects of aerosol type and simulated aging on performance of low-cost PM sensors / J. Tryner [et al.] // *J. of Aerosol Science*. 2020. Vol. 150. P. 105654. DOI: 0.1016/j.jaerosci.2020.105654

13. Particulate matter size distribution in air surface layer of Middle Ural and Arctic territories / E.M. Baglaeva [et al.] // *Atmospheric Pollution Research*. 2019. Vol. 10. № 4. P. 1220–1226. EDN QUSDXO. DOI: 10.1016/j.apr.2019.02.005

14. Дисперсный состав пыли приземного слоя атмосферы урбанизированной территории по данным экологического скрининга на примере города Екатеринбурга / И.Е. Субботина [и др.] // *Экологические системы и приборы*. 2018. № 9. С. 3–10. EDN PABVZH.

15. Сысоева Е.В. Принципы и уровни озеленения крупных городов России // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Сер.: Строительство и архитектура. 2026. № 1 (102). С. 326–336. EDN KUDRWK. DOI: 10.35211/18154360_2026_1_326

References

1. Suggested citation: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*, Online Edition. 2018. URL: <https://population.un.org/wup/maps?tab=Growth%20Rates%20of%20Urban%20Agglomerations&year=2018-2030> (data obrashcheniya: 18.02.2026).

2. Gubanova D.P., Kopejkin V.M., Vinogradova A.A. Izmenchivost' soderzhaniya mineral'noj i sazhevoj komponent prizemnogo aerolya v Moskve v 2022 godu // *Atmosfernaya radiatsiya i dinamika* (MSARD–2023): sb. trudov Mezhdunar. simpoziuma. SPb.: OOO «Izdatel'stvo VVM», 2023. S. 137–141. EDN ICQBYJ.

3. Sysoeva E.V., Morozov I.V. Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya «zelenyh» krysh na primere krupnyh gorodov // *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitektarno-stroitel'nogo universiteta*. Ser.: Stroitel'stvo i arhitektura. 2024. Vyp. 4 (97). S. 254–263. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_254

4. Raspreделение tvorydyh chastic mikrorazmernogo diapazona v dyhatel'nyh putyah cheloveka: naturnyj eksperiment / N.V. Zajceva [i dr.] // *Gigiena i sanitariya*. 2023. T. 102. № 5. S. 412–420. EDN IMNZUS. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-5-412-420

5. Sysoeva E.V., Bezborodov E.L. Vliyanie «zelenyh» krysh na ekologicheskoe sostoyanie vozduha v krupnyh gorodah Rossii // *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii*. 2024. № 4 (48). P. 52–61. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.52-61

6. Mobil'nyj post otbora prob pyli prizemnogo sloya atmosfernogo vozduha so stratifikaciej po vysote / E.M. Baglaeva [i dr.] // *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2017. № 7. S. 23–32. EDN ZCSUVX.

7. Lyasin R.A., Bagrov A., Azarova M.D. Opredelenie morfologicheskogo sostava pylevyh chastic // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2022. № 6 (90). S. 759–765. EDN BAZEXF.

8. Vasil'ev A.V. Instrumental'nyj analiz istochnikov promyshlennyh vybrosov i vybrosov avtotransporta v vozdušnuyu sredu v usloviyah urbanizirovannyh territorij (na primere gorodskogo okruga Tol'yatti) // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2024. T. 26. № 5 (121). S. 184–195. EDN YJCSNJ. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-5-184-195

9. Metodika mikroskopicheskogo analiza dispersnogo sostava pyli s primeneniem personal'nogo komp'yutera (PK) / V.N. Azarov [i dr.] // *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*. 2004. № 1. S. 46–48.

10. Seasonal distribution and vertical structure of different types of aerosols in southwest China observed from CALIOP / T. Liao [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 246. P. 118145. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.118145

11. Evaluation of vertical and horizontal distribution of particulate matter near an urban roadway using an unmanned aerial vehicle / R. Dubey [et al.] // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 836. P. 155600. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155600
12. Effects of aerosol type and simulated aging on performance of low-cost PM sensors / J. Tryner [et al.] // J. of Aerosol Science. 2020. Vol. 150. P. 105654. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2020.105654
13. Particulate matter size distribution in air surface layer of Middle Ural and Arctic territories / E.M. Baglaeva [et al.] // Atmospheric Pollution Research. 2019. Vol. 10. № 4. P. 1220–1226. EDN QUSDXO. DOI: 10.1016/j.apr.2019.02.005
14. Dispersnyj sostav pyli prizemnogo sloya atmosfery urbanizirovannoj territorii po dannym ekologicheskogo skrinina na primere goroda Ekaterinburga / I.E. Subbotina [i dr.] // Ekologicheskie sistemy i pribory. 2018. № 9. S. 3–10. EDN PABBZH.
15. Sysoeva E.V. Principy i urovni ozeleneniya krupnyh gorodov Rossii // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Stroitel'stvo i arhitektura. 2026. № 1 (102). S. 326–336. EDN KUDRWK. DOI: 10.35211/18154360_2026_1_326

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 17.12.2025; одобрена после рецензирования: 22.04.2026; принята к публикации: 24.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 17.12.2025; approved after review: 22.04.2026; accepted for publication: 24.04.2026

Сведения об авторе:

Сысоева Елена Владимировна, доцент кафедры Архитектурно-строительного проектирования и физики среды Национального исследовательского Московского национального строительного университета (129337, Москва, Ярославское ш., д. 26, к. 1), кандидат технических наук, доцент, e-mail: SysoevaEV@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7250-3190>, SPIN-код: 5703-9029

Information about authors:

Sysoeva Elena V., associate professor of the department of architectural and structural design and environmental physics at the National research moscow national university of civil engineering (129337, Moscow, Yaroslavl'skoe Sh., 26, k1), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: SysoevaEV@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7250-3190>, SPIN: 5703-9029

Научная статья

УДК 338.14; 330.15; 355.58; 658; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-231-243

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРАВОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УЩЕРБА ОТ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Берестевич Мария Олеговна;

Головейко Инга Викторовна.

Департамент образовательной и научно-технической деятельности

МЧС России, Москва, Россия.

✉ **Цховребов Эдуард Станиславович.**

**Государственный научный центр Всероссийский научно-исследовательский институт
по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России**

(федеральный центр науки и высоких технологий), Москва, Россия

✉ **rebrovstanislav@rambler.ru**

Аннотация. Актуальность выполненной работы предопределена недостаточностью и противоречиями правовой базы в сфере оценки и расчета ущерба (вреда) от последствий опасных природных явлений и техногенных процессов в российской Арктике. В ходе работы проведен ретроспективный, сравнительный, сопоставительный анализ действующих нормативно-правовых и нормативно-технических документов обозначенной предметной области исследования. По результатам выполнения работы, на основе систематизации, обобщения и анализа 128 правовых актов в области правового регулирования и оценки ущерба (вреда), а также анализа компетентных мнений и позиций в данной предметной области 65 федеральных органов исполнительной власти, научных организаций и научно-образовательных учреждений (по результатам направленных запросов и мотивированных ответов на них) подготовлены 20 экспертных заключений (экспертных мнений) специалистов о достаточности правовых актов предметной области. На основе подготовленных экспертных заключений сформированы мотивированные предложения по актуализации действующих правовых актов и разработке новых методик, правил, методических указаний и рекомендаций, стандартов по прогнозированию и оценке социального, экономического и экологического ущерба (вреда), вызванного наступлением негативных последствий чрезвычайных ситуаций применительно к специфическим факторам, условиям, особенностям Арктической зоны Российской Федерации.

Ключевые слова: Арктическая зона Российской Федерации, экологическая безопасность, правовые акты, комплексная безопасность, анализ, мониторинг, прогнозирование, ущерб, вред, чрезвычайная ситуация

Для цитирования: Берестевич М.О., Головейко И.В., Цховребов Э.С. Направления совершенствования правового обеспечения оценки и прогнозирования ущерба от последствий чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 231–243. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-231-243

Scientific article

DIRECTIONS FOR IMPROVING THE LEGAL SUPPORT FOR ASSESSING AND FORECASTING DAMAGE FROM THE CONSEQUENCES OF EMERGENCIES IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIAN FEDERATION**Berestevich Mariya O.;****Goloveiko Inga V.****Department of educational and scientific-technical activities of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia.****✉Tshovrebov Eduard S.****Russian scientific research institute for civil defence and emergencies of the EMERCOM of Russia (Federal science and high technology center), Moscow, Russia****✉rebrovstanislav@rambler.ru**

Abstract. The relevance of the work performed is predetermined by the insufficiency and contradictions of the legal framework for assessing and calculating the damage (harm) caused by hazardous natural phenomena and technological processes in the Russian Arctic. The work includes a retrospective, comparative, and contrasting analysis of the current legal and regulatory documents in the designated research area. Based on the results of the work, 20 expert opinions (expert assessments) have been prepared by specialists on the sufficiency of legal acts in the subject area, based on the systematization, generalization, and analysis of 128 legal acts in the field of legal regulation and assessment of damage (harm), as well as the analysis of competent opinions and positions in this subject area by 65 federal executive authorities, scientific organizations, and scientific and educational institutions (based on the results of directed requests and motivated responses). Based on the expert opinions prepared, motivated proposals have been formulated to update existing legal acts and develop new methods, rules, guidelines, and recommendations, as well as standards for forecasting and assessing the social, economic, and environmental damage (harm) caused by the negative consequences of emergencies in relation to the specific factors, conditions, and features of the Arctic zone of the Russian Federation.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation, environmental safety, legal acts, comprehensive safety, analysis, monitoring, forecasting, damage, harm, and emergency situation

For citation: Berestevich M.O., Goloveiko I.V., Tskhovrebov E.S. Directions for improving the legal support for assessing and forecasting damage from the consequences of emergencies in the Arctic zone of Russian Federation // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 231–243. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-231-243

Введение

Возникающие проблемы проведения обоснованной достоверной оценки наносимого ущерба от последствий чрезвычайных ситуаций на территории Арктики вызваны как недостаточной проработанностью правовой базы в данной предметной области в целом, так и отсутствием учета в ней специфических условий, факторов, особенностей климата, хозяйствования, природопользования, окружающей среды Крайнего Севера. Сложившаяся ситуация, в свою очередь, препятствует формированию полноценного экономического и материально-ресурсного обоснования достаточности обеспечения органов управления, сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (РСЧС) в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) для ликвидации возможных чрезвычайных ситуаций (ЧС) и их неблагоприятных последствий. Такое обоснование крайне необходимо в целях формирования приоритетных направлений деятельности функциональных и территориальных подсистем РСЧС в зависимости от изменяющихся рисков и угроз опасностей в АЗРФ.

Целью выполняемой работы послужило выявление проблемных вопросов и проведение анализа достаточности нормативно-правовой базы в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС.

Для достижения поставленной цели в процессе проведения исследования решены следующие задачи:

1. Обобщение и систематизация действующих нормативных правовых актов, правила, рекомендации, стандарты в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда) окружающей среде, жизнедеятельности, здоровью и имуществу населения, объектам экономики, вызванного наступлением негативных последствий ЧС, обусловленных возникновением и развитием опасных природных явлений и техногенных процессов;

2. Анализ полноты, применимости, достаточность, адекватность нормативно-правовой базы оценки и прогнозирования ущерба (вреда) в формате учета специфических факторов, особенностей АЗРФ.

3. Выявление области правовой неурегулированности предмета исследования.

4. Разработка научно обоснованных решений по обеспечению полноценного, достаточного правового обеспечения в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС, обусловленных характерными для Арктической зоны опасными природными явлениями и техногенными процессами, применительно к специфическим условиям окружающей среды, хозяйствования, безопасности, климата, природопользования, жизнедеятельности, геологии, жизнеобеспечения, состояния и перспективного развития всех видов инфраструктуры АЗРФ.

Выполненное исследование характеризуется принципиально новым подходом к оценке и прогнозированию экологического, социально-экономического ущерба (вреда), основанном на идентификации и последующем системном анализе воздействующих внешних и внутренних факторов на состояние безопасности жизнедеятельности, комплексной безопасности населения и территорий АЗРФ, характерных специфических условиях, ограничениях, особенностях Арктики, классифицированным по выделенным группам и типологическим признакам, событиям, процессам.

Материалы и методы исследования

Материалами для проведения исследования выступили: нормативная правовая база в сфере оценки ущерба (вреда) от последствий ЧС, труды отечественных и зарубежных исследователей в области оценки рисков [1–3], проблем обеспечения комплексной безопасности в АЗРФ [4–8], прогнозирования и оценки социально-экономического ущерба [9–13], экологического вреда [14–18] от наступления неблагоприятных последствий опасных природных явлений, техногенных процессов, гарантий и компенсаций возмещения ущерба [19, 20].

В качестве методов исследования выступили: концептуальный, логический, ретроспективный, сравнительный, сопоставительный анализ.

Результаты исследования

В процессе исследования были детально изучены виды возможного негативного воздействия на окружающую среду, объекты экономики, безопасность жизнедеятельности населения в результате возникновения и развития опасных природных явлений, техногенных процессов, проявления их негативных последствий с учетом специфических факторов, условий, особенностей геологии, природопользования, хозяйствования, климата, безопасности, инфраструктуры АЗРФ. На основе обобщения, систематизации данных о природных и техногенных угрозах осуществлен всесторонний анализ действующих отечественных, зарубежных методик оценки, прогнозирования социально-экономического, экологического ущерба (вреда), с акцентом на их применимость в специфических условиях АЗРФ.

Алгоритм последовательности применяемых методов в процессе выполнения работы показан в виде диаграммы на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм последовательности применяемых исследовательских методов и инструментов в процессе выполнения работы

Формирование конфигурации системы правовых актов в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), обусловленных негативными последствиями ЧС в АЗРФ выполнено с применением алгоритмов концептуального моделирования посредством метода «сущность-связь», увязывающего между собой объект, предмет исследования и контекст в виде системы внешних и внутренних условий функционирования объекта, факторов, оказывающих влияние на него в исследуемом аспекте. Абстрактное отображение процессов перехода реализуется с помощью логической цепи «проблема – замысел-решение – воплощение».

Схематично процесс исследования с применением концептуального анализа нормативных правовых актов показан на схеме рис. 2.



Рис. 2. Логическая структура концептуального моделирования процесса правового регулирования ущерба (вреда)

В ходе работы сформированы основные этапы осуществления концептуального анализа правовой базы в сфере ущерба (вреда). В процессе концептуального моделирования сделано допущение о том, что применяемые в изучаемой правовой базе понятия и связи между ними должны быть строго определены. Однако в концепциях, стратегиях, планах и прогнозах, иных документах единая терминология, четко, ясно и однозначно трактуемый понятийный аппарат (дефиниция) таких элементов отсутствуют. Данная ситуация особенно характерна при установлении предмета, объекта, характера, областей, сфер межуровневого, межведомственного, межсубъектного взаимодействия в области мониторинга, прогнозирования ЧС или, к примеру, при организации Сети наблюдения и лабораторного контроля.

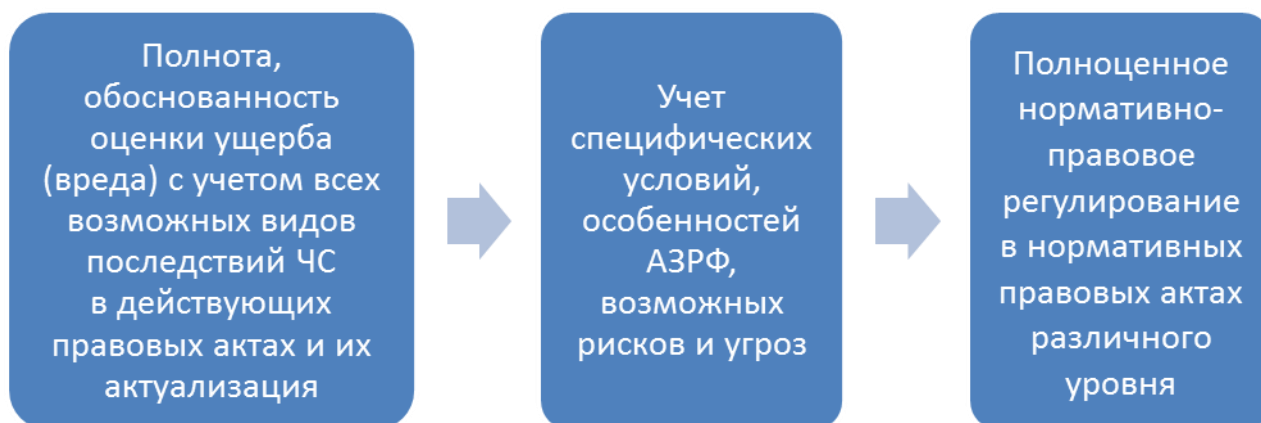


Рис. 3. Концептуальная схема логической последовательности действий по урегулированию предметной области оценки и прогнозирования ЧС в АЗРФ

В ходе реализации вышеприведенных алгоритмов в рамках концептуального моделирования использована методика, позволяющая с помощью системного описания концептуальной модели понятия проанализировать термины «вред», «ущерб», их характеристики и природу: социальный, экологический, экономический и пр.

Полученная система символьного описания модели понятийного аппарата в предметной области исследования представлена в табл. 1.

Таблица 1

Символьное описание основных принципов и критериев формирования понятийного аппарата

Свойства, параметры, характеристики и основные принципы построения исследуемых понятий	Символьное описание
Исследуемое понятие	A
Совокупность слов, составляющих понятие	$\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$
Множество значений каждого слова	$a^v = \{a_i \in V i \in [1, v]\}$
Множество значений анализируемого понятия	$A^w = \{A_j \in W j \in [1, w]\}$
Множество общепринятых, закрепленных в общеизвестных словарях, энциклопедиях, действующем законодательстве терминов	$B = \{b_k \in B k \in [1, m]\}$
Множество правовых актов предметной области	$Z = \{z_l l \in Z\}$
Принцип 1. Универсальность – многообразие возможностей применения	$A \in Z l \in [1, z]$
Принцип 2. Целостность – совокупность слов образует единое структурированное понятие	$A = \{a_i i \in A\}$
Принцип 3. Однозначность – ясное, конкретное, четкое толкование и интерпретация понятия, исключающее двусмысленность и неопределенность как отдельных слов, так и всего понятия в целом	$a^v = \{a_i i = 1\}$ $A^w = \{A_j j = 1\}$
Принцип 4. Логичность, правильность построения и изложения, структурная последовательность	$A^w = \{ \{a^v_i i \in A\} \}$
Принцип 5. Уникальность – отсутствие дублирования иных понятий	$A^w \oplus B^w$
Принцип 6. Обоснованность – применение в составе понятия общепринятых, общеизвестных, закрепленных в действующем законодательстве терминов	$A \wedge B$ $\{a_i i \in A\} \subseteq b_k \in B$ $ k \in [1, m]\}$
Принцип 7. Оптимальность – построение наилучшим образом при заданных условиях и поставленной цели	$\sum_{i=1}^n a_i \rightarrow \min$
Принцип 8. Антирефлексивность. Исключение направленности понятия на самого себя, возвратности – «закольцовывания» понятий	$\forall A (A \not\cong A)$
Принцип 9. Соответствие предметной области	$A \subseteq Z$
Принцип 10. Целенаправленность (адресность) – обеспечение полноты правового регулирования предметной области	$A \subseteq Z \Rightarrow Z_{\text{optimum}}$
Принцип 11. Антидвойственность дефиниции. Исключение повторного, иного толкования, раскрытия содержания, значения общепринятых или закрепленных в праве терминов, образующих понятие	$A^w \neq \{b_k \in B k \in [1, m]\};$ $\exists! B^w$
Принцип 12. Корректность. Отсутствие в составе понятия повторов слов, синонимов, омонимов (дубликатов в множестве A)	$A = \delta a_1 \dots a_n (A)$ $\exists! a: \forall \{a_i i \in A\}$

Логическую структуру правовой нормы, с учетом анализа различных подходов, предлагается определять совокупностью её составляющих с учетом разработанных ранее подходов к формированию концептуальной модели понятийного аппарата области проводимого исследования:

$$A = (On + Dn + Cn + Un) \wedge \Pi, \quad (1)$$

где A – понятие; On – определяющая часть понятия; Dn – детализирующая функциональная часть понятия; Un – условие действия правовой нормы; Cn – целенаправленное правовое предписание при формировании понятия; Π – совокупность принципов построения понятия: $\Pi = \{n_1, n_2, \dots, n_{12}\}$.

При анализе правовой базы установлены неоднозначность толкования понятий, двойственность смысла, что способствует неопределенности и разночтениям в понятийном аппарате и подходах к оценке и прогнозированию ущерба (вреда) от последствий ЧС.

Результаты анализа в систематизированном и структурированном виде представлены в экспертных заключениях о достаточности нормативной правовой базы в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий чрезвычайных ситуаций применительно к специфическим условиям АЗРФ.

Все мнения экспертов сформированы с позиций квалификации опасных процессов и явлений на основании установленных приказом МЧС России критериев отнесения события к ЧС «Об установлении критериев информации о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера».

Заключения по структуре и содержанию сформированы в формате разработки научно обоснованных предложений по развитию нормативно-правового обеспечения обоснования приоритетных направлений деятельности органов управления, сил и средств РСЧС в АЗРФ на основе всестороннего анализа действующей нормативной правовой базы. В них содержатся аналитические материалы и результаты исследования правовой базы в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС, структурированные выводы и рекомендации по их актуализации и совершенствованию с позиций учета специфических факторов, условий, ограничений, особенностей АЗРФ.

Экспертные мнения, в зависимости от направления исследования ущерба (вреда) от последствий опасных природных явлений и техногенных процессов, событий, структурно включают в себя:

- перечень, обобщение и систематизацию действующих правовых актов в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС с классификацией правовых актов по критериям: юридической силы; содержанию; уровню (масштабам) действия; объему и характеру действия; сфере действия; сроку действия; типам подзаконных актов; отраслевой принадлежности; характеру компетенции; функциональному признаку; регулированию сфер общественной жизни (охрана окружающей среды, здоровья населения, строительство, промышленность, сельское, лесное хозяйство, энергетика, транспорт, социальная сфера, благоустройство, ЖКХ, природопользование);

- оценку применимости нормативных правовых актов в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС в результате возникновения ЧС (аварии, разрушения, обрушения, взрывы, опасные природные явления, биологическая опасность) с учетом специфических условий АЗРФ;

- анализ их достаточности для правового регулирования оценки ущерба от негативных последствий ЧС;

- анализ наличия правовой неурегулированности исследуемой сферы, пробелов, несоответствий в законодательстве;

- структурированные предложения по обеспечению полноценного правового обеспечения в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС применительно к специфическим условиям хозяйствования, природопользования, жизнеобеспечения и жизнедеятельности в АЗРФ.

При формировании структурированных предложений и рекомендаций по расширению состава, актуализации нормативных правовых актов в области оценки, прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС, в целях совершенствования и обеспечения полноты правового регулирования исследуемой сферы, определены, систематизированы и классифицированы и принимались во внимание специфические факторы, условия, особенности АЗРФ (табл. 2).

Таблица 2

Специфические факторы, условия, особенности АЗРФ

Группа факторов	Состав и характеристика опасных последствий
Климатические природные (метеорологические, гидрологические, морские гидрометеорологические)	1. Опасные природные явления, включая деградацию (оттаивание) многолетней мерзлоты и криолитозоны, сокращение площади арктических льдов, приводящие к образованию социально-экономического ущерба, экологического вреда в результате: а) подтопления, затопления территорий (с уничтожением сельскохозяйственных посевов, природной растительности) и объектов недвижимости (включая их разрушение, обрушение, с нарушением условий жизнедеятельности населения, причинением вреда здоровью граждан, прекращением транспортного сообщения), с поступлением в природную среду опасных химических веществ и нефтепродуктов с поверхностными (талыми) сточными водами; б) появления опасных техногенных объектов: скотомогильников, полигонов, свалок, навалов отходов, складов хранения и накопления токсичных химических и биологически опасных веществ (с образованием биологической опасности: эпидемий, эпизоотий, эпифитотий; патогенных для человека и биологических ресурсов, веществ, содержащих возбудителей инфекционных заболеваний; разливом (сбросом, выбросом) опасных химических веществ, отходов, нефтепродуктов в природную среду); в) активизации лавинной опасности: сход снежных лавин в результате снеготаяния с нанесением социально-экономического ущерба (ухудшение условий жизнедеятельности, гибель или утрата здоровья, разрушение, прекращение функционирования объектов экономики, жизнеобеспечения территорий, инфраструктуры); г) деформации дорожных покрытий, железнодорожного полотна, продуктопроводов на вечной мерзлоте в связи с изменением её температуры, вызывающей транспортные аварии, разрушения и обрушения конструкций дорожно-транспортной инфраструктуры; низкие температуры, сильные ветры, снегопады, метели и снежные бури, вызывающие сильное гололедно-изморозевое отложение, повреждение, разрушение, прекращение работы дорожно-транспортной, энергетической и иной инфраструктуры, аварии на объектах водо-, тепло-, электроснабжения, транспортные аварии, нарушение условий жизнедеятельности, вред здоровью, гибель людей; д) высокая штормовая активность и ледовые явления, айсберги и дрейфующие льды, представляющие опасность для судоходства и вызывающие аварии на водном транспорте
Наличие значительного количества опасных техногенных объектов	Завершивший срок эксплуатации, бесхозный транспорт, полигоны, свалки, навалы отходов производства и потребления, а также химических веществ на заброшенных складах, выведенных из эксплуатации объектах, во временных сооружениях и строениях. Заброшенные территории горнопромышленного производства, в том числе связанные с добычей цветных и благородных металлов, отработанные шахты, карьеры, буровые скважины, пруды-накопители промышленных сточных вод – источники экологического вреда и социально-экономического ущерба, в первую очередь, накопленного. Чрезвычайная уязвимость специфической арктической природы от техногенного воздействия
Геологические факторы	Активизация опасных геологических процессов, таких как карст, термокарст, оползни, оседание и смещение горных пород
Территориальные особенности	Разбросанность и удаленность друг от друга урбанизированных территорий, затрудненное транспортное сообщение, оповещение и связь между ними, затрудняющее нормальный процесс жизнеобеспечения и жизнедеятельности, прохождение информации о ЧС в зоне ответственности, доведение решений до реагирования, оперативность и скорость реагирования на нештатные ситуации, инциденты, аварии, поисково-спасательные, аварийно-восстановительные работы, эффективность применения и координацию спасательных формирований
Характер жизнедеятельности	Сезонный, а также кочевой характер жизнедеятельности некоторых групп населения АЗРФ. Зависимость жизнедеятельности от сезонных поставок топлива, продукции, медикаментов, товаров первой необходимости

Означенные факторы, условия, особенности АЗРФ учтены при подготовке экспертных заключений о достаточности нормативно-правовой базы в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС.

По результатам экспертной оценки сформированы предложения по устранению разночтений, дополнению, расширению, уточнению, актуализации правовой базы оценки и прогнозирования ущерба (вреда), в частности, представляется целесообразным:

1. Установление в федеральном законодательстве единообразных толкований понятий: «ущерб», «вред», «экономический ущерб», «социальный ущерб», «экологический вред», «компенсация вреда».

2. Установление правовых норм в области порядка регламентации ответственности лиц за накапливаемый во времени экологический вред при разрешенном нормативном воздействии на окружающую среду (с учетом высокой экологической уязвимости арктической природы).

3. Уточнение приоритета и порядка ответственности лиц за вред, причиненный окружающей среде.

4. Расширение состава правовых актов по оценке и прогнозированию ущерба (вреда) с разработкой и введением в действие:

постановления (распоряжения) Правительства Российской Федерации «Об утверждении единой комплексной методики оценки и прогнозировании экологического вреда и обусловленного им экономическим ущербом в результате последствий техногенных аварий на территории АЗРФ».

5. Актуализация правовых актов в области прогнозирования и оценки социально-экономического ущерба, вызванного наступлением последствий ЧС в формате правоприменения к специфическим условиям АЗРФ.

6. Разработка методик (рекомендаций) по расчету экономического ущерба в денежном выражении на основе действующих методик (методических указаний, правил) по расчету и оценке экологического вреда, наносимого выбросами и сбросами загрязняющих веществ, загрязнением почв, водных объектов, атмосферного воздуха опасными отходами и химическими веществами (в тоннах).

7. Разработка всех методик, методических указаний и рекомендаций по оценке ущерба (вреда) от последствий ЧС АЗРФ должна производиться с учетом углубленного исследования явлений и процессов распространения и интенсивности деградации вечной мерзлоты, результатов мониторинга опасных природных явлений и техногенных процессов, прогнозирования и предупреждения возможных ЧС природного и техногенного характера, их неблагоприятных социально-экономических, экологических последствий в рамках проведения научно-исследовательских работ, заказчиком которых могут выступать заинтересованные ведомства органов управления РСЧС. Целесообразны также разработка и внедрение инновационных методов, технологий высокотемпературного обезвреживания (уничтожения) на месте объектов накопленного ущерба (вреда): скотомогильников, свалок и навалов токсичных отходов производства и потребления, временного складирования и накопления опасных химических соединений, создающих высокий уровень биологической, санитарно-эпидемиологической, экологической опасности.

8. Разработка методик, методических указаний, рекомендаций по оценке социально-экономического ущерба от последствий транспортных аварий; разрушений (обрушений) объектов недвижимости (по видам зданий и сооружений, инженерной инфраструктуры, ведения горных работ); на системах жизнеобеспечения; опасных гидрологических явлений; распространения биологической опасности (эпидемий, массовых отравлений, эпизоотий, эпифитотий, веществ, содержащих возбудителей инфекционных заболеваний) с учетом специфических условий, факторов, особенностей АЗРФ.

9. Дополнение, уточнение, актуализация Методики установления критериев информации о ЧС природного и техногенного характера с подготовкой утверждающего её приказа МЧС России – экологическими критериями, характеризующими перечень событий, отнесенных к ЧС,

уточнением и детализацией критериев негативного воздействия на природную среду, дополнение социально-экономическими критериями, характеризующими специфические особенности последствий ЧС в Арктической зоне России.

10. Разработка методических указаний (рекомендаций) по расчету ущерба (вреда) от негативного воздействия на природную среду, жизнедеятельность населения, объекты экономики временных поселков и поселений, законсервированных стационарных и передвижных объектов – источников опасности и накопленного ущерба (вреда).

11. Разработка Методических рекомендаций по оценке и прогнозированию ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС на объектах сельскохозяйственного производства с учетом специфических условий АЗРФ.

12. Разработка и внесение проекта постановления Правительства Российской Федерации, определяющего порядок взаимодействия федеральных и региональных органов исполнительной власти, муниципальных образований при размещении, развертывании и функционировании спасательных формирований в условиях АЗРФ аварий, связанных с природными особенностями региона.

По результатам работы предложена разработка Межведомственной методики классификации, квалификации, ранжирования по группам источников техногенной опасности в АЗРФ и прогнозируемого возможного ущерба (вреда) как при их повседневной эксплуатации, так и в случае аварийной ситуации либо воздействия опасных природных явлений.

Выводы

Новизна проведенной исследовательской работы заключается во впервые примененном комплексном подходе к поиску, исследованию и систематизации правовых актов в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС с позиций системного анализа взаимосвязанных, взаимовлияющих факторов:

а) критериев отнесения событий к ЧС;

б) комбинированного воздействия природных и техногенных ЧС и их последствий на природную среду, жизнедеятельность населения, устойчивость объектов экономики с учетом их трансформации (перехода между собой) и причинно-следственных связей;

в) анализа всех возможных типов последствий ЧС с учетом всех видов негативного воздействия на окружающую среду;

г) учета специфических условий, факторов, особенностей АЗРФ.

По результатам работы подготовлены структурированные предложения по расширению состава, корректировке, актуализации нормативных правовых актов в области оценки и прогнозирования ущерба (вреда), вызванного наступлением неблагоприятных последствий ЧС применительно к специфическим условиям АЗРФ в целях совершенствования и обеспечения полноты правового регулирования исследуемой сферы.

Читателям представлены первые результаты выполненной работы, исследования в этой актуальной области будут продолжены в формате оценки и прогнозирования опасностей, вызванных опасными природными явлениями и техногенными процессами на территориях, прилегающих к маршруту Трансарктического транспортного коридора (ТТК). Эта глобальная по масштабам и значимости транспортная артерия, имеющая важнейшее стратегическое значение для устойчивого развития северных территорий Российской Федерации, представляет собой единую систему маршрутов, включающих в себя Северный морской путь, связанные с ними внутренние водные пути и объекты транспортной инфраструктуры и направлена на комплексное развитие территорий АЗРФ и Дальнего Востока, грузовой базы, а также внутренних, международных, транзитных перевозок грузов и пассажиров вдоль побережья России.

В заключение следует отметить, что результаты работы имеют существенное научно-практическое значение и могут быть использованы в качестве информационно-аналитической платформы для реализации актуального научно-исследовательского направления: анализа данных о размещенных на территории АЗРФ и прилегающих к маршруту ТТК потенциальных источниках опасностей, о рисках и угрозах наступления неблагоприятных природных явлений и опасных техногенных процессов для формирования прогноза ожидаемых сценариев, динамики изменения состояний безопасности жизнедеятельности населения.

Список источников

1. Oltyan I.Yu., Arefyeva E.V., Kotosonov A.S. Remote assessment of an integrated emergency risk index // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, ICCATS 2020.Sochi, 2020. С. 042053.
2. Гвоздев Е.В., Сулима Т.Г. Оценка риска возникновения опасностей в техносфере на примере предприятия по жизнеобеспечению региона // Технологии гражданской безопасности. 2019. Т. 16. № 4 (62). С. 50–56.
3. Рахманин Ю.А., Додина Н.С., Алексеева А.В. Современные методические подходы к оценке риска здоровью населения от воздействия химических веществ // Анализ риска здоровью. 2023. № 4. С. 33–41.
4. Сулима Т.Г., Головейко И.В. Роль МЧС России в обеспечении безопасности Арктической зоны Российской Федерации и северного морского пути // Безопасная Арктика-2025: материалы Междунар. науч.-практ. конф. М., 2025. С. 9–22.
5. Проблемы и пути решения обеспечения надежности использования пожарной и аварийно-спасательной техники, технических средств, оборудования МЧС России в Арктическом регионе / Т.Г. Сулима [и др.] // Русский лед – 2024: материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2024. С. 20–25.
6. Цховребов Э.С. Экологические последствия чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2025. 280 с.
7. Проблемы экологической безопасности техногенных объектов в условиях деградации многолетней мерзлоты / В.Н. Безносков [и др.] // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 2.
8. Waste management peculiarities in far North from the perspective of environmental hazard and emergency prevention / Yu. Shishkov [et al.] // E3S Web of Conferences. XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023). EDP Sciences, 2023. P. 04003.
9. Оценка ущерба чрезвычайных ситуаций / М.И. Ломакин [и др.] // Теория и практика гражданской защиты на страже безопасности жизнедеятельности современного общества. М.: ВНИИ ГОЧС. 2022. С. 32–36.
10. Казымов И.М., Боярков Д.А., Компанец Б.С. Подходы к определению величины экономического ущерба и рисков выхода из строя оборудования электроэнергетики // Научный журнал «Век качества». 2022. № 3. С. 150–162.
11. Пашенцев А.И. Методический подход к оценке прямого экономического ущерба при отключении потребителей от централизованного теплоснабжения // Экономика строительства и природопользования. 2017. № 3 (64). С. 33–39.
12. Лесных В.В., Тимофеева Т.Б., Петров В.С. Проблемы оценки экономического ущерба, вызванного перерывами в электроснабжении // Экономика региона. 2017. Т. 13. С. 847–858.
13. Загуменнова М.В., Порошин А.А., Фирсов А.Г. Методологический подход к определению материального ущерба от пожаров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4. С. 64–79.
14. Цховребов Э.С., Садова С.В. Экономические и правовые вопросы оценки экологического ущерба (вреда) // Вестник РАЕН. 2014. Т. 14. № 2. С. 57–59.
15. Жаворонкова Н.Г. Возмещение экологического вреда: законодательные новеллы // Журнал «LexRussica». 2016. № 8. С. 130–140.

16. Montewka J., Weckström M., Kujala P. A probabilistic model estimating oil spill clean-up costs – A case study for the Gulf of Finland // *Marine Pollution Bulletin*. 2013. P. 212–218.
17. Данилова Н.В. Совершенствование института возмещения экологического вреда // *Экологическое право*. 2015. № 3. С. 3–6.
18. Медведева О.Е. Задачи оценки экологического ущерба в Арктической зоне // *Арктика и Север*. 2015. № 18. С. 131–147.
19. Куделькин Н.С. Правовые вопросы возмещения вреда, причиненного окружающей среде в результате разливов нефти и нефтепродуктов // *Юридические исследования*. 2021. № 9. С. 2–9.
20. Первые нормативно-правовые акты в сфере «северных» гарантий и компенсаций для пожарных в России / А.А. Смирнова [и др.] // *Право. Безопасность. Чрезвычайные ситуации*. 2024. № 4 (65). С. 50–59.

References

1. Oltyan I.Yu., Arefyeva E.V., Kotosonov A.S. Remote assessment of an integrated emergency risk index // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, ICCATS 2020.Sochi, 2020. S. 042053.
2. Gvozdev E.V., Sulima T.G. Ocenka riska vzniknoveniya opasnostej v tekhnosfere na primere predpriyatiya po zhizneobespecheniyu regiona // *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2019. T. 16. № 4 (62). S. 50–56.
3. Rahmanin Yu.A., Dodina N.C., Alekseeva A.V. Sovremennye metodicheskie podhody k ocenke riska zdorov'yu naseleniya ot vozdejstviya himicheskikh veshchestv // *Analiz riska zdorov'yu*. 2023. № 4. S. 33–41.
4. Sulima T.G., Golovejko I.V. Rol' MCHS Rossii v obespechenii bezopasnosti Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii i severnogo morskogo puti // *Bezopasnaya Arktika-2025: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. M., 2025*. S. 9–22.
5. Problemy i puti resheniya obespecheniya nadezhnosti ispol'zovaniya pozhamoj i avarijno-spasatel'noj tekhniki, tekhnicheskikh sredstv, oborudovaniya MCHS Rossii v Arkticheskom regione / T.G. Sulima [i dr.] // *Russkij led – 2024: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. SPb., 2024*. S. 20–25.
6. Ckhovrebov E.S. Ekologicheskie posledstviya chrezvychajnyh situacij tekhnogennogo haraktera. Moskva: FGBU VNII GOCHS (FC), 2025. 280 s.
7. Problemy ekologicheskoy bezopasnosti tekhnogennykh ob'ektov v usloviyah degradacii mnogoletnej merzloty / V.N. Beznosov [i dr.] // *Vestnik evrazijskoj nauki*. 2024. T. 16. № 2.
8. Waste management peculiarities in far North from the perspective of environmental hazard and emergency prevention / Yu. Shishkov [et al.] // *E3S Web of Conferences*. XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023). EDP Sciences, 2023. R. 04003.
9. Ocenka ushcherba chrezvychajnyh situacij / M.I. Lomakin [i dr.] // *Teoriya i praktika grazhdanskoj zashchity na strazhe bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti sovremennogo obshchestva*. M.: VNII GOCHS. 2022. S. 32–36.
10. Kazymov I.M., Boyarkov D.A., Kompaneec B.S. Podhody k opredeleniyu velichiny ekonomicheskogo ushcherba i riskov vyhoda iz stroya oborudovaniya elektroenergetiki // *Nauchnyj zhurnal «Vek kachestva»*. 2022. № 3. S. 150–162.
11. Pashencev A.I. Metodicheskij podhod k ocenke pryamogo ekonomicheskogo ushcherba pri otklyuchenii potrebitel'ej ot centralizovannogo teplosnabzheniya // *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya*. 2017. № 3 (64). S. 33–39.
12. Lesnyh V.V., Timofeeva T.B., Petrov V.S. Problemy ocenki ekonomicheskogo ushcherba, vyzvannogo pereryvami v elektrosnabzhenii // *Ekonomika regiona*. 2017. T. 13. S. 847–858.

13. Zagumennova M.V., Poroshin A.A., Firsov A.G. Metodologicheskij podhod k opredeleniyu material'nogo ushcherba ot pozharov // Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve. 2021. № 4. S. 64–79.
14. Ckhovrebov E.S., Sadova S.V. Ekonomicheskie i pravovye voprosy ocenki ekologicheskogo ushcherba (vreda) // Vestnik RAEN. 2014. T. 14. № 2. S. 57–59.
15. Zhavoronkova N.G. Vozmeshchenie ekologicheskogo vreda: zakonodatel'nye novelly // Zhurnal «LexRussica». 2016. № 8. S. 130–140.
16. Montewka J., Weckström M., Kujala P. A probabilistic model estimating oil spill clean-up costs – A case study for the Gulf of Finland // Marine Pollution Bulletin. 2013. R. 212–218.
17. Danilova N.V. Sovershenstvovanie instituta vozmeshcheniya ekologicheskogo vreda // Ekologicheskoe pravo. 2015. № 3. S. 3–6.
18. Medvedeva O.E. Zadachi ocenki ekologicheskogo ushcherba v Arkticheskoy zone // Arktika i Sever. 2015. № 18. S. 131–147.
19. Kudel'kin N.S. Pravovye voprosy vozmeshcheniya vreda, prichinennogo okruzhayushchej srede v rezul'tate razlivov nefi i nefteproduktov // Yuridicheskie issledovaniya. 2021. № 9. S. 2–9.
20. Pervye normativno-pravovye akty v sfere «severnnyh» garantij i kompensacij dlya pozharov v Rossii / A.A. Smirnova [i dr.] // Pravo. Bezopasnost'. Chrezvychajnye situacii. 2024. № 4 (65). S. 50–59.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 24.03.2026; одобрена после рецензирования: 02.04.2026; принята к публикации: 30.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 24.03.2026; approved after review: 02.04.2026; accepted for publication: 30.04.2026

Информация об авторах:

Цховребов Эдуард Станиславович, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций» Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий) (121352, Москва, ул. Давыдовская, д. 7), кандидат экономических наук, доцент, e-mail: rebrovstanislav@rambler.ru, SPIN-код: 3464-2975

Берестевич Мария Олеговна, советник отдела развития обеспечения безопасности Арктического региона Департамента образовательной и научно-технической деятельности МЧС России (121357, Москва, ул. Ватутина, д. 1), e-mail: i.goloveiko@mchs.gov.ru, SPIN-код: 2029-0132

Головейко Инга Викторовна, советник отдела развития обеспечения безопасности Арктического региона Департамента образовательной и научно-технической деятельности МЧС России (121357, Москва, ул. Ватутина, д. 1), e-mail: i.goloveiko@mchs.gov.ru, SPIN-код: 1401-5575

Information about the authors:

Tshovrebov Eduard S., senior researcher at the research center «Monitoring and forecasting of emergency situations» of Russian scientific research institute for civil defence and emergencies of the EMERCOM of Russia (Federal science and high technology center), candidate of economic sciences (121352, Moscow, Davydovskaya Str., 7), e-mail: rebrovstanislav@rambler.ru, SPIN: 3464-2975

Berestevich Mariya O., advisor of Arctic region security development division of Department of educational and scientific-technical activities of EMERCOM of Russia (121357, Moscow, Vatutina Str., 1), e-mail: i.goloveiko@mchs.gov.ru, SPIN: 2029-0132

Goloveiko Inga V., advisor of arctic region security development division of Department of educational and scientific-technical activities of EMERCOM of Russia (121357, Moscow, Vatutina Str., 1), e-mail: i.goloveiko@mchs.gov.ru, SPIN: 1401-5575

Научная статья

УДК 628.196; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-244-256

ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СПОСОБОВ ЛИКВИДАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Гавкалюк Богдан Васильевич;

Савчук Олег Николаевич;

✉Пьянусов Александр Викторович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉a.pyanusov@igps.ru

Аннотация. В статье на основе анализа экологических катастроф на территории и акватории России в течение последних пяти лет представлены данные по причинам их возникновения, масштабам последствий загрязнения среды обитания людей, материальному ущербу, а также длительности ликвидации последствий. На основе анализа существующих методов и способов ликвидации разливов нефтепродуктов вскрыты проблемы в организации и осуществлении мер по ликвидации последствий разлива нефтепродуктов на почве и морских акваториях. Предложены пути совершенствования мер по локализации и ликвидации последствий разливов:

- совершенствование механических методов путем создания новых типов сорбентов;
- совершенствование мониторинга и прогнозирования таких аварий; повышению оперативной готовности сил и средств МЧС России к предупреждению и ликвидации загрязнения акваторий путем применения современных маломерных судов, оснащенных эффективными средствами локализации и сбора нефтепродуктов, а также совершенствование тактики их применения;
- совершенствование химических и физико-химических методов очистки и локализации загрязнений; разработка перспективных мер по восстановлению экосистем после разливов нефти.

Ключевые слова: экологическая катастрофа, нефтепродукты, локализация нефтяных пятен, мониторинг и прогнозирование последствий экологических чрезвычайных ситуаций, ликвидация последствий загрязнения нефтепродуктами

Для цитирования: Гавкалюк Б.В., Савчук О.Н., Пьянусов А.В. Проблемы и пути совершенствования способов ликвидации экологических последствий разлива нефтепродуктов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 244–256. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-244-256

Scientific article

PROBLEMS AND WAYS TO IMPROVE THE METHODS OF ELIMINATING THE ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF OIL SPILLS

Gavkalyuk Bogdan V.;

Savchuk Oleg N.;

✉ Pyanusev Alexander V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ a.pyanusev@igps.ru

Abstract. Based on the analysis of environmental disasters in the territory and waters of Russia over the past five years, the article presents data on the causes of their occurrence, the scale of the consequences of human habitat pollution, material damage, and the duration of the aftermath. Based on the analysis of existing methods and methods for eliminating oil product spills, problems in the organization and implementation of measures to eliminate the consequences of oil product spills on soil and marine areas have been revealed. Ways to improve measures to localize and eliminate the consequences of the spill are proposed: to improve mechanical methods by creating new types of sorbents, to improve monitoring and forecasting of such accidents, to increase the operational readiness of the forces and means of EMERCOM of Russia in order to prevent and eliminate pollution of the water area through the use of modern small vessels equipped with more effective means of protecting oil spills and collecting in ports where tankers are moored, tactics of their use, improvement of chemical and physico-chemical methods for cleaning and localization of pollution, promising measures to restore ecosystems after oil spills.

Keywords: environmental disaster, petroleum products, localization of oil spills, monitoring and forecasting the consequences of environmental emergencies, elimination of the consequences of pollution by petroleum products

For citation: Gavkalyuk B.V., Savchuk O.N., Pyanusev A.V. Problems and ways to improve the methods of eliminating the environmental consequences of oil spills // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 244–256. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-244-256

Введение

Аварии на объектах нефтегазового комплекса приводят к экологическим чрезвычайным ситуациям (ЧС), наносящим значительный ущерб экосистемам и требующим значительных ресурсов и технических средств для их ликвидации. Одной из самых сложных экологических проблем является разлив нефти и нефтепродуктов из-за физико-химических свойств нефти, которая содержит как тяжелые, так и летучие углеводороды [1].

По данным различных исследований, ежегодно в акватории мирового океана оказывается от 1,3 до 1,8 млн т нефти и нефтепродуктов. Значительная часть этих выбросов связана с авариями танкеров, нефтяных платформ и трубопроводов. Разливы нефти оказывают разрушительное воздействие на морскую флору и фауну. В табл. 1 представлен анализ крупных инцидентов разлива нефти в России с 2020 по 2024 г. [2]^{1,2}.

¹ Фадеева А., Бурмистрова С., Подобедова Л. ЧС с разливом дизеля в Норильске. Что важно знать // РБК. 2020. 4 июня. URL: https://www.rbc.ru/business/04/06/2020/5ed7b3a19a79470f8a58995b?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 15.01.2026)

² Шаталова Л., Бардин Д. Разлив нефти в ХМАО. URL: <https://neft.media> (дата обращения: 15.01.2026).

Таблица 1

Анализ крупных инцидентов разлива нефти в России с 2020 по 2024 год

Авария	Место происшествия	Причины происшествия	Последствия	Материальный ущерб	Длительность ликвидации аварии
Разлив дизельного топлива в г. Норильске (май 2020 г.)	г. Норильск, ТЭЦ-3; р. Амбарная и Далдыкан; о. Пясино	Разгерметизация резервуара из-за проседания свайного основания (таяние вечной мерзлоты)	Загрязнение водоёмов; угроза экосистеме Северного Ледовитого океана	«Норникель» выплатил штраф в размере 146,2 млрд руб. за нанесённый вред экологии	Работы по очистке и реабилитации загрязнённых земель завершились к концу 2023 г.
Разлив нефти в Республике Коми (май 2021 г.)	Ошское месторождение; вблизи р. Колва	Разгерметизация трубопровода, по которому транспортировалась нефть	В результате аварии в почву попало около 100 т нефтепродуктов, из которых приблизительно 9 т достигли р. Колва. Загрязнённая территория охватила около 1,3 га. Разлив нефти привёл к загрязнению водных ресурсов и почвы, что негативно сказалось на местной экосистеме	Более 374 млн руб.	Работы по очистке и реабилитации загрязнённых земель завершились к июлю 2022 г.
Разлив нефтепродуктов в г. Новороссийске (февраль 2024 г.)	Инцидент произошёл в акватории морского порта Новороссийск, у причала № 5 Восточного пирса ПАО «Новороссийский морской торговый порт» (НМТП).	Разлив произошёл из-за утечки нефтепродуктов с борта судна Hai Jin Jiang под флагом Панамы	Загрязнение акватории Черного моря на площади 300 м ² . Оперативные меры позволили предотвратить дальнейшее распространение нефтепродуктов	Росприроднадзор оценил ущерб окружающей среде более чем в 450 млн руб.	Спасатели Азово-Черноморского филиала Морсбасслужбы завершили операцию по ликвидации разлива, собрав и передав на утилизацию около 40 т нефтепродуктов

Крушение танкеров в Керченском проливе (15 декабря 2024 г.)	Путь, соединяющий Чёрное и Азовское море; Краснодарский край	В результате сильного шторма танкеры, «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239», потерпели крушение	В море вылилось около 3 700 т мазута, что привело к загрязнению более 50 км побережья Чёрного моря, включая районы Анапы и Темрюкского района Краснодарского края. Пострадали местные экосистемы; зафиксирована гибель более 200 птиц и около 70 дельфинов	Материальный ущерб с учетом объема разлива и масштабов ликвидационных работ оценивается в 85 млрд руб.	Точные сроки завершения работ не указаны, но оперативные меры позволили быстро локализовать и устранить последствия аварии
					Ликвидация последствий продолжается по сей день

В современных условиях проблема загрязнения окружающей среды является актуальной и требует повышенного внимания со стороны государственной власти, бизнеса и общества. В случаях техногенных, природных ЧС или террористических актов, приведших к масштабным экологическим катастрофам, наиболее сложным и затратным является процесс ликвидации последствий и восстановление экосистем при разливах нефтепродуктов на акваториях (табл. 1). Одной из проблем эффективной ликвидации последствий разливов нефти является разработка и поиск методов по их локализации и оперативной полной ликвидации последствий. Поэтому оперативная ликвидация разливов нефти требует четкой координации различных служб, использования современных технологий и учета множества факторов таких экологических аварий.

Целью работы является анализ существующих методов и способов ликвидации разливов нефтепродуктов на акваториях и выработка путей по их совершенствованию.

Анализ существующих методов и способов ликвидации разливов нефтепродуктов на акваториях

Загрязнение морских акваторий в случаях с авариями танкеров вследствие техногенных, природных ЧС или террористических актов может привести к длительному процессу их ликвидации. Наибольший урон приносят загрязнения нефтеналивных танкеров вблизи прибрежных территорий. Неслучайно террористические акты на танкерах, перевозящих нефтепродукты и опасные химические вещества, осуществлялись в портах или вблизи прибрежных территорий. Только в период 2025 г. было совершено около пяти таких террористических актов (табл. 2). К счастью, они не привели к разгерметизации танков. Результаты расчета возможных последствий разливов нефтепродуктов на морских акваториях с учетом полного истечения содержимого танков по формуле (1) согласно [3] представлены в табл. 2.

$$S=10^{53}\sqrt[3]{V^4}, \quad (1)$$

где S – площадь разлива нефтепродуктов на акватории, км²; V – объем содержимого нефтепродуктов танкера, м³; ρ – удельная плотность перевозимого нефтепродукта 0,94 т/м³.

Таблица 2

Возможные экологические происшествия с проливом нефтепродуктов, которые могли произойти при подрыве танкеров в 2025 г.

Происшествия	Место происшествия	Причины происшествия	Возможные последствия с учетом полного истечения, км ²
15.01.2025 на танкере Seacharm	порт Джейхан Турция	Взрыв на танкере с дедвейтом 112,8 тыс. т	Аварийный разлив на акватории 383
Начало февраля 2025 г. на танкере-химовозе Grace Ferrum	порт Триполи Ливия	Взрыв на танкере с дедвейтом 50 тыс. т	Аварийный разлив на акватории 208,3
09.02.2025 г. на танкере Koala	порт Усть-Луга Россия	Три взрыва на танкере с дедвейтом 164,5 тыс. т	Аварийный разлив на акватории 508,75
15.02.2025 г. на танкере Seajewel	порт Савонна Италия	Взрыв на танкере с дедвейтом 108,9 тыс. т	Аварийный разлив на акватории 373,4
27.06.2025 г. на танкере Vilamoura	порт Эз Зуэтина в заливе Сидра Ливия	Взрыв на танкере с дедвейтом 158,6 тыс. т	Аварийный разлив на акватории 495

Расчет возможного аварийного разлива осуществлялся согласно [4] Правилам о принимаемых максимально расчетных объемах крупномасштабных разливов танкеров с 50 % его содержимым, принятых с 1 января 2021 г. В работе [4] автор рассчитал частоту крупномасштабных разливов таких танкеров, равную $1,2 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹. Однако, как показали последние события, с учетом участвовавших и роста возможных террористических актов было принято решение на Черном море не загружать иностранные нефтеналивные танкеры.

Как видно из табл. 2, такого рода террористические акты могут привести к масштабным катастрофическим экологическим последствиям, успешная ликвидация последствий которых будет зависеть от принятых своевременных и выбранных эффективных способов и средств очистки акватории от нефтепродуктов. При этом затраты на ликвидацию разливов могут достигать миллиардов рублей (табл. 1). Однако из-за недостаточного финансирования и сложностей с оценкой ущерба не всегда удается устранить последствия в полном объеме.

В настоящее время используются несколько основных методов очистки водных и наземных экосистем от нефти:

- механический (боны, скиммеры, сорбенты) – самый распространенный, но малоэффективный при больших разливах и сложных погодных условиях;
- химический (диспергенты, растворители, коагулянты), который позволяет быстрее разлагать нефть, но может быть токсичен для окружающей среды;
- биологический (использование нефтеокисляющих бактерий), который является наиболее экологичным способом, но требует времени и благоприятных условий для создания микрофлоры;
- физико-химический (термическое обезвреживание, флотация, электрокоагуляция), который может быть эффективным, но требует больших затрат энергии и специализированного оборудования.

Выбор метода ликвидации последствий зависит от характеристик разлива, условий окружающей среды и доступных технологий. Однако отсутствие единого алгоритма и нормативов по выбору методов приводит к задержкам и неэффективности работ [5, 6].

Одной из проблем ликвидации последствий при аварийных разливах является локализация нефтяного пятна, чтобы оно не распространилось на большие пространства и прибрежные территории. Однако этому могут способствовать:

- сложные погодные условия (сильный ветер, волны, ледовая обстановка);
- нехватка специализированного оборудования (например, недостаточное количество боновых заграждений в регионах);
- запоздалая реакция аварийных служб, что приводит к попаданию нефти в экосистему;
- недостаточная подготовленность персонала и несовершенство регламентов по локализации разливов;
- в условиях Арктики, где замерзшая нефть смешивается со льдом, традиционные методы локализации практически не работают, требуются специальные технологии [7].

При оценке эффективности проводимых мероприятий по ликвидации разлива нефтепродуктов существует также ряд проблем [3, 8]:

- наличие разных методов оценки эффективности, что затрудняет объективное сравнение;
- долгосрочные последствия разливов (некоторые загрязнения обнаруживаются спустя годы);
- отсутствие единой системы мониторинга ликвидационных работ;
- специфические условия ликвидации разливов в разных климатических и географических зонах, которые требуют индивидуального подхода;
- в Арктике наличие низких температур, ледовый покров, сложная транспортная доступность;

– в прибрежных районах это высокая динамика водных масс, сложность локализации нефтяных пятен;

– на суше (в лесах, болотах) это трудности с доступом техники, необходимость восстановления почв.

Например, в Грозненском районе Чечни нефтяные загрязнения накапливались десятилетиями, что привело к формированию глубоких нефтяных слоев в почве, требующих особых технологий очистки.

В связи с этим необходима разработка научно обоснованных критериев оценки успешности мероприятий, включающих не только количественные, но и качественные показатели.

Чтобы минимизировать вероятность аварийных разливов, необходимо заранее анализировать потенциальные риски. Однако при оценке рисков существует сложности в их достоверном определении:

- недостаток данных по прошлым разливам, что затрудняет прогнозирование;
- несовершенство технологий контроля за состоянием нефтепроводов и платформ;
- проблемы с контролем безопасности на малых и старых нефтяных объектах.

Методы ликвидации разливов нефти

Современные методы ликвидации разливов нефти можно разделить на несколько основных категорий: механические, химические, физико-химические и биологические. Каждый из них применяется в зависимости от условий аварии, типа загрязнённой поверхности (вода, почва, лёд) и масштаба разлива.

1. Механические методы включают традиционные и наиболее безопасные способы очистки, основанные на физическом удалении нефти с водной поверхности либо земли:

– боновые заграждения – это плавающие барьеры, которые локализуют пятно и предотвращают его дальнейшее распространение;

– скиммеры – средства, предназначенные для сбора нефти с водной поверхности. Современные модели используют вакуумные, адсорбционные или центрифужные технологии;

– сорбенты – материалы, обладающие впитывающим свойствами. Применяются либо в виде порошков, либо в виде матов, лент или гранул. Современные средства очистки, как правило, включают наноструктурированные сорбенты, которые повышают результативность очистки поверхностей;

– применяемые гидродинамические технологии – подразумевают использование волн, струй воды и беспилотные подводные средства для сбора нефти [9].

2. Химические методы очистки включают использование разработанных реагентов, которые форсируют процесс разложения или сбор нефти. Это, как правило:

– диспергенты – вещества, разрушающие нефтяную плёнку на мелкие фракции, ускоряя её биodeградацию. Возможно применение в условиях сильного волнения водных поверхностей, но могут быть токсичны по своему характеру;

– гелеобразователи – превращают нефть в состояние геля, что облегчает её последующий сбор;

– окислители и катализаторы ускорения распада нефтепродуктов, но требующие строгого контроля их применения, чтобы не нанести вред экосистеме.

3. Физико-химические методы, направленные на изменение молекулярных свойств нефти, для облегчения её последующего удаления:

– электрокоагуляция – способ использования электрического тока для агрегации нефтяных частиц и их последующего удаления;

– флотация – пропускание специально создаваемых воздушных пузырьков через загрязнённую среду для перенаправления нефтяных частиц на поверхность;

- криогенные методы – это замораживание нефтяных фракций для их последующего механического удаления с поверхности;
- применение плазменных технологий очистки – способ уничтожения нефтепродуктов с помощью плазменных потоков с высокой температурой горения.

4. Биологические методы являются более экологичными, основанными на генной инженерии, для разложения нефти природными микроорганизмами:

- метод биоразложения нефти бактериями с применением нефтедеструкторов (штаммов бактерий, грибов и водорослей), позволяющих ускорить распад углеводов;
- метод фиторемедиации – использование растений, способных поглощать и эффективно перерабатывать продукты загрязнения окружающей среды;
- интеграция решений энзимных технологий на основе применения ферментов, разлагающих нефть до безопасных соединений [10, 11].

Современные методы снижения негативных последствий разливов нефти потенциально развиваются в направлении повышения эффективности их применения, снижения токсичности воздействия на окружающую среду и создании комплекса высокотехнологических средств для очистки. Выбор наиболее эффективного метода зависит от конкретных обстоятельств произошедшей ЧС.

Так, например, при ЧС с разливом дизельного топлива вблизи г. Норильска в 2020 г., которая стала одной из крупнейших экологических катастроф в Арктике, ликвидация последствий этой экологической трагедии потребовала значительных материальных затрат, привлекаемых ресурсов и времени на её устранение [12–14]. В ходе ликвидации последствий применялся комбинированный подход к ликвидации загрязнения, включавший в себя несколько основных направлений выполняемых работ:

- установка боновых заграждений для локализации распространения разлива по водной поверхности. Их установка позволила предотвратить дальнейшее загрязнение водоёмов;
- механический сбор топлива с использованием вакуумных насосов и скimmers;
- применение различного рода сорбентов для впитывания остатков топлива с поверхности воды и почвы;
- применение специальных устройств для откачки загрязнённого грунта. Значительные объёмы почвы были извлечены и вывезены на специальные полигоны для очистки и последующей утилизации;
- некоторая часть собранного дизеля сжигалась на месте, чтобы минимизировать его попадание в экосистему;
- применения метода биоремедиации – использование соответствующих микроорганизмов для естественного разложения остатков топлива в почве.

Поэтому на современном этапе проведения аварийно-спасательных работ, при небольших утечках нефтепродуктов, самым эффективными будут считаться инновационно-технические методы, когда природоохранные технологии применяются комбинированно в зависимости от конкретных условий протекания ЧС.

Пути совершенствования методов ликвидации аварийных разливов нефти

Совершенствование методов ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов направлено на повышение эффективности подходов к восстановлению экосистем, снижение негативного воздействия на окружающую среду и адаптацию выполняемых аварийных работ к сложным климатическим условиям, что позволяет эффективно минимизировать ущерб природе и быстрее устранять последствия ЧС.

Основные пути развития включают инновационные технологии, улучшение существующих методов и разработку комплексных стратегий:

1. Совершенствование механических методов путем создания новых типов сорбентов:

- наноструктурированные материалы, такие как графеновые губки, аэрогели, модифицированные цеолиты, обладающие высокой сорбционной способностью, которые могут использоваться многократно;

– биосорбенты на основе природных материалов (целлюлоза, хитозан, водоросли), которые делают процесс более экологичным.

2. Автоматизация и роботизация мер по ликвидации последствий:

– использование автономных роботов-скиммеров для сбора нефти с поверхности воды.
– применение дронов для мониторинга и локализации разливов в труднодоступных районах [15].

3. Совершенствование химических и физико-химических методов:

– экотоксичные диспергенты заменяются на биоразлагаемые аналоги, снижающие вред окружающей среде;

– комбинированные реагенты: соединения, сочетающие свойства диспергентов и сорбентов, обеспечивают более эффективную очистку;

– плазменные технологии: позволяют разрушать нефть без применения химикатов, сжигая её при высоких температурах;

– криогенные технологии: замораживание нефтяных пятен на льду с последующим механическим удалением;

– электромагнитные методы: разработка систем, использующих магнитные наночастицы для связывания и удаления нефти;

– лазерные и ультразвуковые методы – исследования в области разрушения нефтяных пятен без использования химии [16, 17].

4. Развитие биологических технологий ликвидации последствий разливов нефти:

– создание генетически модифицированных микроорганизмов, ускоряющих процесс биodeградации углеводородов;

– фиторемедиация – использование растений, способных поглощать и перерабатывать нефтепродукты (например, масличные культуры, способные извлекать углеводороды из почвы);

– биоферменты и катализаторы, ускоряющие естественное разложение нефти.

5. Совершенствование методов прогнозирования разливов нефтепродуктов:

– использование искусственного интеллекта и машинное обучение для анализа и прогнозирования распространения нефтяных пятен;

– спутниковый мониторинг в реальном времени для оперативного обнаружения разливов.

6. В целях оперативного реагирования по ликвидации последствий нефтяных разливов целесообразно:

– совершенствовать строительство маломерных судов, оснащенных более эффективными средствами ограждения нефтяных пятен и сбора;

– увеличить количество маломерных судов МЧС России, оснащенных более эффективными средствами ограждения нефтяных пятен и сбора, в портах, где швартуются танкеры;

– практиковать преждевременную встречу и эскорт маломерными судами танкеров при подходе к причалам;

– в условиях специальной военной операции предусматривать защиту танкеров от применения воздушных и морских беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) террористов.

7. При оценке эффективности проводимых мероприятий по ликвидации разлива нефтепродуктов необходима разработка научно обоснованных критериев оценки успешности мероприятий, включающих не только количественные, но и качественные показатели.

8. Восстановление экосистем после разливов нефти является сложным и длительным процессом, требующим комплексного подхода. Российские ученые предлагают различные методы и стратегии для эффективной реабилитации пострадавших территорий.

Так, например, биологи Тюменского государственного университета (ТюмГУ) провели 25-летние наблюдения за восстановлением лугового биоценоза после аварийного разлива нефти, произошедшего в декабре 1994 г. при порыве магистрального нефтепровода Усть-Балык – Альметьевск. В результате разлива нефть загрязнила более трех гектаров территории с концентрацией свыше 60 % в почве, что считается сильным загрязнением. В 1995 г. были проведены комплексные рекультивационные работы: откачка нефти, внесение чистой плодородной почвы, удобрений и посев трав. Наблюдения показали, что только через 25 лет после рекультивации флора и фауна практически полностью восстановились, хотя процессы естественного заболачивания продолжаются.

Поэтому в целях повышения эффективности технологий ликвидации последствий разливов нефтепродуктов в настоящее время ведутся работы по поиску способов и средств оперативной очистки акваторий от загрязнений и восстановления экосистем.

В качестве примера можно привести разработку экологически безопасного реагента для окружающей среды при удалении пятен нефтяных разливов. Этот реагент, представляющий собой композицию фосфолипидов и изобутанола, имеет способность за весьма непродолжительное время, уменьшить площадь нефтяного разлива на 89–93 % при внешней температуре от 0 °С до 22 °С. Благодаря своей высокой эффективности и экологичности, этот реагент может стать одним из наиболее эффективных инструментов для очистки водных поверхностей от нефтяных загрязнений.

При проведении работ по восстановлению морских экосистем в вышеперечисленных случаях в морских акваториях целесообразно применение следующих мер:

- механический сбор нефтепродуктов соответствующими средствами: удаление основной массы загрязнений с поверхности воды и береговой линии;
- активное применение сорбентов: использование материалов, позволяющих поглощать остатки нефти для предотвращения дальнейшего распространения загрязнения;
- проведение биоремедиации: введение микроорганизмов, способных эффективно разлагать нефтепродукты, для последующего ускорения естественных процессов очистки;
- использование фиторемедиации: посадка специальных растений, которые позволяют восстановить загрязненные природные ресурсы.

Эти методы направлены на минимизацию ущерба и ускорение восстановления экосистем, однако их эффективность зависит от конкретных условий и масштабов загрязнения.

Заключение

В целом практика ликвидации последствий крупномасштабных экологических ЧС с разливом нефтепродуктов показала о необходимости комплексного подхода, включающего как традиционные методы очистки, так и современные биотехнологии для эффективного восстановления экосистем после разливов нефти [17]. В условиях использования террористами морских беспилотников для разрушения танков танкеров требуется поиск новых подходов и способов ликвидации последствий. Анализ таких крупных аварий показал невозможность оперативной локализации и ликвидации последствий ЧС [18].

Так, например, авария танкера «Eхxon Valdez» у берегов Аляски 24 марта 1989 г., повлекшая за собой разлив 37 тыс. т сырой нефти, привела к загрязнению 1 200 миль морского побережья, локализовать разлив не удалось. Гибель танкера «Эрика» у западного побережья Франции 2 декабря 1999 г. привела к разливу 20 тыс. т мазута. Локализация разлива не была произведена, было загрязнено более 400 км пляжей Франции и Испании. Ликвидация последствий разлива мазута при авариях в Керченском проливе двух танкеров 15 декабря 2024 г. продолжается и сегодня.

Список источников

1. Соромотин А.В. Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов. Ликвидация последствий разливов // *International Agricultural Journal*. 2021. Vol. 64. № 1. Р. 69–74. DOI: 10.24412/2588-0209-2021-10278
2. Киракосян Д.В., Молчанова Я.П. Анализ первых последствий нефтяного разлива в Норильске // *Успехи в химии и химической технологии*. 2021. Т. 35. № 2 (237). С. 43–46.
3. Методы оценки параметров разлива нефти и процессов его контролируемого горения в ледовых условиях Арктической зоны Российской Федерации / А.А. Долгов [и др.]. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023. 84 с.
4. Моценко С.В. Научные основы организации работ по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в море с судов и объектов транспортной инфраструктуры: дис. ... д-ра техн. наук. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2023. 300 с.
5. Ракитин М.С. Проблема ликвидации разливов нефти // *Журнал «Academy»* Архангельск. 2017. № 4 (19). С. 25–27.
6. Авдеев И.В. Основные методы ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на нефтеперерабатывающих предприятиях // *Вестник науки*. 2023. № 11 (68). С. 395–398.
7. Бухтеева А.А., Морозов А.В., Мокоучина Т.В. Современные и перспективные методы ликвидации разливов нефти на акваториях Российской Федерации // *Проблемы разработки, эксплуатации и обслуживания объектов добычи и транспорта углеводородов: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием*. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 212–216.
8. Васильева Ж.В., Васеха М.В., Тюляев В.С. Оценка эффективности сорбентов для реагирования на аварийные разливы нефти в арктической акватории // *Записки Горного института*. 2023. Т. 261. С. 401–411. DOI: 10.31897/PMI.2023.38
9. Белолипецкий А.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.В. Гидрофобизированные аэрогели на основе волокон полиэтилентерефталата для сорбции нефти // *Успехи в химии и химической технологии*. 2020. Т. 34. № 11 (234). С. 78–80.
10. Федорова Н.А. Анализ методов ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов // *Вестник науки*. 2023. Т. 2. № 12 (69). С. 1097–1101.
11. Dispersants as an oil spill clean-up technique in the marine environment: A review / M. Adebajo [и др.] // *Heliyon*. 2022. Vol. 8. № 9. Р. e10698. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10698
12. Emerging bio-dispersant and bioremediation technologies as environmentally friendly management responses toward marine oil spill: A comprehensive review / S. Musa [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 321. Р. 115800. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115800
13. Гляднецова Ю.С., Немировская И.А. Аварийный разлив дизельного топлива в Норильске // *Природа*. 2022. № 3. С. 27–38. DOI: 10.7868/S0032874X22030036
14. Гидрохимические показатели качества воды Норило-Пясинской озерно-речной системы после разлива дизельного топлива на ТЭЦ-3 г. Норильска в 2020 г. / Д.М. Безматерных [и др.] // *Сибирский экологический журнал*. 2021. Т. 28. № 4. С. 408–422. DOI: 10.15372/SEJ20210402
15. Observations of meadow biocenosis after reclamation of oil contamination in the southern taiga subzone of Tyumen Region / M. Kazantseva [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1076. Р. 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/1076/1/012012
16. Ледяев К.А. Как дроны и беспилотники спасают экосистемы от разлива нефти // *Тенденции развития науки и образования*. 2023. № 102. Ч. 4. С. 118–121. DOI: 10.18411/trnio-10-2023-214
17. Елизарьева Е.Н., Лозов А.В. Совершенствование методов локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на объектах нефтеперерабатывающего комплекса // *Актуальные исследования*. 2025. № 18 (253). С. 74–79.
18. Khan M.Yu., Islam M.S., Rahman M.M. Bio-based sorbents for marine oil spill response: Advances in modification, circularity and waste valorization // *Resources*. 2025. Vol. 14. № 9. Article 140. DOI: 10.3390/resources14090140

References

1. Soromotin A.V. Avarijnye razlivy nefi i nefteproduktov. Likvidaciya posledstvij razlivov // International Agricultural Journal. 2021. Vol. 64. № 1. P. 69–74. DOI: 10.24412/2588-0209-2021-10278
2. Kirakosyan D.V., Molchanova Ya.P. Analiz pervyh posledstvij neftyanogo razliva v Noril'ske // Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii. 2021. T. 35. № 2 (237). S. 43–46.
3. Metody ocenki parametrov razliva nefi i processov ego kontroliruemogo goreniya v ledovyh usloviyah Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii / A.A. Dolgov [i dr.]. M.: FGBU VNII GOCHS (FC), 2023. 84 s.
4. Mocenko S.V. Nauchnye osnovy organizacii rabot po preduprezhdeniyu i likvidacii razlivov nefi i nefteproduktov v more s sudov i ob"ektov transportnoj infrastruktury: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Vladivostok: Dal'nevostochnyj federal'nyj universitet, 2023. 300 s.
5. Rakitin M.S. Problema likvidacii razlivov nefi // Zhurnal «Academy» Arhangel'sk. 2017. № 4 (19). S. 25–27.
6. Avdeev I.V. Osnovnye metody likvidacii razlivov nefi i nefteproduktov na neftepererabatyvayushchih predpriyatiyah // Vestnik nauki. 2023. № 11 (68). S. 395–398.
7. Buhteeva A.A., Morozov A.V., Mokochunina T.V. Sovremennye i perspektivnye metody likvidacii razlivov nefi na akvatoriyah Rossijskoj Federacii // Problemy razrabotki, ekspluatatsii i obsluzhivaniya ob"ektov dobychi i transporta uglevodorodov: materialy IX Vseros. nauc.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem. Omsk: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. S. 212–216.
8. Vasil'eva Zh.V., Vasekha M.V., Tyulyaev V.S. Ocenka effektivnosti sorbentov dlya reagirovaniya na avarijnye razlivy nefi v arkticheskoy akvatorii // Zapiski Gornogo instituta. 2023. T. 261. S. 401–411. DOI: 10.31897/PMI.2023.38
9. Belolipecij A.A., Cygankov P.Yu., Men'shutina N.V. Gidrofobizirovannye aerogeli na osnove volokon polietilentereftalata dlya sorbcii nefi // Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii. 2020. T. 34. № 11 (234). S. 78–80.
10. Fedorova N.A. Analiz metodov likvidacii razlivov nefi i nefteproduktov // Vestnik nauki. 2023. T. 2. № 12 (69). S. 1097–1101.
11. Dispersants as an oil spill clean-up technique in the marine environment: A review / M. Adebajo [i dr.] // Heliyon. 2022. Vol. 8. № 9. P. e10698. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10698
12. Emerging bio-dispersant and bioremediation technologies as environmentally friendly management responses toward marine oil spill: A comprehensive review / S. Musa [et al.] // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 321. P. 115800. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115800
13. Glyaznecova Yu.S., Nemirovskaya I.A. Avarijnyj razliv dizel'nogo topliva v Noril'ske // Priroda. 2022. № 3. S. 27–38. DOI: 10.7868/S0032874X22030036
14. Gidrohimicheskie pokazateli kachestva vody Norilo-Pyasinskoj ozerno-rechnoj sistemy posle razliva dizel'nogo topliva na TEC-3 g. Noril'ska v 2020 g. / D.M. Bezmaternyh [i dr.] // Sibirskij ekologicheskij zhurnal. 2021. T. 28. № 4. S. 408–422. DOI: 10.15372/SEJ20210402
15. Observations of meadow biocenosis after reclamation of oil contamination in the southern taiga subzone of Tyumen Region / M. Kazantseva [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1076. P. 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/1076/1/012012
16. Ledyayev K.A. Kak drony i bespilotniki spasayut ekosistemy ot razliva nefi // Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2023. № 102. Ch. 4. S. 118–121. DOI: 10.18411/trnio-10-2023-214
17. Elizar'eva E.N., Lozov A.V. Sovershenstvovanie metodov lokalizacii i likvidacii avarijnyh razlivov nefi i nefteproduktov na ob"ektah neftepererabatyvayushchego kompleksa // Aktual'nye issledovaniya. 2025. № 18 (253). S. 74–79.
18. Khan M.Yu., Islam M.S., Rahman M.M. Bio-based sorbents for marine oil spill response: Advances in modification, circularity and waste valorization // Resources. 2025. Vol. 14. № 9. Article 140. DOI: 10.3390/resources14090140

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 11.04.2026; одобрена после рецензирования: 17.05.2026;
принята к публикации: 20.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 11.04.2026; approved after review: 17.05.2026;
accepted for publication: 20.05.2026

Сведения об авторах:

Гавкалюк Богдан Васильевич, начальник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: rector@igps.ru, SPIN-код: 6390-5867

Савчук Олег Николаевич, профессор кафедры экологии и обеспечения безопасности жизнедеятельности (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, профессор, e-mail: oleg-savcuk@mail.ru, SPIN-код: 5156-1928

Пьянусов Александр Викторович, заведующий кафедрой экологии и обеспечения безопасности жизнедеятельности (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат военных наук, доцент, e-mail: a.pyanusov@igps.ru, SPIN-код: 3449-7469

Information about the authors:

Gavkalyuk Bogdan V., head of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: rector@igps.ru, SPIN: 6390-5867

Savchuk Oleg N., professor of the department of ecology and life safety of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, professor, e-mail: oleg-savcuk@mail.ru, SPIN: 5156-1928

Pyanusov Alexander V., head of the department of ecology and life safety of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of military sciences, associate professor, e-mail: a.pyanusov@igps.ru, SPIN: 3449-7469

ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Научная статья

УДК 614.84; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-257-269

МЕТОД УЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПОВЕЩЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ЛЮДЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В РАСЧЕТЕ ПОЖАРНОГО РИСКА

✉ Мельников Григорий Олегович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ grinyam@list.ru

Аннотация. Рассматривается задача нормативно совместимого учета эксплуатационных и алгоритмических характеристик модульной системы оповещения и управления эвакуацией людей на основе технологии интернета вещей (IoT-COUE) при расчете индивидуального пожарного риска по методике, установленной приказом МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности». В расчетах индивидуального пожарного риска величины задаются как постоянные значения, тогда как при реальной эксплуатации они изменяются во времени и зависят от состояния оборудования, сетевой инфраструктуры и поведения контингента. Выделены основные точки интеграции характеристик IoT-COUE в расчет: параметры времени начала эвакуации (включая задержку оповещения и предэвакуационные действия), вероятность успешной эвакуации и вероятностные характеристики работоспособности систем оповещения. Вводится коэффициент подтвержденной функциональной надежности системы оповещения и управления эвакуацией, формируемый по логам и результатам регламентных испытаний; уточняется структура задержек оповещения с учетом поэтапного и адресного оповещения; задаются правила представления адаптивной маршрутизации и управления людскими потоками, включая случаи блокирования путей опасными факторами пожара. Дополнительно предложены коэффициент адаптивности IoT-COUE (0...1) и временной профиль риска, позволяющие связать расчет индивидуального пожарного риска с динамикой обстановки и режимами эксплуатации без изменения базовой структуры методики. Показано, что переход к вероятностно-статистическому учету задержек, надежности и состояний отказа повышает воспроизводимость оценки индивидуального пожарного риска и обоснованность выбора дополнительных противопожарных мероприятий.

Ключевые слова: пожарный риск, эвакуация, интернет вещей, пожарная безопасность, оповещение, система оповещения и управления эвакуацией

Для цитирования: Мельников Г.О. Метод учета характеристик модульной системы оповещения и управления эвакуацией людей на основе технологии интернета вещей в расчете пожарного риска // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 257–269. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-257-269

Scientific article

A METHOD FOR ACCOUNTING FOR THE CHARACTERISTICS OF A MODULAR ALERT AND PEOPLE EVACUATION MANAGEMENT SYSTEM BASED ON THE INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY IN CALCULATION OF FIRE RISK

✉Melnikov Grigoriy O.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉grinyam@list.ru

Abstract. The article considers the problem of a normatively compatible accounting of the operational and algorithmic characteristics of a modular warning and evacuation management system based on Internet of Things (IoT) technology when calculating individual fire risk according to the methodology established by order of EMERCOM of Russia dated November 14 2022 № 1140 «On Approval of the Methodology for Determining Calculated Fire Risk values in Buildings, Structures and Firefighters compartments of various functional fire hazard classes». In the fire risk calculations, the values are set as constant values, whereas in real operation they change over time and depend on the condition of the equipment, network infrastructure and the behavior of the contingent. The main points of integration of the characteristics of the IoT system into the calculation are highlighted: the parameters of the evacuation start time (including the delay in notification and pre-evacuation actions), the probability of successful evacuation, and the probabilistic characteristics of the alert system performance. The coefficient of confirmed functional reliability of the SSE is introduced, which is formed according to the logs and the results of routine tests.; The structure of notification delays is being clarified, taking into account step-by-step and addressable notification; rules for the presentation of adaptive routing and human flow management, including cases of blocking paths by fire hazards, are being set. Additionally, the coefficient of adaptivity of the IoT system (0...1) and the time risk profile are proposed, which make it possible to link the calculation of the IoT with the dynamics of the situation and operating modes without changing the basic structure of the methodology. It is shown that the transition to probabilistic and statistical accounting of delays, reliability, and failure conditions increases the reproducibility of the fire risks assessment and the reasonableness of the choice of additional fire prevention measures.

Keywords: fire risk, evacuation, Internet of Things, fire safety, notification, fire alarm system

For citation: Melnikov G.O. A method for accounting for the characteristics of a modular alert and people evacuation management system based on the internet of things technology in calculation of fire risk // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 257–269. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-257-269

Введение

В современных условиях развития строительных технологий, усложнения архитектурно-планировочных решений и роста функциональности зданий обеспечение пожарной безопасности все в большей степени опирается на риск-ориентированные методы оценки. Концепция пожарного риска позволяет количественно оценить вероятность наступления критических значений опасных факторов пожара (ОФП) для человека и тем самым принимать обоснованные проектные и эксплуатационные решения. Особое значение данный подход приобретает для объектов с массовым пребыванием людей, где эффективность эвакуации становится определяющим фактором сохранения жизни и здоровья людей [1, 2].

В Российской Федерации ключевым инструментом реализации риск-ориентированного подхода является методика определения расчетных величин пожарного риска, утвержденная приказом МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности». Данная методика стала результатом эволюции нормативных представлений о пожарной опасности зданий и сооружений и пришла на смену более ранней методике, утвержденной приказом МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». По сравнению с предыдущей редакцией, новая методика расширила набор учитываемых параметров, формализовала расчет индивидуального пожарного риска и в явном виде включила в расчет процессы эвакуации людей, временные характеристики развития пожара и блокирования эвакуационных путей.

Вместе с тем, несмотря на очевидные преимущества и методологическую зрелость, действующая методика расчета индивидуального пожарного риска (ИПР) в значительной степени опирается на априорно заданные, статические параметры [3, 4]. Вероятности присутствия людей в здании, время начала эвакуации, вероятность ее успешного завершения, а также эффективность систем противопожарной защиты в большинстве случаев определяются либо по нормативным значениям, либо на основе расчетных сценариев, не учитывающих изменчивость реальных условий эксплуатации объекта. Такой подход, будучи оправданным на этапе становления риск-ориентированной методологии, в условиях цифровизации и внедрения интеллектуальных инженерных систем начинает проявлять свои ограничения.

Результаты исследований надежности и эффективности системы оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) указывают на устойчивый характер снижения уровня работоспособности СОУЭ (табл. 1, рис. 1) [5, 6]. Показано, что низкая вероятность корректного срабатывания и функционирования СОУЭ обусловлена недостаточной надежностью, несоответствием типа СОУЭ типу объекта защиты, недостоверностью передаваемой информации, слабой профессиональной подготовкой персонала, малой разборчивостью и восприимчивостью передаваемых речевых сообщений, а также некорректностью принятых алгоритмов срабатывания.

Таблица 1

Состояние и функционирование СОУЭ

Год	Всего	Сработала, обеспечила безопасную эвакуацию людей из здания	Сработала, не обеспечила безопасную эвакуацию людей из здания	Исправна, но не сработала вследствие недостижения порога срабатывания	Неисправна	Не включена	Работоспособность СОУЭ
2018	264	232	2		24	6	0,88
2019	312	269	6		28	9	0,86
2020	290	255	1		26	8	0,88
2021	332	302	1		22	7	0,91
2023	367	289	13	48	13	4	0,79
2024	3243	2492	74	447	128	102	0,77

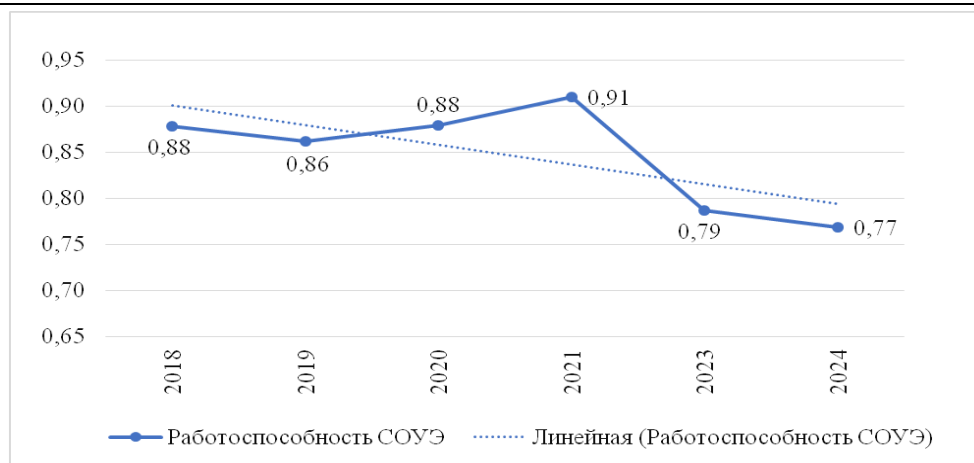


Рис. 1. Работоспособность СОУЭ в период 2018–2024 гг.

Несмотря на то что методика расчета пожарного риска [7] учитывает влияние параметров эвакуации людей на величину ИПР, характеристики СОУЭ в ней представлены в обобщенном виде и, как правило, задаются нормативно. Такой подход не позволяет отразить реальное качество функционирования СОУЭ и их фактическое влияние на временные параметры эвакуации и ее успешного завершения. В условиях выявленной статистической нестабильности работы СОУЭ это приводит к снижению чувствительности расчетной модели ИПР к реальным условиям эксплуатации объекта и требует принципиально новых подходов к построению СОУЭ на основе новых информационных технологий (НИТ) и, в частности, технологии.

В последние годы развитие технологий интернета вещей (Internet of Things, IoT) обусловило появление модульных СОУЭ, реализуемых на основе динамичной архитектуры, собирать данные в режиме реального времени и адаптировать алгоритмы управления к текущей обстановке [8, 9]. Масштабирование IoT-инфраструктуры подтверждается отраслевой аналитикой: согласно данным IoT Analytics число подключенных IoT-устройств увеличилось с 10,0 млрд в 2019 г. до 16,6 млрд в 2023 г., а к 2030 г. прогнозируется превышение 40 млрд подключений [10]. Для задач пожарной безопасности это означает расширение технических предпосылок для применения распределенных сенсоров, локальной обработки данных, цифровой связи и адресного управления эвакуацией.

Анализ зарубежных публикаций показывает, что исследования IoT-ориентированной эвакуации развиваются по трем взаимосвязанным направлениям: получение данных о пожарной обстановке и людских потоках в реальном времени; построение адаптивных алгоритмов выбора безопасных маршрутов; интеграция сенсорных данных с BIM/цифровыми двойниками для поддержки принятия решений [11–18].

Первое направление связано с переходом от статических планов эвакуации к маршрутизации на основе актуальной информации о задымлении, температуре, доступности участков и плотности потоков. В работах [12, 13] показано, что IoT-инфраструктура позволяет учитывать состояние среды и характеристики людей при выборе маршрута, что повышает применимость адаптивного управления в сложных многоэтажных зданиях. Развитие этой линии представлено в работах Н.-Н. Yen и соавторов: предложены алгоритмы индивидуальной эвакуации с учетом дыма и групповой эвакуации с учетом заторов, а также механизм динамического управления эвакуационными указателями по данным датчиков дыма и температуры [14, 15].

Второе направление связано с применением цифровых двойников и семантических моделей для интеллектуального управления системами противопожарной защиты. В исследованиях L. Jiang и соавторов, T. Zhang и соавторов, Y. Ding и соавторов показано, что объединение BIM, IoT-сенсоров, компьютерного зрения и моделей пожара обеспечивает виртуально-физическую синхронизацию объекта, распознавание развития пожара и мониторинг движения эвакуируемых [15–17]. Для крупных общественных зданий Y.J. Kim и соавторы

предложили систему пожарного аварийного управления на основе информативного цифрового двойника, в которой оценка потенциального риска используется для передачи информации о безопасных зонах и путях выхода [18].

При этом большинство зарубежных работ направлено на повышение точности обнаружения, адаптивность маршрутизации и информационную поддержку эвакуации, но не решает задачу нормативно совместимого включения таких характеристик в расчет индивидуального пожарного риска по российской методике [7]. Следовательно, сохраняется научно-практический разрыв между технологическими возможностями IoT-СОУЭ и формализованной расчетной схемой ИПР, что определяет необходимость разработки специального метода учета характеристик модульной СОУЭ на основе технологии интернета вещей.

Таким образом, возникает противоречие между возможностями современных модульных систем оповещения и управления эвакуацией на основе IoT и статическим характером параметров, используемых в методике расчета ИПР [8]. Разрешение данного противоречия требует разработки метода учета характеристик таких систем в расчетной схеме ИПР, без разрушения логики и нормативной основы действующей методики.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью повышения достоверности оценки ИПР за счет учета реальных условий функционирования СОУЭ. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного метода при обосновании проектных решений, оценке эффективности СОУЭ и управлении пожарными рисками на объектах с массовым пребыванием людей. Научная новизна исследования состоит в разработке подхода к формализованному учету динамических характеристик модульной СОУЭ на основе технологии интернета вещей в рамках методики расчета ИПР.

Методы исследования

В работе применен комплекс методов, обеспечивающих прослеживаемость перехода от нормативной расчетной схемы ИПР к формализованному учету измеряемых характеристик модульной СОУЭ на основе технологии интернета вещей.

Объект исследования – процесс эвакуации людей при пожаре в зданиях и (или) пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности. Предмет исследования – расчетная схема определения ИПР и параметры, через которые в нее может быть корректно интегрировано влияние модульной СОУЭ.

В качестве исходной нормативной основы использованы действующая методика определения расчетных величин пожарного риска и ранее действовавшая методика.

Для выявления мест интеграции параметров модульной СОУЭ в расчет ИПР выполнен структурный анализ расчетного алгоритма:

- задание исходных данных;
- моделирование развития пожара (ОФП);
- определение времени блокирования путей эвакуации;
- моделирование эвакуации;
- оценка вероятности безопасной эвакуации;
- расчет ИПР.

Далее проведено сопоставление методик расчета ИПР по тем элементам, которые непосредственно связаны с эвакуацией и исходными данными расчета.

Для обоснования необходимости совершенствования учета СОУЭ выполнена обработка статистических данных о работоспособности/срабатываниях СОУЭ. В качестве процедур обработки использованы статистика Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России [6].

Для определения времени наступления предельных значений ОФП на путях эвакуации (времени блокирования) использовано моделирование развития пожара с применением полевой модели PyroSim (FDS), реализующей расчет течений, переноса тепла и дыма и применяемой в инженерных задачах пожарной безопасности.

Результатами моделирования являются временные зависимости параметров среды на контрольных участках путей эвакуации, используемые далее для определения времени блокирования и для согласования с эвакуационной моделью.

Для расчета времени эвакуации и оценки влияния управленческих воздействий (оповещение, маршрутизация, перераспределение потоков, ограничение/разрешение проходов) применена агентно-ориентированная модель эвакуации Pathfinder. В модели задавались геометрия эвакуационных путей, параметры контингента (профили людей), поведенческие сценарии и условия изменения доступности путей.

Расчет выполнялся для набора расчетных сценариев, отличающихся: локализацией очага и динамикой развития пожара, составом и плотностью контингента, состояниями работоспособности СОУЭ (штатная работа/частичный отказ/задержка оповещения). Для оценки вклада характеристик СОУЭ применен анализ чувствительности выходного показателя ИПР к изменению параметров, связанных с оповещением и управлением эвакуацией: задержка начала эвакуации, доля оповещенных, устойчивость каналов доставки сообщения, изменение доступности маршрутов и управляемость потоков.

Предложенный метод основан на преобразовании измеряемых характеристик модульной СОУЭ в параметры, используемые в расчетном алгоритме ИПР по методике [7]. К таким характеристикам отнесены:

- временные параметры оповещения (включая задержку обнаружения/инертности формирования сообщения/доставки и реакции);
- показатели надежности (вероятность работоспособного запуска и доставки оповещения),
- показатели адресности и адаптивности управления (влияние на распределение потоков и исключение небезопасных маршрутов).

Модификация традиционной схемы расчета заключалась в введении процедур корректировки входных параметров эвакуационного блока и вероятностных характеристик с сохранением общей структуры расчета и ее нормированного порядка применения.

Для обеспечения воспроизводимости хода исследования использовались стандартные программные средства моделирования пожара и эвакуации (PyroSim и Pathfinder) с фиксацией исходных данных, сценариев и настроек моделирования; расчетные результаты анализировались в виде временных рядов ОФП, распределений времени эвакуации и интегральных показателей (время блокирования, время эвакуации, вероятность безопасной эвакуации, итоговая величина ИПР).

Результаты и их обсуждение

Одним из ключевых направлений интеграции IoT-СОУЭ [8] в методику расчета ИПР является выявление и структурирование тех параметров, которые оказывают наибольшее влияние на результирующую величину.

$$R_{i,j} = Q_{п,i} \cdot (1 - K_{ап,i}) \cdot P_{пр,i} \cdot (1 - P_{э,i,j}) \cdot (1 - K_{пэ,i}), \quad (1)$$

где $Q_{п,i}$ – частота возникновения пожара в здании в течение года; $K_{ап,i}$ – коэффициент, учитывающий соответствие установок автоматического пожаротушения требованиям нормативных документов по пожарной безопасности; $P_{пр,i}$ – вероятность присутствия эвакуируемого контингента в здании (рассматриваемой части здания); $P_{э,i,j}$ – вероятность эвакуации людей j -й группы эвакуируемого контингента в общем потоке эвакуирующихся при реализации i -го сценария пожара; $K_{пэ,i}$ – коэффициент, учитывающий соответствие системы противопожарной защиты, направленной на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре, требованиям нормативных документов по пожарной безопасности.

Сравнительный анализ основных параметров методики [7] и того, как они могут быть уточнены или улучшены при использовании IoT-систем, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная таблица параметров расчета пожарного риска

№ п/п	Параметр	Традиционный подход	IoT-ориентированный подход	Эффект интеграции IoT
1.	$Q_{п,i}$ – частота пожара	Статистика, усредненные значения	Сбор данных с сенсоров (тепловых, дымовых, утечек, КЗ и пр.)	Уточнение вероятности и профиля рисков*
2.	$P_{пр,i}$ – вероятность присутствия людей в здании	По графику эксплуатации: $P_{пр,i} = \frac{t_{пр,i}}{24}$	Расчет на основе Wi-Fi – трекинга, видеонаблюдения, счетчика людей [19, 20]	Учет реального числа людей в здании и вычисление точного значения вероятности их присутствия
3.	$P_{э,i,j}$ – вероятность эвакуации людей	Расчет по сценариям	Уточненные вычисления $t_{эл,i}, t_{эз,i,j}, t_p, t_{ск,i,j}$ через IoT-данные и адаптивные алгоритмы	Более точная оценка возможности успешной эвакуации
4.	$t_{эз,i,j}$ – время начала эвакуации	По нормативной документации: $t_{эз,i,j} = t_{пор} + t_{инерц}^{обн} + t_{задерж}^{COУЭ} + t_{предв}$	На основе быстрого обнаружения интеллектуальной системы обнаружения пожара [21] и системы IoT	Снижение задержек начала эвакуации
5.	t_p – расчетное время эвакуации людей	По моделям движения	Уточнение расчета с учетом маршрутов SGEP, SIEP [11]	Оптимизация эвакуации с учетом плотности, препятствий и блокирования путей эвакуации
6.	$t_{эл,i}$ – блокировка путей эвакуации	С помощью инструментов моделирования пожара (Fire Dynamic Simulator – FDS)	Данные от IoT сенсоров токсичности, температуры и дыма и edge-расчет времени достижения критических значений ОФП [8]	Реалистичное моделирование критических условий во времени
7.	$K_{п.э,i}$ – соответствие системам противопожарной защиты (СПЗ)	По нормативной документации	Введение коэффициента K_{IoT} , отражающего интеллектуальные возможности системы (формула (2))	Учет адаптивности и автоматизации системы

Примечание: * Профиль рисков – это многоуровневая модель пожарного риска, основанная на динамической и детализированной картине изменения уровня индивидуального пожарного риска на объекте в зависимости от времени, зон, условий эксплуатации и поведенческих факторов, приведенного в табл. 2.

Подробнее о том, как модульная СОУЭ на основе технологии интернета вещей влияет на расчет ИПР, может свидетельствовать внедрение коэффициента адаптивности IoT-СОУЭ (K_{IoT}) в расчет коэффициента, учитывающего соответствие системы противопожарной защиты, направленной на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре, требованиям нормативных документов по пожарной безопасности ($K_{п.э,i}$):

$$K_{п.э,i} = 1 - (1 - K_{обн,i}(t) \cdot K_{COУЭ,i}(t) \cdot (\alpha \cdot K_{IoT})) \cdot (1 - K_{обн,i}(t) \cdot K_{пдз,i}(t)) , \quad ! \quad (2)$$

где K_{IoT} – коэффициент адаптивности IoT-системы. Оценка в диапазоне от 0 до 1 на основе наличия сенсоров в ключевых точках, времени реакции системы, возможности адаптации маршрутов, степени автоматизации принятия решений; α – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние IoT-системы на эффективность пассивной защиты, предлагаемый в пределах 0,1–0,3 (чем выше, тем больше влияние IoT).

Таблица 3

Профиль индивидуального пожарного риска

Зона	Время	$R_{i,j}$	Причина
Холл	18:00	$3,2 \cdot 10^{-4}$	Скопление людей, неисправно речевое оповещение
Кладовая	03:00	$1,2 \cdot 10^{-5}$	Пожароопасное оборудование
Технический этаж	12:00	$2,4 \cdot 10^{-4}$	Повышенная температура, неисправна АУП
Кинозал №1	20:00	$4 \cdot 10^{-5}$	Скопление людей

Для повышения точности вычисления модели предлагается дополнить формулу (1) методики расчета пожарного риска зависимостью от времени и рядом следующих изменений:

$$R_{i,j}(t) = Q_{п,i}(t) \cdot (1 - K_{ап,i}(t)) \cdot P_{пр,i}(t) \cdot (1 - P_{э,i,j}(t)) \cdot (1 - K_{пэ,i}(t)) \quad \#(3)$$

Каждый коэффициент может быть скорректирован на основе IoT, например:

$Q_{п,i}(t)$ – частота возникновения пожара на объекте i в момент времени t может быть скорректирована на основе данных от IoT-датчиков (например, повышение температуры, утечка газа, короткие замыкания и т.п.) и профиля рисков;

$K_{ап,i}(t)$ – коэффициент, учитывающий соответствие установок автоматического пожаротушения требованиям нормативных документов по пожарной безопасности. Может быть скорректирован за счет непрерывного мониторинга работоспособности АУП, раннего обнаружения пожара, анализа временных характеристик срабатывания АУП (время обнаружения, время активации, время подачи огнетушащих веществ). А также на основании статистических данных за предыдущие годы (табл. 4, рис. 3);

$P_{пр,i}(t)$ – вероятность присутствия эвакуируемого контингента в здании, определяемая на основе данных по Wi-Fi-трекингу, счетчику людей при входе, видеонаблюдению;

$P_{э,i,j}(t)$ – вероятность эвакуации людей мониторингом поведения людей в реальной обстановке, учитывающая скорость реакции, ориентацию в пространстве, склонность к панике и физические возможности;

$K_{пэ,i}(t)$ – коэффициент, учитывающий соответствие системы противопожарной защиты: АУП, СОУЭ, противодымной вентиляции, контролируемой через сенсоры, телеметрию и цифровые интерфейсы.

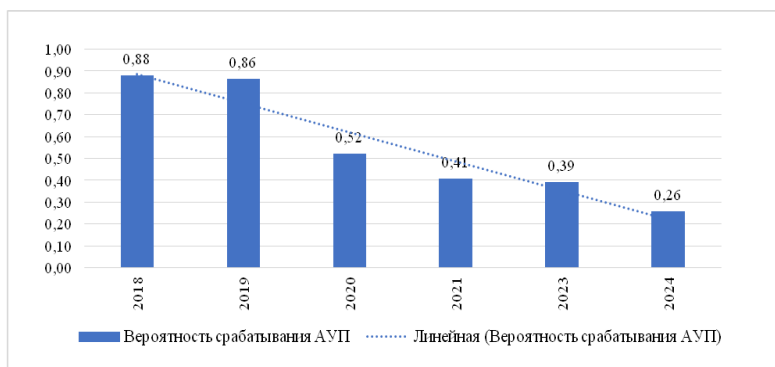


Рис. 3. Работоспособность АУП в период 2018–2024 гг.

Таблица 4

Состояние и функционирование АУП

Год	Всего	Сработала, пожар потушила	Сработала, подала огнетушащие вещества в очаг пожара, пожар не потушила	Сработала и подала огнетушащие вещества все очага пожара	Исправна, но не сработала вследствие недостижения порога срабатывания	Неисправна	Не включена	Работоспособность АУП
2018	264	232	25			11	4	0,88
2019	312	269	34			6	4	0,86
2020	100	52	31			10	7	0,52
2021	152	62	38			12	40	0,41
2023	141	55	30	9	37	7	3	0,39
2024	248	64	62	35	77	7	4	0,26

Согласно анализу данных из [6], можно сделать вывод, что работоспособность АУПТ в 2024 г. сводится к 0,26. Что свидетельствует о том, что АУПТ в большей части не выполняет своего основного назначения и коэффициент о соответствии АУПТ нормативным документам по пожарной безопасности ($K_{\text{ап},i}$) требует корректировки.

Проведенный анализ и предложенные решения позволяют утверждать, что методика расчета ИПР может и должна быть адаптирована к новым возможностям. Применение IoT позволяет перейти от разовой оценки риска к непрерывному расчету, реагирующему на изменения обстановки в режиме реального времени.

Заключение

В работе решена научно-практическая задача формализованного учета характеристик модульной СОУЭ, построенной на основе технологии IoT, при определении ИПР в рамках действующей методики. Показано, что при всей методологической зрелости риск-ориентированного подхода практическая применимость расчета ИПР ограничивается статическим характером ряда ключевых параметров, прежде всего связанных с эвакуацией и фактическим функционированием систем противопожарной защиты, что снижает чувствительность расчетной модели к реальным условиям функционирования объекта.

Предложенный метод основан на преобразовании измеряемых характеристик модульной СОУЭ в параметры, используемые в алгоритме расчета ИПР, с акцентом на три группы показателей:

– временные параметры оповещения и начала эвакуации (включая задержки обнаружения, формирования/доставки сообщения и реакции людей);

- показатели надежности (вероятность работоспособного запуска и доставки сигналов оповещения);
- показатели адресности и адаптивности управления эвакуацией (влияние на перераспределение потоков и исключение небезопасных маршрутов).

При этом принципиально важно, что модернизация реализована не через замену нормативной схемы расчета, а через введение процедур корректировки входных параметров эвакуационной части и вероятностных характеристик при сохранении общей структуры и порядка применения методики.

Дополнительно предложена возможность учитывать временную неоднородность риска через профиль риска (зоны/время/причины) и введение временной зависимости в расчет (как способ связать расчет ИПР с изменяющимися режимами эксплуатации и состояниями систем), а также использовать коэффициент адаптивности IoT-COУЭ (в диапазоне 0–1) и эмпирический коэффициент α (влияние модульной системы на эффективность пассивной защиты (0,1–0,3) как формализованные рычаги отражения «интеллектуальных» возможностей системы в составе параметров, характеризующих соответствие и эффективность СПЗ.

Предложенный метод создает единый «нормативно совместимый» механизм включения параметров IoT-COУЭ в расчет ИПР и тем самым открывает возможность перехода от разовой расчетной оценки к более динамичному, риск-ориентированному расчету риска, реагирующему на изменение обстановки и состояния систем в реальном времени, что особенно актуально для современных объектов.

Список источников

1. Чистякова А.А., Прус М.Ю. Поддержка риск-ориентированного управления пожарной безопасностью в жилом секторе на основе анализа структуры пожарных рисков // Технологии техносферной безопасности. 2024. № 2 (104). С. 112–137. EDN GULAKE. DOI: 10.25257/TTS.2024.2.104.112-137
2. Сулейменова Р.Д., Болотина Е.В. Оценка пожарных рисков, методы расчета и ключевые факторы, влияющие на уровень риска // Актуальные вопросы обеспечения комплексной безопасности: материалы национальной науч.-практ. конф. с международным участием, посвященной 35-летию МЧС России и 95-летию Оренбургского ГАУ. Оренбург: Оренбургский государственный аграрный университет, 2025. С. 211–215. EDN AWWIRP.
3. Мельников Г.О., Синещук Ю.И. Современные подходы к эвакуации из зданий: роль IoT и 5G технологий // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы: материалы Междунар. форума. СПб.: Санкт-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2024. С. 74–78. EDN JEXLPC.
4. Будыкина Т.А., Ляшенко С.М., Федотов С.Б. Оценка пожарной опасности объекта образования на основе термического анализа и определения расчетных величин пожарного риска // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (57). С. 26–38. EDN IEYXZX.
5. Кочнов О.В. Оценка эффективности речевых систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Казань: ООО «Бук», 2025. 250 с. EDN LFXZJD.
6. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствий: информ.-аналит. сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. 112 с.
7. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности: приказ МЧС России от 21 сент. 2021 г. № 1140. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Мельников Г.О., Синещук Ю.И. Модульная модель системы оповещения и управления эвакуацией людей на основе технологии IOT // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 4 (76). С. 182–200. EDN RSLCQX. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-182-200
9. Москвина Н.В. Преимущества использования цифровой платформы для подключения устройств «Интернета вещей» при предупреждении и ликвидации

происшествий и ЧС // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия, 2021. С. 370–375. EDN BWFBPU.

10. IoT Analytics. State of IoT Summer 2024: Number of connected IoT devices growing 13 % to 18,8 billion globally. 2024. URL: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> (дата обращения: 04.05.2026).

11. Yen H.-H., Lin C.-H., Tsao H.-W. Novel Smoke-Aware Individual Evacuation and Congestion-Aware Group Evacuation Algorithms in IoT-Enabled Multi-Story Multi-Exit Buildings // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 119402–119418. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3221757

12. Fang H., Lo S., Lo J.T.Y. Building Fire Evacuation: An IoT-Aided Perspective in the 5G Era // Buildings. 2021. Vol. 11. № 12. Article 643. DOI: 10.3390/buildings11120643

13. A Fire Evacuation and Control System in Smart Buildings Based on the Internet of Things and a Hybrid Intelligent Algorithm / A. Mohammadiounotikandi [et al.] // Fire. 2023. Vol. 6. № 4. Article 171. DOI: 10.3390/fire6040171

14. Yen H.-H., Lin C.-H. Intelligent Evacuation Sign Control Mechanism in IoT-Enabled Multi-Floor Multi-Exit Buildings // Sensors. 2024. Vol. 24. № 4. Article 1115. DOI: 10.3390/s24041115

15. Jiang L., J. Shi C., Wang Z. Pan Intelligent control of building fire protection system using digital twins and semantic web technologies // Automation in Construction. 2023. Vol. 147. Article 104728. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104728

16. Building Artificial-Intelligence Digital Fire (AID-Fire) system: A real-scale demonstration / T. Zhang [et al.] // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 62. Article 105363. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105363

17. Ding Yu., Zhang Yu., Huang X. Intelligent emergency digital twin system for monitoring building fire evacuation // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 77. Article 107416. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107416

18. Advanced fire emergency management based on potential fire risk assessment with informative digital twins / Yu.J. Kim [et al.] // Automation in Construction. 2024. Vol. 167. Article 105722. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105722

19. Интеллектуальная система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре объектов с массовым пребыванием людей на основе BIM-моделирования / Г.А. Лазарев [и др.] // Научный журнал. 2022. № 2 (64). С. 21–29. EDN QTDIOF.

20. Интеллектуальная система оповещения и управления эвакуацией людей на объектах защиты с применением BIM-моделирования / Г.Л. Шидловский [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXI Междунар. науч.-практ. конф. М.: Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2019. С. 597–599. EDN BNFAOV.

21. Доронин А.С. Обоснование и разработка прототипа устройства на основе искусственного интеллекта для распознавания пожара: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2025. 166 с.

References:

1. Chistyakova A.A., Prus M.Yu. Podderzhka risk-orientirovannogo upravleniya pozharnoj bezopasnost'yu v zhilom sektore na osnove analiza struktury pozharnyh riskov // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2024. № 2 (104). S. 112–137. EDN GULAKE. DOI: 10.25257/TTS.2024.2.104.112-137

2. Sulejmenova R.D., Bolotina E.V. Ocenka pozharnyh riskov, metody rascheta i klyuchevye faktory, vliyayushchie na uroven' riska // Aktual'nye voprosy obespecheniya kompleksnoj bezopasnosti: materialy nacional'noj nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 35-letiyu MCHS Rossii i 95-letiyu Orenburgskogo GAU. Orenburg: Orenburgskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2025. S. 211–215. EDN AWVIRP.

3. Mel'nikov G.O., Sineshchuk Yu.I. Sovremennyye podhody k evakuacii iz zdaniy: rol' IoT i 5G tekhnologij // *Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy: materialy Mezhdunar. foruma*. SPb.: Sankt-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2024. S. 74–78. EDN JEXLPC.
4. Budykina T.A., Lyashenko S.M., Fedotov S.B. Ocenka pozharnoj opasnosti ob"ekta obrazovaniya na osnove termicheskogo analiza i opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska // *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity*. 2023. № 2 (57). S. 26–38. EDN IEYXZX.
5. Kochnov O.V. Ocenka effektivnosti rechevyh sistem opoveshcheniya i upravleniya evakuaciej lyudej pri pozhare. Kazan': OOO «Buk», 2025. 250 s. EDN LFXZJD.
6. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2024 g. Statistika pozharov i ih posledstvij: inform.-analit. sb. Balashiha: FGBU VNIPO MCHS Rossii, 2025. 112 s.
7. Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska v zdaniyah, sooruzheniyah i pozharnyh otsekah razlichnyh klassov funkcional'noj pozharnoj opasnosti: prikaz MCHS Rossii ot 21 sent. 2021 g. № 1140. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».
8. Mel'nikov G.O., Sineshchuk Yu.I. Modul'naya model' sistemy opoveshcheniya i upravleniya evakuaciej lyudej na osnove tekhnologii IOT // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2025. № 4 (76). S. 182–200. EDN RSLCQX. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-182-200
9. Moskvina N.V. Preimushchestva ispol'zovaniya cifrovoj platformy dlya podklyucheniya ustroystv «Interneta veshchej» pri preduprezhdenii i likvidacii proisshestvij i CHS // *Aktual'nye problemy obespecheniya pozharnoj bezopasnosti i zashchity ot chrezvychajnyh situacij: sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. ZHeleznogorsk: Sibirskaya pozharno-spasatel'naya akademiya*, 2021. S. 370–375. EDN BWFBPU.
10. IoT Analytics. State of IoT Summer 2024: Number of connected IoT devices growing 13 % to 18,8 billion globally. 2024. URL: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> (data obrashcheniya: 04.05.2026).
11. Yen H.-H., Lin C.-H., Tsao H.-W. Novel Smoke-Aware Individual Evacuation and Congestion-Aware Group Evacuation Algorithms in IoT-Enabled Multi-Story Multi-Exit Buildings // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 119402–119418. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3221757
12. Fang H., Lo S., Lo J.T.Y. Building Fire Evacuation: An IoT-Aided Perspective in the 5G Era // *Buildings*. 2021. Vol. 11. № 12. Article 643. DOI: 10.3390/buildings11120643
13. A Fire Evacuation and Control System in Smart Buildings Based on the Internet of Things and a Hybrid Intelligent Algorithm / A. Mohammadiounotikandi [et al.] // *Fire*. 2023. Vol. 6. № 4. Article 171. DOI: 10.3390/fire6040171
14. Yen H.-H., Lin C.-H. Intelligent Evacuation Sign Control Mechanism in IoT-Enabled Multi-Floor Multi-Exit Buildings // *Sensors*. 2024. Vol. 24. № 4. Article 1115. DOI: 10.3390/s24041115
15. Jiang L., J. Shi C., Wang Z. Pan Intelligent control of building fire protection system using digital twins and semantic web technologies // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 147. Article 104728. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104728
16. Building Artificial-Intelligence Digital Fire (AID-Fire) system: A real-scale demonstration / T. Zhang [et al.] // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 62. Article 105363. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105363
17. Ding Yu., Zhang Yu., Huang X. Intelligent emergency digital twin system for monitoring building fire evacuation // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 77. Article 107416. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107416
18. Advanced fire emergency management based on potential fire risk assessment with informative digital twins / Yu.J. Kim [et al.] // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 167. Article 105722. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105722
19. Intellektual'naya sistema opoveshcheniya i upravleniya evakuaciej lyudej pri pozhare ob"ektov s massovym prebyvaniem lyudej na osnove BIM-modelirovaniya / G.A. Lazarev [i dr.] // *Nauchnyj zhurnal*. 2022. № 2 (64). S. 21–29. EDN QTDIOF.
20. Intellektual'naya sistema opoveshcheniya i upravleniya evakuaciej lyudej na ob"ektah zashchity s primeneniem BIM-modelirovaniya / G.L. SHidlovskij [i dr.] // *Aktual'nye problemy*

pozharnoj bezopasnosti: materialy XXHI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. M.: Vserossijskij ordena «Znak Pocheta» nauchno-issledovatel'skij institut protivopozharnoj oborony Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situacijam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij, 2019. S. 597–599. EDN BNFAOV.

22. Doronin A.S. Obosnovanie i razrabotka prototipa ustrojstva na osnove iskusstvennogo intellekta dlya raspoznavaniya pozhara: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2025. 166 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 30.03.2026; одобрена после рецензирования: 16.04.2026; принята к публикации: 03.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 30.03.2026; approved after review: 16.04.2026; accepted for publication: 03.05.2026

Информация об авторе:

Мельников Григорий Олегович, адъюнкт кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: grinyam@list.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8459-7317>, SPIN-код: 6971-4886

Information about the author:

Melnikov Grigory O., associate professor of the department of fire safety of buildings and automated fire extinguishing systems of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: grinyam@list.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8459-7317>, SPIN: 6971-4886

АВТОРАМ ЖУРНАЛА

«ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В ТЕХНОСФЕРЕ»

К публикации принимаются оригинальные исследовательские и обзорные аналитические статьи, отвечающие профилю журнала, представляющие результаты заверченного научного исследования, выполненного на актуальную тему, обладающие научной новизной, имеющие практическое значение и теоретическое обоснование, оформленные в соответствии с требованиями.

Статья не должна быть ранее опубликованной и не поданной для рассмотрения в другие журналы. Все статьи проходят проверку в системе «Антиплагиат».

Статьи **обучающихся магистратуры, курсантов и студентов** принимаются **только в соавторстве с научным руководителем**.

1. Материалы для публикации представляются в редакцию журнала. Материал должен сопровождаться:

а) для **сотрудников** СПб университета ГПС МЧС России – *заклучением* об отсутствии материалов, запрещенных к публикации в открытой печати, *рецензией от члена редакционного совета* (коллегии). По желанию прилагается вторая рецензия от специалиста соответствующего профиля, имеющего ученую степень;

б) для авторов **сторонних** организаций – *заклучением* об отсутствии материалов, запрещенных к публикации в открытой печати, *рецензией* от специалиста по соответствующему статье профилю, имеющему ученую степень;

в) статья аспиранта (адъюнкта) или соискателя помимо вышеуказанных документов должна сопровождаться *отзывом научного руководителя*;

г) *электронной версией* статьи, представленной в формате редактора Microsoft Word (версия не ниже 2003). Название файла должно быть следующим:

Автор1, Автор2 – Первые три слова названия статьи.doc, например: **Иванов – Анализ существующей практики.doc**;

д) *плата* за публикацию не взимается.

2. Текст статьи (без учета аннотации, ключевых слов, списка источников) должен иметь объем не менее 10 страниц

3. Оригинальность статей должна быть **не менее 70 %**.

4. Текст статьи должен быть **обязательно структурирован по разделам**:

Введение

В разделе «Введение» проводится анализ состояния исследуемой проблемы по публикациям отечественных и зарубежных источников, на основании которого обосновывается актуальность исследования, формулируются цель и задачи исследования.

Методы исследования

В разделе описываются применяемые в работе методы исследования, приводятся сведения об объектах исследования, измерительном оборудовании, описываются условия экспериментов и т.д. Возможно указание ссылок на работы с более подробным изложением методов, однако приводимого описания должно быть достаточно для понимания хода исследования.

При использовании стандартных (или известных) методов и процедур лучше сделать ссылки на соответствующие источники, не забывая описать модификации стандартных

методов, если таковые имелись. Если же используется собственный новый метод, описание которого нигде ранее не было опубликовано, важно привести все необходимые детали. Если ранее описание метода было опубликовано в известном журнале, можно ограничиться ссылкой.

Допускается и иное название раздела, обусловленное спецификой исследования и подготовленной на его основе статьи, например «Материалы и методы исследования», «Модели и методы исследования», «Теоретические основы и методы расчета».

Результаты исследования и их обсуждение

В разделе в логической последовательности излагаются результаты исследования, которые подтверждаются таблицами, графиками, рисунками. Здесь же проводится анализ и интерпретация полученных результатов, описываются выявленные закономерности, подтверждается достоверность результатов, проводится сопоставление собственных результатов с данными других исследователей.

Заключение

В разделе излагаются основные выводы, подводится итог проделанной работы, обосновывается научная новизна полученных результатов, приводятся научно обоснованные рекомендации по их использованию, определяются основные направления дальнейших исследований в данной области.

Заключение содержит главные идеи основного текста статьи, но не должно повторять формулировок, приведенных в предыдущих разделах.

Список литературы должен содержать **не менее 10 источников** (из которых **не менее 30 % зарубежных**).

Для ОБЗОРНЫХ аналитических статей допускается иная структура статьи:

1. Введение.
2. Аналитическая часть.
3. Заключение.

В разделе «Аналитическая часть» должен быть представлен критический анализ и критическое обобщение актуальной исследовательской проблемы по отечественным и зарубежным научным источникам (**не менее 25 источников**, из которых **не менее 50 % зарубежных**) с оценкой их научной новизны и оригинальности. Результаты критического анализа и обобщения рекомендуется подтверждать сравнительными таблицами, графиками, рисунками. В статье также должны быть отражены дискуссионные (проблематичные) вопросы.

Допускается разбиение разделов «Методы исследования», «Результаты исследования и их обсуждение», «Аналитическая часть» на несколько логически связанных подразделов.

5. Оформление текста:

а) текст материала для публикации должен быть тщательно отредактирован автором;
б) текст на одной стороне листа формата А4 набирается на компьютере (шрифт – Times New Roman 14, **интервал 1,5**, без переносов, в одну колонку, **все поля по 2 см**, нумерация страниц внизу посередине);

в) на первой странице авторского материала должны быть напечатаны: тип статьи (научная, обзорная, редакционная, дискуссионная, рецензия и т.п.), УДК (универсальная десятичная классификация), **на русском и английском языках** название (прописными буквами, полужирным шрифтом, без подчеркивания); ФИО авторов полностью (**не более трех**); место работы (название учреждения), электронный адрес авторов (без слова e-mail), аннотация, ключевые слова.

Требования к аннотации. Аннотация должна быть краткой, информативной, содержать цель работы, методы исследования, основные положения и результаты исследования (излагаются основные результаты теоретических и/или экспериментальных исследований, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности), выводы с обоснованием научной новизны результатов. Аннотация может включать и другую

информацию, уместную с точки зрения авторов, например, рекомендации по применению полученных результатов. Примерный объем аннотации **100–250 слов**.

6. Оформление формул в тексте:

а) формулы должны быть набраны на компьютере в редакторе формул Microsoft Word (Equation), размер шрифта эквивалентен 14 (Times New Roman);

б) в формулах рекомендуется использовать буквы латинского и греческого алфавитов (курсивом);

в) формулы печатаются по центру, номер – у правого поля страницы (нумеровать следует только формулы, упоминаемые в тексте).

7. Оформление рисунков и таблиц:

а) рисунки необходимо выделять отдельным блоком для удобства переноса в тексте или вставлять из файла, выполненного в любом из общепринятых графических редакторов, под рисунком ставится: «Рис. 2.», и далее следуют пояснения;

б) если в тексте не одна таблица, то их следует пронумеровать (сначала пишется: Таблица 2 (выравнивание по правому краю листа), ниже, отступив одну строку, – название таблицы (полуторно, выравнивание по центру листа), и далее, отступив одну строку, следует разместить саму таблицу);

в) если в тексте одна таблица или один рисунок, то их нумеровать не следует;

г) таблицы должны иметь «вертикальное» построение;

д) в тексте ссылки на таблицы и рисунки делаются следующим образом: рис. 2, табл. 4, если всего один рисунок или одна таблица, то слово пишется целиком: таблица, рисунок.

8. Оформление библиографии (списка источников):

Список литературы должен содержать **не менее 10 источников**, для *обзорных* аналитических статей **не менее 25 источников**, должен быть представлен преимущественно периодической литературой не старше 10 лет.

При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 30 % от общего количества ссылок, для обзорных аналитических статей не менее 50 % .

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Правила оформления списка источников:

а) в тексте ссылки на цитируемую литературу обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках;

б) список должен содержать цитируемую литературу, пронумерованную в порядке ее упоминания в тексте.

в) цитируемая литература должна сопровождаться **кодами DOI**.

Пристаейные библиографические списки должны соответствовать ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Примеры оформления списка источников:

Список источников

1. Ложкина О.В., Мальчиков К.Б. Сравнительный анализ пробеговых выбросов автомобилей на различных видах топлива при дорожных заторах // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 2 (103). С. 133–143. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-2-133-143.

2. Боркова Е.А., Голубятникова М.В., Григорьян А.Н. Мультипликатор и инвестиции в современной России в контексте стимулирования экономического развития в условиях санкций // Экономика и управление. 2024. Т. 30. № 6. С. 677–685. DOI: 10.35854/1998-1627-2024-6-677-685.

3. Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires / G.E. Scarponi [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2018. Vol. 118. P. 251–270. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.013.

4. Östman B., Boström L. Fire Protection Ability of Wood Coverings // Fire Technol. 2015. № 51. P. 1475–1493. DOI: 1007/s10694-014-0452-z.

5. Повышение огнестойкости деревянных конструкций путем применения огнебиозащитных пропиточных составов / О.В. Арцыбашева [и др.] // Полимерные материалы пониженной горючести: материалы VIII Междунар. конф. Алматы: Казахский нац. ун-т им. Аль-Фараби, 2017. С. 248–251.

6. Моделирование волн давления при дефлаграционном горении облаков топливно-воздушных смесей / С.И. Сумской [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 1. С. 15–22. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-15-22.

7. Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз: пат. 2479005 Рос. Федерация / Г.К. Ивахнюк, В.Н. Матюхин, В.А. Клачков, А.О. Шевченко, А.С. Князев, К.Г. Ивахнюк, А.В. Иванов, В.А. Родионов. – № 2011118347/08; заявл. 21.01.2010; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.

8. Соловьев А.С. Математическое моделирование чрезвычайных ситуаций, связанных с зарождением и сходом снежных лавин: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2014. 287 с.

9. Медведев С.С., Рахимова Н.Н. Характеристика чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера Оренбургской области // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности: сб. материалов V Всерос. науч.-практ. конф. Оренбург, 2023. С. 160–164.

10. Григорьев С.Ю. Моделирование процессов конвективного перемешивания и пристеночного массообмена в задачах анализа водородной безопасности АЭС при тяжелой аварии: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2017. 22 с.

9. Оформление раздела «Информация об авторах».

Сведения об авторах прилагаются в конце статьи и включают: ФИО (полностью), должность, место работы с указанием адреса и его почтового индекса; номер телефона; ученую степень, ученое звание, почетное звание; адрес электронной почты; ORCID для каждого автора (<https://orcid.org/>); SPIN-код для каждого автора (elibrary.ru).

Статья должна быть подписана авторами, и указаны контактные телефоны.

Вниманию авторов: материалы, оформленные без соблюдения настоящих требований, будут возвращаться на доработку.

Редакция оставляет за собой право направлять статьи на дополнительное анонимное рецензирование.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 614.8

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТЫ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО ПОЖАРА

✉Иванов Сергей Петрович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉spi78@mail.ru

Аннотация. 100–250 слов

Ключевые слова: 3–10 слов

Для цитирования: Иванов С.П. Метод оценки эффективности огнезащиты стальных конструкций на объектах нефтегазового комплекса в условиях открытого пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 1 (61). С. 25–30. (ОФОРМЛЯЕТСЯ РЕДАКЦИЕЙ)

Scientific article

METHOD FOR ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF FIRE PROTECTION OF STEEL STRUCTURES ON OBJECTS OF OIL AND GAS COMPLEX IN CONDITIONS OF OPEN FIRE

✉Ivanov Sergey P.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉spi78@mail.ru

Abstract.

Keywords:

For citation: Ivanov S.P. Method for estimation of the efficiency of fire protection of steel structures on objects of oil and gas complex in conditions of open fire // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere* = *Problems of risk management in the technosphere*. 2022. № 1 (61). P. 25–30.

Введение

Текст, текст, текст

Методы исследования

Текст, текст, текст

Результаты исследования и их обсуждение

Текст, текст, текст

Заключение

Текст, текст, текст

Список источников (не менее 10 источников)

References

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 10.01.2022; одобрена после рецензирования: 03.02.2022;
принята к публикации: 11.02.2022

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 10.01.2022; approved after review: 03.02.2022;
accepted for publication: 11.02.2022

Информация об авторах:

Иванов Сергей Петрович, заместитель начальника научно-исследовательского института Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, e-mail: spi78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4651-8513>, SPIN-код: 0123-3210

Information about the authors:

Ivanov Sergey P., deputy head of the Research institute of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: spi78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4651-8513>, SPIN: 0123-3210

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева»

[16+]

Научно-аналитический журнал

Проблемы управления рисками в техносфере

№ 2 (78)–2026

Главный редактор

**Ложкина Ольга Владимировна, доктор технических наук,
кандидат химических наук, профессор**

Регистрационный орган: Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-36404 от 20 мая 2009 г.

Адрес редакции и издателя научно-аналитического журнала

«Проблемы управления рисками в техносфере»:

Россия, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»
телефон для справок: +7(812)645-20-35, e-mail: redakziaotdel@yandex.ru

Подписано в печать 10.07.2026
Печать цифровая

Вышел в свет 14.07.2026
Объем 34,5 п.л.
Свободная цена

Формат 60×84_{1/8}
Тираж 50 экз.

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149