

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Беззапонная О. В., Глухих П. А., Елфимова М. В., Макаркин С. В.

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ВТОРИЧНЫХ ОЧАГОВ ПОЖАРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА 5

Сысоева Т. П., Мокряк А. Ю., Мокряк А. В.

ПОСЛЕДСТВИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ НА РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА 21

Терентьев Д. И., Сатюков Р. С., Тикина И. В.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА ГОРЮЧИХ ГАЗОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 34

Галиахметов Э. А., Султанов Р. М., Хафизов Ш. И.

РАЗРАБОТКА СОСТАВА ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПИРОФОРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, СФОРМИРОВАВШИХСЯ В РЕЗЕРВУАРАХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЕРНИСТЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ 46

Сафаргалин А. Р., Хафизов И. Ф., Попова Е. В.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В СОСТАВЕ ПЕНООБРАЗУЮЩИХ СРЕДСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ 57

Тухбатулин М. Н., Тикина И. В., Цыганков М. С.

ОБЗОР ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДНЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ 63

Королев Д. С., Епифанов Е. Н., Кончаков С. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОТЕКАНИЯ ПОЖАРА НА ГИБРИДНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ЗАПРАВОЧНОЙ СТАНЦИИ 75

Баёв А. А., Шкуро А. Е., Пазникова С. Н.

ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТИ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ БРОМИРОВАННОЙ НОВОЛАЧНОЙ КАРДАНОЛЬНОЙ СМОЛОЙ 91

Харченко М. В., Хохлова А. Ю.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИ ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЮДЕЙ В УЧРЕЖДЕНИЯХ СОЦИАЛЬНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ 101

Мареев М. А., Баканов М. О., Гринченко Б. Б.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТАКТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ РУКОВОДИТЕЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА НА ОСНОВЕ ХРОНОМЕТРАЖА ПОЖАРОВ 115

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Логинов В. В., Терентьев В. В., Зубарев И. А.

АЛГОРИТМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЕДЕНИЯ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ 125

Калганова Н. В., Ильясов О. Р.

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ И СОЦИАЛЬНО ПРИЕМЛЕМЫХ УРОВНЕЙ РИСКА 134

Ткаченко Ю. А.

КОНЦЕПЦИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С СОЛНЕЧНЫМ ПИТАНИЕМ ДЛЯ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В ЗОНУ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ 144

Сергеев И. Ю., Батуро А. Н., Жернаков Д. В., Николаев Г. А., Амерханов Т. Р.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ ПОДГОТОВКИ НАСЕЛЕНИЯ К ДЕЙСТВИЯМ ПРИ УГРОЗЕ И ВОЗНИКНОВЕНИИ СЕЙСМОСОБЫТИЙ 155

Гарелина С. А., Скрынников А. Ю.

МЕТОДИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТА ЭКОНОМИКИ ...166

Чумак С. П., Балин Д. Н., Онищенко Ю. А., Кузнецова Т. Д.

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАЗБОРА ЗАВАЛОВ В УСЛОВИЯХ МАССОВЫХ РАЗРУШЕНИЙ 178

Шкерин А. Л.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИНТЕГРАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ И СЛАБОФОРМАЛИЗОВАННЫХ ДАННЫХ 188

Алексеева Е. И., Антонова И. И., Гумеров Т. Ю., Насырова Е. А.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОТРУДНИКОВ СПАСАТЕЛЬНЫХ СЛУЖБ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ 207

CONTENTS

FIRE SAFETY

Oksana V. Bezzaponnaya, Pavel A. Glukhikh, Marina V. Elfimova, Sergey V. Makarkin

METHOD OF DIAGNOSTICS OF SECONDARY FIRE SPOTS IN THE STUDY OF POLYMERIC MATERIALS BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS 5

Tatiana P. Sysoeva, Andrey Yu. Mokryak, Anna V. Mokryak THE EFFECTS OF VOLTAGE OVERLOAD ON ELECTRONIC DEVICES	21
Dmitriy I. Terentiev, Roman S. Satukov, Irina V. Tikina THERMODYNAMIC MODELING OF THE COMPOSITION OF COMBUSTIBLE GASES FORMED DURING THE PYROLYSIS OF LITHIUM-ION BATTERY CELLS	34
Emir A. Galiakhmetov, Rifkat M. Sultanov, Shamil I. Hafizov DEVELOPMENT OF A COMPOSITION FOR NEUTRALIZING PYROPHORIC DEPOSITS FORMED IN STORAGE TANKS FOR SULFUR CONTAINING PETROLEUM PRODUCT	46
Aidar R. Safargalin, Ildar F. Khafizov, Elena V. Popova OPTIMIZATION OF THE CONCENTRATION OF SURFACTANTS IN THE COMPOSITION OF FOAMING EXTINGUISHING AGENTS	57
Maxim N. Tukhbatulin, Irina V. Tikina, Mikhail S. Tsygankov OVERVIEW OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF WATER-BASED FLAME-RETARDANT COATINGS FOR METAL STRUCTURES	63
Denis S. Korolev, Evgeny N. Epifanov, Sergey A. Konchakov A STUDY OF THE FIRE BEHAVIOR AT A HYBRID VEHICLE FILLING STATION	75
Alexander A. Baev, Alexey E. Shkuro, Svetlana N. Paznikova LOW-FLAMMABILITY WOOD-POLYMER COMPOSITES MODIFIED WITH BROMINATED NOVOLAC CARDANOL RESIN	91
Milita V. Kharhenko, Alla Yu. Khokhlova FUNCTIONAL ORGANIZATION OF INFORMATION SUPPORT IN MAKING MANAGEMENT DECISIONS TO ENSURE FIRE SAFETY OF PEOPLE IN SOCIAL SERVICE INSTITUTIONS	101
Mikhail A. Mareev, Maxim O. Bakanov, Boris B. Grinchenko EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE EFFICIENCY COEFFICIENT OF FIRE SUPPRESSION LEADER'S TACTICAL DECISIONS BASED ON FIRE CHRONOMETER DATA	115
<u>SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS</u>	
Valery V. Loginov, Vitaly V. Terentyev, Igor A. Zubarev ALGORITHM FOR USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INFORMATION SUPPORT FOR DECISION- MAKING IN CIVIL DEFENSE	125
Natalya V. Kalganova, Oleg R. Ilyasov THEORY AND METHODOLOGY OF EMERGENCY RISK MANAGEMENT, JUSTIFICATION OF CRITERIA AND SOCIALLY ACCEPTABLE RISK LEVELS	134

Yuliya A. Tkachenko

THE CONCEPT OF A SOLAR-POWERED ROBOTIC VEHICLE FOR DELIVERING GOODS TO AN EMERGENCY AREA 144

Ivan Yu. Sergeev, Alexey N. Baturo, Dmitry V. Zhernakov, Gleb A. Nikolaev, Timur R. Amerkhanov

ANALYSIS OF THE PROBLEMATIC SITUATION OF ORGANIZING THE PREPARATION OF THE POPULATION FOR ACTIONS IN THE EVENT OF A THREAT AND OCCURRENCE OF SEISMIC EVENTS.....155

Svetlana A. Garelina, Alexey Yu. Skrynnikov

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE RATIONAL PLACEMENT OF MOBILE MEANS OF LOCALIZATION OF OIL AND PETROLEUM PRODUCTS SPILLS ON THE TERRITORY OF AN ECONOMIC FACILITY 166

Sergey P. Chumak, Dmitry N. Balin, Yuri A. Onishchenko, Taisiya D. Kuznetsova

ABOUT THE EXPEDIENCY OF CREATING AND USING SMALL-SIZED ENGINEERING EQUIPMENT FOR DEBRIS REMOVAL IN CONDITIONS OF MASS DESTRUCTION 178

Alexey L. Shkerin

FORECASTING THE DYNAMICS OF TROPICAL CYCLONES USING METHODS OF SPATIOTEMPORAL INTEGRATION OF HETEROGENEOUS AND LOOSELY FORMALIZED DATA 188

Ekaterina I. Alekseeva, Ilvira I. Antonova, Timofey Yu. Gumerov, Ekaterina A. Nasyrova

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PROFESSIONAL ACTIVITY OF RESCUE SERVICE EMPLOYEES BY OPTIMIZING FOOD SUPPLY 207

УДК 614.841

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ВТОРИЧНЫХ ОЧАГОВ ПОЖАРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Беззапонная Оксана Владимировна, Глухих Павел Александрович, Елфимова Марина Владимировна, Макаркин Сергей Викторович
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлена методология дифференциации первичных и вторичных очагов пожара при производстве судебных пожарно-технических экспертиз, рассмотрены основные этапы методики диагностики вторичных очагов пожара. Разработанная методика распространяется на пожары с признаками формирования нескольких очаговых зон, горючей нагрузкой на которых выступают полимерные материалы различной химической природы, в том числе термопласты, способные плавиться, растекаться, капать и гореть, формируя вторичные очаги пожара.

В основу дифференциации первичных и вторичных очагов пожара положена продолжительность высокотемпературного воздействия на материал отделки помещения, в котором произошел пожар. Дополнительным критерием является температура воздействия на материал в ходе пожара. Температура и продолжительность высокотемпературного воздействия на материал рассчитываются по эмпирическим уравнениям множественной линейной регрессии, получаемым по результатам предварительных испытаний образцов материалов методом синхронного термического анализа.

Окончательный вывод о месте нахождения вторичного очага пожара принимается после проведения оценки возможности возгорания материала горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов (для изолированных очаговых зон) или после сопоставления распределения пожарной нагрузки по помещению с расположением очаговых зон (при наличии огневой связи).

Ключевые слова: пожарно-техническая экспертиза, пожарная нагрузка, термоокислительная деструкция полимерных материалов, продолжительность высокотемпературного воздействия, регрессионный анализ

Для цитирования: Методика диагностики вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом синхронного термического анализа / О. В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 5–20.

METHOD OF DIAGNOSTICS OF SECONDARY FIRE SPOTS IN THE STUDY OF POLYMERIC MATERIALS BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS

Oksana V. Bezzaponnaya, Pavel A. Glukhikh, Marina V. Elfimova, Sergey V. Makarkin
UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This article presents a methodology for differentiating primary and secondary fire sources during forensic fire examinations. It also examines the key stages of the secondary fire diagnostic method for examining polymeric materials using synchronous thermal analysis. The developed methodology applies to fires with signs of multiple fire zones, where the combustible load consists of polymeric materials of varying chemical nature, including thermoplastics, which can melt, spread, drip, and burn, forming secondary fire sources.

The differentiation of primary and secondary fire sources is based on the duration of high-temperature exposure of the finishing material of the room where the fire occurred. An additional criterion is the temperature of exposure to the material during the fire. The temperature and duration of high-temperature exposure to the material are calculated using empirical equations of multiple linear regression, obtained from preliminary testing of material samples using synchronous thermal analysis. The final conclusion about the location of the explosive hazard is made after assessing the possibility of ignition of the combustible load material from dripping burning masses of thermoplastics (for isolated focal zones) or after comparing the distribution of the fire load in the room with the location of the focal zones (in the presence of a fire connection).

Keywords: fire-technical expertise, fire load, thermal-oxidative destruction of polymeric materials, duration of high-temperature exposure, regression analysis

For citation: Method of diagnostics of secondary fire spots in the study of polymetric materials by the method of synchronous thermal analysis / O. V. Bezzaponnaya [et al.] // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 5–20.

Введение

Актуальность работы обусловлена проблемой диагностики вторичных очагов пожара при производстве пожарно-технических экспертиз по причине перехода в текучее и вязкотекучее состояние термопластичных полимерных материалов, составляющих пожарную нагрузку современных зданий и помещений. В настоящее время отсутствует методика (четкий алгоритм действий) для диагностики вторичных очагов пожара (ВОП), в частности:

- для диагностики термопластов нет базы данных термограмм и термоаналитических характеристик полимерных материалов, полученных в условиях, приближенных к условиям пожара;

- не определены критерии и способы дифференциации термопластов и реактопластов;

- не сформирована методика оценки температуры и продолжительности воздействия на отделочные строительные материалы;

- не разработан алгоритм оценки возможности возгорания материалов горючей нагрузки от контакта с капаящими или растекающимися горящими массами термопластов;

- отсутствуют (или очень разрозненны) данные по кинетике термоокислительной деструкции полимерных материалов, позволяющие оценить их возгорание в условиях развившегося пожара с формированием ВОП.

Данные факты диктуют необходимость проведения исследований с использованием высокоточного и информативного метода синхронного термического анализа (СТА) и разработки методики диагностики ВОП.

Диагностика ВОП является комплексной и достаточно трудоемкой задачей, включающей в себя несколько этапов, основные из которых:

- диагностика термопластичных полимерных материалов методом СТА в очаговой зоне или над ней;
- оценка температуры и продолжительности воздействия на строительный полимерный материал в ходе пожара методом СТА;
- оценка возможности возгорания материала горючей нагрузки от контакта с горящими массами термопласта с использованием данных, полученных методом СТА;
- сопоставление распределения пожарной нагрузки с расположением очаговых зон;
- синтез информации.

Для отработки версии о формировании ВОП важной задачей является диагностика термопластов, обнаруженных в очаговой зоне или над ней в ходе осмотра места пожара. В первую очередь проводится проверка наличия фазовых переходов у образцов полимерных материалов в ходе их термолиза с использованием метода СТА [1] для диагностики полукристаллических термопластов. Для диагностики аморфных термопластов авторами работы были определены критерии дифференциации аморфных термопластов и реактопластов, а также способ и алгоритм диагностики значимых термоаналитических характеристик. Их разработка включала: анализ результатов экспериментальных исследований полимеров; изучение тесноты связи между рассматриваемым процессом и исследуемой характеристикой; оценку статистиче-

ской значимости полученного коэффициента корреляции с использованием статистического критерия Стьюдента.

Для диагностики ВОП самым важным этапом являлась оценка температуры, а главное — продолжительности высокотемпературного воздействия на строительный отделочный материал в ходе пожара, желательно расположенного в нижней части помещения, где влияние конвективных потоков на материал выражено в меньшей степени. Сложность диагностики ВОП заключалась в том, что нужно было оценить сразу два параметра: температуру и продолжительность высокотемпературного воздействия на материал в ходе пожара.

Для решения этой комплексной задачи целесообразно применять современные инструментальные методы, в частности, высокоточный (погрешность при определении температуры и массы не превышает 1,5 %) и информативный метод СТА, позволяющий в ходе одного испытания регистрировать сразу несколько характеристик, в зависимости от температуры и/или времени.

Метод термического анализа уже применялся для оценки температуры воздействия на такие строительные материалы, как гипс [2], бетон [3–5], гипсо-цементный пенобетон [6], цементный камень [7], штукатурка [8], древесина [9, 10], лакокрасочные покрытия [11] и огнезащитные составы [12]. Критериями для оценки температуры воздействия на них являлись: потеря массы при температуре, значимо характеризующей процесс термоокислительной деструкции исследуемого материала, зольный остаток, температура при заданной потере массы и другие термоаналитические характеристики. Однако работ, в которых бы решалась задача оценки температуры и времени воздействия

на материал с использованием современных и высокоточных инструментальных методов, в том числе методов термического анализа, в настоящее время нет, что свидетельствует об актуальности темы исследования.

Оценка температуры и продолжительности высокотемпературного воздействия на исследуемый материал

Оценка температуры и продолжительности высокотемпературного воздействия на исследуемый материал возможна при получении зависимости значимых термоаналитических характеристик (ТАХ) от двух факторов — температуры и времени предварительного отжига образцов исследуемого материала с применением метода множественной регрессии.

Для исследований выбран полимерный материал — ламинат 33-го класса износостойкости, часто применяемый для отделки полов жилых и офисных помещений. При подготовке образцов для исследований ламинат предварительно измельчался для получения однородной массы. Масса образцов ламината для испытаний составляла 4–5 мг. Перед испытанием образцы выдерживали в течение 24 ч при комнатной температуре и относительной влажности воздуха (50 ± 10) %.

Исследования образцов ламината проводились методом СТА с использованием термоанализатора STA 449 F5 Jupiter в окислительной среде воздуха в корундовых тиглях со скоростью нагрева $20^\circ\text{C}/\text{мин}$. Начальная температура — $25\text{--}308^\circ\text{C}$, конечная — 910°C .

Для исследования зависимости ТАХ от времени и температуры воздействия образцы ламината предварительно подвергались термическому воздействию в термоанализаторе. Исходная масса образцов

ламината составляла 7–9 г, в зависимости от степени термического воздействия на них. Значения температур воздействия определялись температурным интервалом пика на кривой дифференциальной термогравиметрии (ДТГ), характеризующего процесс термоокислительной деструкции (ТОД) исследуемого материала, с шагом 50°C . Время высокотемпературного воздействия составляло 15, 30, 45 и 60 мин.

После предварительного отжига образцов ламината проводилось их кондиционирование, а затем снимались термограммы. При этом время кондиционирования для всех исследуемых образцов полимерного материала было постоянным (одинаковым). Полученные термограммы обрабатывались с использованием программного обеспечения Proteus 6.1.

Термограмма нативного образца ламината 33-го класса износостойкости приведена на рис. 1.

Анализ термограммы свидетельствует о том, что процесс ТОД ламината наиболее интенсивно протекает в интервале температур $300\text{--}400^\circ\text{C}$, что определило значения температур предварительного воздействия на исследуемый полимерный материал: 300°C , 350°C , 400°C .

Корреляционный анализ полученных результатов исследований позволил определить значимые ТАХ, для которых наблюдалась высокая теснота связи с температурой и продолжительностью высокотемпературного воздействия на ламинат: зольный остаток и температура ТОД данного полимерного материала (температура максимума ДТГ-пика).

В результате регрессионного анализа, где зависимыми переменными выступали зольный остаток и температура ТОД,

а независимыми — температура и продолжительность высокотемпературного воздей-

ствия, получена система уравнений множественной линейной регрессии (1) и (2):

$$T_{\text{ДТГ}} = -131,064 + 1,588 \cdot T + 0,718 \cdot \tau, \quad (1)$$

$$ЗО = 27,832 + 0,066 \cdot T + 0,180 \cdot \tau, \quad (2)$$

где:

ЗО — зольный остаток при температуре 900 °С, %;

$T_{\text{ДТГ}}$ — температура ТОД исследуемого материала (температура максимума пика на кривой дифференциальной термогравиметрии), °С;

T — температура предварительного воздействия, °С;

τ — время предварительного высокотемпературного воздействия, мин.

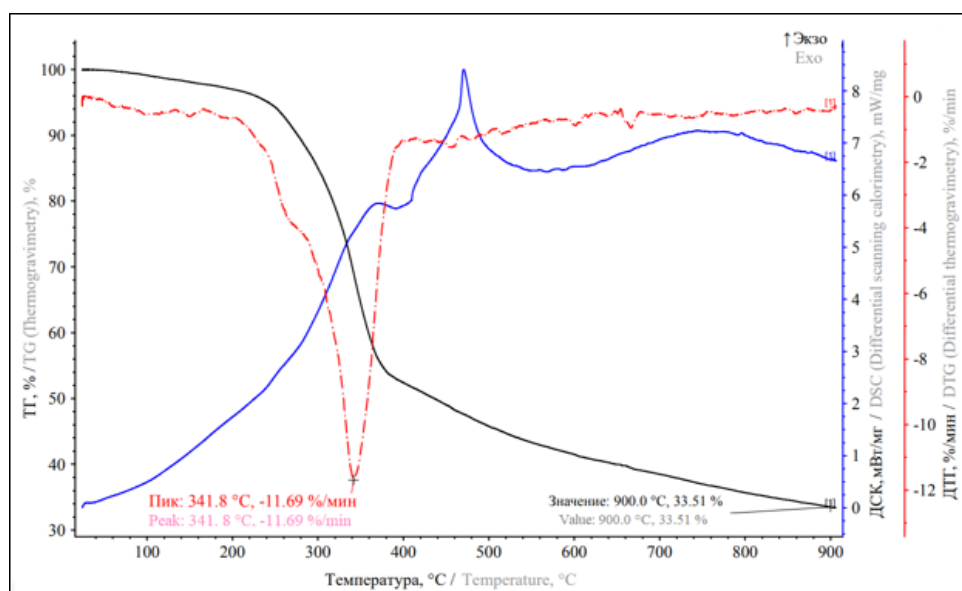


Рис. 1. Термограмма нативного образца ламината 33-го класса износостойкости в среде воздуха

Fig. 1. Thermogram of a native laminate sample of wear resistance class 33 in an air environment

Проведенная проверка адекватности моделей регрессии показала, что значения коэффициента детерминации (R^2), характеризующего адекватность моделей для уравнений (1) и (2), составили соответственно $R^2 = 0,945$ и $R^2 = 0,974$. Значения коэффициента множественной корреляции (R), характеризующего тесноту линейной корреляционной связи между независимыми переменными (температура и время) и зависимыми переменными (температура ТОД, зольный остаток), со-

ставляли соответственно $R = 0,972$ и $R = 0,987$. Статистическая значимость связи в рассматриваемых моделях регрессии (P -значение) — менее 0,05.

По результатам апробации полученных эмпирических уравнений относительная погрешность определения температуры воздействия на ламинат составила менее 1 %, а времени предварительного воздействия на исследуемый материал — менее 5 %, что свидетельствует о достоверности результатов, полученных с использованием

разработанного способа оценки температуры и продолжительности высокотемпературного воздействия на образцы исследуемого полимерного материала.

Данный способ оценки был успешно апробирован на образцах линолеума, который также часто применяется в качестве отделочного материала зданий и офисных помещений. Зольный остаток и температура ТОД также показали высокие значения коэффициентов множественной корреляции и детерминации в ходе проверки адекватности моделей (эмпириче-

ских уравнений множественной линейной регрессии).

Результаты апробации предложенного способа оценки температуры и времени воздействия на материалы различной химической природы свидетельствуют о возможности применения данного методического подхода для оценки температуры и продолжительности высокотемпературного воздействия на полимерные материалы, применяемые при отделке зданий и помещений. Получаемые эмпирические уравнения имеют вид:

$$ЗО = a_0 + a_1 T + a_2 \tau, \quad (3)$$

$$T_{\text{ДТГ}} = b_0 + b_1 T + b_2 \tau, \quad (4)$$

где:

ЗО — зольный остаток при температуре 900 °С, %;

$T_{\text{ДТГ}}$ — температура ТОД исследуемого материала (температура максимума пика на кривой дифференциальной термогравиметрии), °С;

T — температура предварительного воздействия, °С;

τ — время предварительного высокотемпературного воздействия, мин;

a_1, a_2, b_1, b_2 — коэффициенты регрессии;

a_0 и b_0 — свободные члены уравнений регрессии.

Важным этапом диагностики ВОП также является оценка возможности возгорания материалов горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов.

Оценка возможности возгорания материалов горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов

Для оценки возможности возгорания материалов горючей нагрузки в результа-

те контакта с расплавленными горящими массами термопластов предложен подход, основанный на решении уравнения теплопроводности.

В соответствии с тепловой теорией зажигания Я. Б. Зельдовича [13] для математического решения задачи о возможности зажигания поверхности материала горючей нагрузки (ГН) критерием зажигания является выполнение условия (5):

$$\left. \frac{d\theta}{d\tau} \right|_{\tau = \tau_{\text{и}}} = 0, \quad (5)$$

где:

θ — безразмерная температура раскаленного тела (горящего расплавленного термопласта);

τ — время, с;

$\tau_{\text{и}}$ — время задержки возгорания материала ГН (период индукции зажигания), с.

Оценка возможности возгорания материалов ГН от контакта с горящими массами термопластов сводится к расчету:

- критических значений радиуса капель термопласта или $\frac{1}{2}$ толщины слоя термопласта на поверхности горючего материала;
- индукционного периода зажигания горючего материала, при которых выпол-

няется условие зажигания (тепловыделение в системе «горящий расплав термопласта — материал» превышает теплоотвод в окружающую среду) [14].

Расчет критического радиуса капель термопласта r_{0*} и $\frac{1}{2}$ толщины слоя термопласта (d_0) на поверхности горючего материала производится по формуле (6):

$$r_{0*} = x_{0*} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_r \cdot R \cdot T_*^2}{q \cdot A \cdot E_a \cdot m^n} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T_*}\right)}, \quad (6)$$

где:

λ_r — теплопроводность горючего материала, Вт/м · К;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/моль · К;

T_* — характерная температура, равная максимально возможной начальной температуре горящего термопластичного полимерного материала, К;

q — тепловой эффект реакции термоокислительной деструкции материала ГН, определяемый методом СТА по площади пика на кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК-кривой), характеризующего ТОД (горение) исследуемого материала, Дж/кг;

A — предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса, определяемый по результатам термического анализа, с⁻¹;

E_a — энергия активации, определяемая по результатам термического анализа, Дж/моль;

m — массовая концентрация реакции ТОД материала ГН, %;

n — порядок реакции термоокислительной деструкции горючего материала;

m_n принимается равной единице, так как в качестве материала ГН рассматриваются твердые материалы;

x_{0*} — безразмерный критический радиус капли горящего термопласта ($\frac{1}{2}$ толщины слоя термопласта на поверхности материала), рассчитывается по формуле (7):

$$x_{0*} = \frac{a \cdot (k+1) \cdot \theta_n^2 \cdot \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} e^{\left[1 + \frac{1}{\theta_n} \cdot \left(\frac{5 \cdot k}{3 \cdot a \cdot (k+1)} - 4\right)\right]}, \quad (7)$$

где:

$a = \frac{C_p \cdot \rho}{C_{p0} \cdot \rho_0}$ — безразмерная объемная теплоемкость;

C_p — удельная теплоемкость материала ГН, Дж/кг · К;

ρ — плотность материала ГН, кг/м³;

C_{p0} — удельная теплоемкость термопласта, Дж/кг · К;

ρ_0 — плотность термопласта, кг/м³;

k — показатель симметрии нагретого тела: для сферической капли горящего капающего термопласта $k = 2$, для слоя расплава термопласта $k = 0$;

θ_n — начальная безразмерная температура материала ГН, рассчитывается по формуле (8):

$$\theta_n = \frac{(T_* - T_n) \cdot E_a}{R \cdot T_*^2}, \quad (8)$$

где T_n — минимально возможная начальная температура материала ГН, К.

Если размер капель горящего термопласта r_T будет меньше критического r_{0*} , то зажигание не возникнет. Если размер капель термопласта больше критического, то усло-

вие зажигания (5) будет выполняться и произойдет зажигание рассматриваемого горючего материала от горящих капель термопласта.

Время индукции зажигания при критических условиях рассчитывается по следующей формуле (9):

$$\tau_n = \frac{C_p \rho R T^2}{6 q A E_a} \cdot \left(b + \sqrt{b^2 + \frac{3 \cdot \theta_n^3}{2 \cdot \theta_n - 3}} \right)^2 \exp \left(\frac{E_a}{R \cdot T} \right), \quad (9)$$

где b — безразмерное время индукции, которое при критических условиях рассчитывается по формуле (10):

$$b = \frac{3 \cdot a \cdot (k + 1) \cdot \theta_n^4}{4 \cdot x_{0*} \cdot (2 \cdot \theta_n - 3)} + \frac{k}{6 \cdot x_{0*}}. \quad (10)$$

Для определения температуры горящих капель термопластов, размера капель, а также зажигательной способности горящих капель термопласта были проведены лабораторные испытания, моделирующие процесс формирования ВОП от контакта горючего материала с расплавленными массами термопластов с использованием тепловизионного метода.

Для испытаний использовался тепловизор Guide C640, с матрицей 640×512 пикселей, работающий в спектральном диапазоне 3,6–4,9 мкм. Тепловизор обеспечивал температурное разрешение 0,03 °С при точности измерений ±1,0 °С для интервала температур 100–800 °С.

В качестве материалов горючей нагрузки рассматривались: ламинат 33-го класса износостойкости и ПВХ-линолеум, приме-

няемые в качестве напольных покрытий в жилых и офисных помещениях, а также поролон (эластичный ППУ), применяемый для набивки мягкой мебели.

Исследовались термопластичные полимерные материалы различной химической природы: вспененный полиэтилен (ППЭ), полиэтилен низкой плотности ПЭНП, полипропилен (ПП), сотовый поликарбонат (ПК), полиэтилентерефталат (ПЭТ) в разных модификациях, ПВХ в виде натяжного потолка, ППС в виде потолочного плинтуса, экструдированный ППС, ПВХ-пластикат в виде кабель-канала.

Для испытаний образец термопластичного полимерного материала закреплялся в лапке штатива (рис. 2), поджигался. Фиксировался процесс его каплепадения, зажигательной способности, а также оценивалась температура

капель термопласта и размер. Для получения более точных значений температуры расплавленных термопластов вводилось значение коэффициента излучения ($K_{\text{изл}} = 0,9$).

Результаты оценки размера капающих масс термопластов и температуры расплава термопластов приведены в таблице.

Анализ размера капель-агломератов термопластов свидетельствует о том, что их размер не превышал 35 мм. Максимальная температура горящих масс термопластов не превышала 918,4 К.

Полученные результаты применялись при проведении расчетного эксперимента по оценке возможности возгорания материалов горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов.

Кинетические параметры ТОД материала горючей нагрузки определяются по результатам термического анализа методом Бройдо [15]. Примеры оценки энергии активации и предэкспоненциального множителя ТОД полимерных материалов приведены в работах [16, 17].

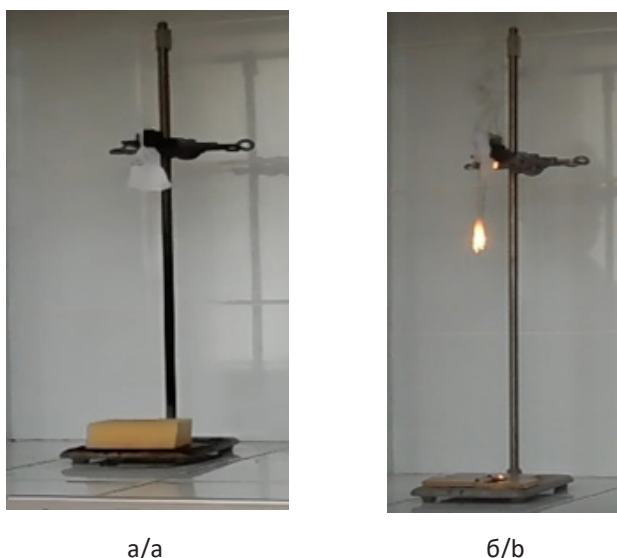


Рис. 2. Установка для исследования зажигательной способности термопластов:
а — материал горючей нагрузки — эластичный ППУ; б — материал горючей нагрузки — ламинат

Fig. 2. Setup for testing the flammability of thermoplastics: a — flammable load material — elastic polyurethane foam;
b — flammable load material — laminate

Таблица
Результаты оценки размера капающих масс термопластов
и температуры расплава термопластов

Table
Results of the evaluation of the size of dripping masses of thermoplastics
and the melt temperature of thermoplastics

Термопласт Thermoplastic	Размер капель-агломератов, d , мм Size of agglomerate drops, d , mm	Температура расплава горящего термопласта, T , К Melt temperature of burning thermoplastic, T , K
ПЭ вспененный Foamed PE	8–10	691,6–733,4
ПП PP	10–35	855,8–918,4

Окончание таблицы

Термопласт Thermoplastic	Размер капле-агломератов, d , мм Size of agglomerate drops, d , mm	Температура расплава горящего термопласта, T , К Melt temperature of burning thermoplastic, T , K
ППС экструдированный extruded polystyrene foam XPS	8–10	754,5–799,4
ПВХ (натяжной потолок) PVC (stretch ceiling)	10–15	710,4–716,8
ПВХ-пластикат PVC plastic	Отсутствие каплепадения No dripping	717,5–723,2
ПК сотовый PC mobile	Отсутствие каплепадения No dripping	693,0–698,2
ПЭТ (капрон) PET (nylon)	6–12	761,0–799,5
ПЭТ (портьерная ткань) PET (curtain fabric)	6–12	805,7–844,5

Диагностика вторичных очагов пожара при комплексном анализе и синтезе информации

При установлении очага пожара, в случае обнаружения нескольких очаговых зон, необходим анализ всей информации, полученной при осмотре места происшествия и при проведении исследований, а именно:

- информации, касающейся мест расположения очаговых зон;
- результатов диагностики методом СТА термопластов в очаговой зоне и особенно над ней;
- результатов оценки значений температуры и продолжительности их воздействия на строительный отделочный материал, полученных методом СТА;
- информации о распределении пожарной нагрузки в помещении до момента возникновения пожара;
- информации о последовательности тушения пожара (в какие зоны горения осуществлялась подача огнетушащих веществ на начальном этапе тушения и в ходе распространения горения).

Для обоснования выводов, касающихся месторасположения ВОП, полученные результаты необходимо подкрепить:

- в случае формирования местных очагов пожара — результатами сопоставления распределения пожарной нагрузки с распределением выявленных очаговых зон;
- в случае формирования изолированных очагов пожара (горения) по причине капания горящих масс термопластов — результатами оценки возможности возгорания материалов горючей нагрузки после контакта с расплавленными массами термопластов, с использованием расчетного эксперимента и результатов исследований, полученных методом СТА.

Для диагностики изолированных очагов горения выявленную картину распределения очаговых зон и результатов оценки температуры и продолжительности воздействия на строительный полимерный материал (ламинат, линолеум, ДВП, ДСП, фанера), полученных методом СТА, необходимо подкрепить результатами расчетов оценки

возможности возгорания материалов ГН от контакта с капаящими горящими массами термопластов, находившихся над рассматриваемой очаговой зоной.

Изолированный ВОП диагностируется при выполнении следующих условий:

- месторасположение обнаруженной очаговой зоны совпадает с зоной, в которой диагностирована максимальная температура воздействия на строительный полимерный материал, а длительность воздействия меньше времени высокотемпературного воздействия в другой очаговой зоне;

- над очаговой зоной обнаружены термопласты, способные плавиться и капать;

- в рассматриваемой очаговой зоне найден материал горючей нагрузки, потенциально способный воспламениться от контакта с горящим и капаящим термопластом;

- выполняются условия возгорания материала горючей нагрузки от капаящих масс термопласта, находящегося над очаговой зоной;

- не подтвержден факт первоочередности тушения пожара в данной очаговой зоне.

Для диагностики местных очагов горения выявленную картину распределения

очаговых зон и результатов оценки значений температуры и продолжительности их воздействия на строительный полимерный материал (ламинат, линолеум, ДВП, ДСП, фанера), полученных методом СТА, необходимо подкрепить сопоставлением с картиной распределения пожарной нагрузки по объекту пожара. Важное значение при оценке типа и количества материалов ГН, а также ее расположения имеют показания очевидцев, которые необходимо учитывать при отработке версии о формировании ВОП.

При сопоставлении распределения пожарной нагрузки с распределением выявленных очаговых зон с признаками огневой связи необходимо:

- обозначить на плане помещения очаговые зоны по результатам осмотра места пожара;

- по результатам СТА обозначить на плане помещения температуру и продолжительность высокотемпературного воздействия на полимерный строительный материал в каждой из очаговых зон;

- используя показания сведущих лиц, обозначить на плане вид и количество горючей нагрузки в каждой из очаговых зон;

- оценить пожарную нагрузку (ПН, кДж) в каждой из очаговых зон (11):

$$ПН = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot m_i, \quad (11)$$

где:

Q_i — тепловой эффект горения i -го материала горючей нагрузки, кДж/кг;

m_i — масса i -го материала горючей нагрузки в рассматриваемой очаговой зоне, кг.

Тепловой эффект горения материала горючей нагрузки определяется методом СТА по площади пика на ДСК-кривой, характеризующего процесс ТОД исследуемого материала.

Местный ВОП диагностируется при выполнении следующего условия:

- места расположения очаговой зоны совпали с местами расположения зоны максимальной температуры воздействия

на строительный полимерный материал, но меньшей продолжительности высокотемпературного воздействия по сравнению с другой очаговой зоной;

- установлен факт сосредоточения горючих материалов с выделением большого количества тепла (высокой пожарной нагрузки) в данной очаговой зоне;

- не подтвержден факт первоочередности тушения пожара в данной очаговой зоне.

В случаях, когда очаговые признаки не сформировались или нивелировались в ходе пожара, проводится детальное исследование образцов отделочного строительного материала методом СТА, отобранных по всей площади помещения с шагом 0,5–1,0 м.

На заключительном этапе диагностики ВОП проводится реконструкция событий для восстановления картины возникновения и развития горения, исходя из предполагаемого очага (очагов) пожара, источника зажигания, свойств конструкционных и отделочных материалов здания. После полного совпадения реконструированной картины с точно известными обстоятельствами пожара делается окончательный вывод об очаге пожара и очагах горения.

Разработанная методика «Диагностика вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом СТА в рамках производства судебных пожарно-технических экспертиз» была успешно апробирована на примере моделируемого (учебного) пожара, что свидетельствует о достоверности полученных результатов и надежности предложенного методического подхода для решения сложной задачи по дифференциации первичных и вторичных очагов пожара в рамках производства судебных пожарно-технических экспертиз.

Заключение

Рассмотрены основные этапы методики «Диагностика формирования вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом синхронного термического анализа в рамках производства судебных пожарно-технических экспертиз». Методика распространяется на пожары с признаками формирования нескольких очаговых зон, горючей нагрузкой на которых выступают полимерные материалы различной химической природы, в том числе термопласты, способные плавиться, растекаться, капать и гореть, формируя вторичные очаги пожара.

Разработан и успешно апробирован способ оценки температуры и времени предварительного высокотемпературного воздействия на полимерные материалы методом СТА, основанный на получении эмпирических уравнений множественной линейной регрессии.

Описан применяемый в методике способ оценки возможности возгорания материала горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов (для изолированных очаговых зон) или после сопоставления распределения пожарной нагрузки по помещению с расположением очаговых зон (при наличии огневой связи).

Разработанная методика «Диагностика формирования вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом синхронного термического анализа в рамках производства судебных пожарно-технических экспертиз» позволит экспертам судебных пожарно-технических экспертиз эффективно решать диагностические задачи при отработке версии о формировании ВОП, а также научно обоснованно и аргументированно отвечать на поставленные перед ними вопросы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беззапонная О. В., Глухих П. А., Макаркин С. В. Идентификация термопластичных полимеров методом синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33, № 1. С. 24–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.24-35. EDN: NONNIB.
2. Наймушин Е. В., Дементьев Ф. А., Минкин Д. Ю. Исследование гипса методом синхронного термического анализа для целей установления температурного режима нагрева // Технологии техносферной безопасности. 2013. № 6 (52). С. 1–6. EDN: SCFHST.
3. Методика комплексного исследования бетонов, подвергшихся термическому воздействию на пожаре / Д. В. Флегонтов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 1 (30). С. 36–43. EDN: VZETJH.
4. Корзанов В. С., Красновских М. П. Влияние термического воздействия на прочность бетона // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2020. Т. 10. Вып. 3. С. 277–284. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284. EDN: MKYDAB.
5. Annerel E., Taerwe L. Damage assessment of concrete structures exposed to fire // IABSE Conference: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures. Rotterdam, 2013. P. 112–113. DOI: 10.2749/222137813806474417.
6. Samson G., Phelipot-Mardele A., Lanos C. Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2016. Vol. 21. Iss. 12. P. 1–20. DOI: 10.1080/19648189.2016.1177601.
7. Дашко Л. В., Синюк В. Д., Плотникова Г. В. Экспертное исследование цементного камня после высокотемпературного воздействия // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24, № 12. С. 22–32. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32. EDN: VBUCJB.
8. Беззапонная О. В. Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31, № 5. С. 26–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32. EDN: CSWEMZ.
9. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review / K. Candelier [et al.] // Annals of Forest Science. 2016. Vol. 73. Iss. 3. P. 571–583. DOI: 10.1007/s13595-016-0541-x.
10. Беззапонная О. В. Оценка температуры воздействия на древесину в условиях пожара методами термического анализа // Техносферная безопасность. 2020. № 3 (28). С. 70–80. EDN: ORZBZF.
11. Принцева М. Ю., Лобатова О. В. Определение степени термического поражения лакокрасочных покрытий методом синхронного термического анализа // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11, № 2. С. 131–136. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0023. EDN: VOVQSC.
12. Диагностика температуры воздействия пожара на огнезащитные покрытия интумесцентного типа методами термического анализа / О. В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2019. № 4 (25). С. 73–81. EDN: HOJFRJ.
13. Зельдович Я. Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. М., 1984. 374 с.
14. Смелков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. М., 2009. 328 с.
15. Broido A. A. Simple, Sensitive Graphical Method of Treating Thermogravimetric Analysis Data // Journal of Polymer Science. 1969. Pt. A-2. Vol. 7. No. 10. P. 1761–1773.
16. Беззапонная О. В. Оценка кинетических параметров термоокислительной деструкции полимерных материалов для решения задач пожарно-технической экспертизы // Проблемы

управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 166–174. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-166-174. EDN: QWMIMW.

17. Лобова С. Ф., Принцева М. Ю. Оценка влияния исходных данных на результаты моделирования распространения горения при оценке эффективности работы автоматической установки пожарной сигнализации // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2019. № 3. С. 70–80. EDN: OJDTYG

REFERENCES

1. Bezzaponnaya O. V., Makarkin S. V., Glukhikh P. A. Identification of thermoplastic polymers by method of synchronous thermal analysis // Fire and Explosion Safety. 2024. No. 33 (1). P. 24–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.24-35. EDN: NONNIB.

2. Naymushin E. V., Dementyev F. A., Minkin D. Yu. Study of gypsum by the method of synchronous thermal analysis for the purposes of establishing the heating temperature regime // Technologies of technosphere safety. 2013. No. 6 (52). P. 1–6. EDN: SCFHST.

3. Methodology for a comprehensive study of concrete exposed to thermal effects during a fire / D. V. Flegontov [et al.] // Modern problems of civil protection. 2019. No. 1 (30). P. 36–43. EDN: VZETJH.

4. Korzanov V. S., Krasnovskikh M. P. Effect of thermal exposure on the strength of concrete // Bulletin of Perm University. Series Chemistry. 2020. Vol. 10. Iss. 3. P. 277–284. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284. EDN: MKYDAB.

5. Annerel E., Taerwe L. Damage assessment of concrete structures exposed to fire // IABSE Conference: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures. Rotterdam, 2013. P. 112–113. DOI: 10.2749/222137813806474417.

6. Samson G., Phelipot-Mardele A., Lanos C. Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2016. Vol. 21. Iss. 12. P. 1–20. DOI: 10.1080/19648189.2016.1177601.

7. Dashko L. V., Sinyuk V. D., Plotnikova G. V. Expert study of cement stone after high-temperature exposure // Fire and Explosion Safety. 2015. Vol. 24. No. 12. P. 22–32. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32. EDN: VBUCJB.

8. Bezzaponnaya O. V. Study of fire development features using the method of synchronous thermal analysis // Fire and Explosion Safety. 2022. Vol. 31. No. 5. P. 26–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32. EDN: CSWEMZ.

9. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review / K. Candelier [et al.] // Annals of Forest Science. 2016. Vol. 73. Iss. 3. P. 571–583. DOI: 10.1007/s13595-016-0541-x.

10. Bezzaponnaya O. V. Assessment of the temperature of exposure to wood under fire conditions using thermal analysis methods // Technosphere Safety. 2020. No. 3 (28). P. 70–80. EDN: ORZBZF.

11. Printseva M. Yu., Lobatova O. V. Determination of the degree of thermal damage to paint and varnish coatings using the method of synchronous thermal analysis // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2022. Vol. 11. No. 2. P. 131–136. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0023. EDN: VOVQSC.

12. Diagnostics of fire exposure temperature on intumescent fire-protective coatings using thermal analysis methods / O. V. Bezzaponnaya [et al.] // *Technosphere Safety*. 2019. No. 4 (25). P. 73–81. EDN: HOJFRJ.
13. Zeldovich Ya. B. *Selected Works. Chemical Physics and Hydrodynamics*. Moscow, 1984. 374 p.
14. Smelkov G. I. *Fire Safety of Electrical Wiring*. Moscow, 2009. 328 p.
15. Broido A. A. Simple, Sensitive Graphical Method of Treating Thermogravimetric Analysis Data // *Journal of Polymer Science*. 1969. Pt. A-2. Vol. 7. No. 10. P. 1761–1773.
16. Bezzaponnaya O. V. Evaluation of kinetic parameters of thermal-oxidative destruction of polymeric materials for solving fire-technical expertise problems // *Problems of Risk Management in the Technosphere*. 2025. No. 1 (73). P. 166–174. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-166-174. EDN: QWMIMW.
17. Lobova S. F., Printseva M. Yu. Assessment of the influence of initial data on the results of modeling the spread of combustion when assessing the efficiency of an automatic fire alarm system // *Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia*. 2019. No. 3. P. 70–80. EDN: OJDTYG.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Глухих Павел Александрович, старший преподаватель кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

Елфимова Марина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника Уральского института ГПС МЧС России по научной работе (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 818459; ORCID: 0000-0003-3835-9003; e-mail: elfimar@mail.ru

Макаркин Сергей Викторович, канд. юрид. наук, доцент, начальник кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: serge.makarkin@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana V. Bezzaponnaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Professor of the Department of Criminalistics and Engineering Expertise, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian

Federation); ID RSCI: 119257; Scopus Author ID: 6504618195; Researcher ID: R-8727-2019; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Pavel A. Glukhikh, Senior Lecturer of the Department of Criminalistics and Engineering Expertise, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

Marina V. Elfimova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Institute for Scientific Work, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 818459; ORCID: 0000-0003-3835-9003; e-mail: elfimar@mail.ru

Sergey V. Makarkin, Cand. Sci. (legal), Associate Professor, Head of the Department of Criminalistics and Engineering Expertise, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: serge.makarkin@yandex.ru

УДК 614.841.2

ПОСЛЕДСТВИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ НА РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Сысоева Татьяна Павловна, Мокряк Андрей Юрьевич, Мокряк Анна Васильевна
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, посвященных моделированию аварийного режима работы электрооборудования. В качестве объекта исследования были выбраны зарядные устройства, на которые воздействовали перегрузкой по напряжению. Целью эксперимента являлось определение критических температур, при которых возникает данный аварийный режим, а также фиксация характерных термических повреждений. В ходе лабораторных испытаний с использованием тепловизионной техники были определены максимальные температуры нагрева корпусов и внутренних элементов зарядных устройств при подаче повышенного напряжения 380 В. Полученные термограммы позволили зафиксировать динамику нагрева и выявить наиболее уязвимые узлы, подверженные термическому воздействию. Последующий анализ повреждений проводился методом оптической микроскопии. В результате исследования электронных компонентов и печатных плат были выявлены специфические следы, характерные именно для режима перенапряжения. Выявленные диагностические признаки имеют высокую ценность для проведения пожарно-технических экспертиз. Они позволяют достоверно установить факт возникновения аварийного режима работы электрооборудования (перегрузки по напряжению) при анализе электротехнической версии причины пожара. Использование данных методик и критериев в экспертной практике способствует повышению объективности выводов и точности установления причинно-следственных связей при расследовании пожаров.

Ключевые слова: перенапряжение, тепловые зоны, оплавления, тепловизор, стереомикроскоп, пожарно-техническая экспертиза, пожарная опасность

Для цитирования: Сысоева Т. П., Мокряк А. Ю., Мокряк А. В. Последствия воздействия перегрузки по напряжению на радиоэлектронные устройства // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 21–33.

THE EFFECTS OF VOLTAGE OVERLOAD ON ELECTRONIC DEVICES

Tatiana P. Sysoeva, Andrey Yu. Mokryak, Anna V. Mokryak
Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of experimental studies devoted to modeling the emergency operation of electrical equipment. Battery chargers subjected to voltage overload were chosen

as the study subjects. The purpose of the experiment was to determine the critical temperatures at which this emergency occurs, as well as to fix the characteristic thermal damage. During laboratory tests using thermal imaging technology, the maximum heating temperatures of the housings and internal elements of the chargers were determined when an increased voltage of 380 V. The thermograms obtained made it possible to record the dynamics of heating and identify the most vulnerable nodes exposed to thermal effects. Subsequent damage analysis was performed by optical microscopy. As a result of the study of electronic components and printed circuit boards, specific traces were identified that are characteristic of the overvoltage mode. The identified diagnostic signs are of high value for conducting fire technical examinations. They make it possible to reliably establish the occurrence of an emergency operation of electrical equipment (voltage overload) when analyzing the electrical version of the cause of the fire. The use of these techniques and criteria in expert practice helps to increase the objectivity of conclusions and the accuracy of establishing cause-and-effect relationships in the investigation of fires.

Keywords: overvoltage, thermal zones, reflow, thermal imager, stereo microscope, fire technical expertise, fire hazard

For citation: Sysoeva T. P., Mokryak A. Yu., Mokryak A. V. The effects of voltage overload on electronic devices // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 21–33.

Введение

Современную жизнь уже невозможно представить без использования мобильных устройств и бытовой техники. Для поддержания их работоспособности требуется своевременная подзарядка [1–4], что зачастую может привести к возникновению аварийных режимов работы электросети. Такие режимы характеризуются высокой вероятностью воспламенения элементов зарядного блока, питающих проводов и самого приемника электроэнергии с последующей передачей огня на окружающие горючие материалы [5–7]. Для выявления материальных признаков, которые могли бы характеризовать электрический аварийный режим работы перенапряжения [8–10], были проведены экспериментальные исследования на лабораторной базе Исследовательского центра экспертизы пожаров.

Цель данного исследования — моделирование влияния аварийного режима работы электрооборудования перегрузки по напряжению на зарядные устройства для определения температуры, которая формируется при возникновении данного режима, а также фиксация термических повреждений, характерных для режима перегрузки по напряжению. Результаты данного лабораторного исследования расширят возможности поиска следов аварийных режимов работы и установления электротехнической причины пожара.

Объекты и методы исследования

С целью повышения чистоты эксперимента в качестве объектов исследования использовались зарядные устройства и различные виды радиоэлектронных устройств разных фирм-производителей. Данные образцы были пронумерованы (табл. 1).

При проведении эксперимента применяли инструментальный метод исследования для выявления остаточных температурных зон на теплоемких конструкциях с помощью тепловизора DT-9897 Н [11, 12], который преобразует инфракрасное излучение от поверхности объекта в видимое изображение (термограмму), показывающее распределение температуры. Основной функцией тепловизора является визуализация тепловых полей нагретых объектов [13–15]. Методом телевизионного контроля осуществлялась фиксация темпе-

ратур на поверхности зарядных устройств в непрерывном режиме. Фиксировались максимальные температуры.

Далее для фиксации термических повреждений зарядных устройств использовался метод оптической микроскопии при помощи стереомикроскопа «Альтами СМ0870». Стереомикроскоп позволяет наблюдать объемные изображения объектов в отраженном свете при увеличениях от 8 до 420 крат. Захват изображений осуществлялся с помощью цифровой камеры и программного обеспечения Altami Studio 3.0.

Таблица 1
Модели зарядных устройств и радиоэлектронные устройства

Table 1
Models of chargers and electronic devices

№ образца Sample number	Наименование устройства (модель, марка) и назначение Device name (model, brand) and purpose	Технические характеристики Technical specifications	
		Входное/выходное напряжение, В Input/output voltage, V	Входной/выходной ток, мА Entrance/Output current, mA
1	TEXET Model TM-128 для сотового телефона TEXET Model TM-128 for cell phone	100–240/5	100/500
2	BOROFONE Model BA20A для сотового телефона BOROFONE Model BA20A for cell phone	100–240/5	300/2100
3	f+ Charger Model TA8751 для сотового телефона f+ Charger Model TA8751 for cell phone	100–240/5	150/55
4	f+ Model TA9100 для сотового телефона f+ Model TA9100 for cell phone	100–240/5	200/500
5	TP-LINK Model TO90060-2C1 для сотового телефона TP-LINK Model TO90060-2C1 for cell phone	100–240/9	300/600
6	TOMY MODEL NO ED3514090020G для радионяни TOMY MODEL NO ED3514090020G for babysitter radio	230/9	35/200
7	TOMY MODEL NO ED3514090020G для радионяни TOMY MODEL NO ED3514090020G for babysitter radio	230/9	35/200

Экспериментальная часть

На первом этапе осуществлялся замер температурных полей на поверхности пластмассового корпуса зарядных устройств при их работе в условиях нормального напряжения 220 В и при подключении к радиоэлектронным устройствам. Это необходимо для того, чтобы можно было зафиксировать разницу между стационарным температурным режимом нагрева корпуса и в момент аварийного режима перегрузки по напряжению. Фиксация теплого нагрева корпуса производилась с помощью тепловизора. На всех зарядных устройствах наибольшая зона теплового нагрева имеет следующие максимальные температуры:

- образец № 1 — 30 °С,
- образец № 2 — 34 °С,
- образец № 3 — 34 °С,
- образец № 4 — 36 °С,
- образец № 5 — 36 °С,
- образец № 6 — 24 °С,
- образец № 7 — 25 °С.

На втором этапе образцы подключались к сети 380 В под рабочей нагрузкой с непрерывным мониторингом температуры корпуса. Финальная стадия эксперимента инициировалась развитием аварийного режима, отказом электроники и локализацией перегрева на полимерном корпусе зарядных устройств.

Условия проведения экспериментов для всех образцов были одинаковы. Длительность эксперимента зависела от времени возникновения аварийного режима работы.

На образцах № 1, 2 и 5 срабатывание аварийного режима работы происходило в первые секунды подключения к электросети с напряжением в 380 В. Далее зарядные устройства выходили из строя, становились

неработоспособными. Результаты визуального наблюдения представлены в табл. 2.

Образцы № 3, 4, 6 и 7 оказались более устойчивы. На образце № 4 спустя 5 минут после включения в сеть при напряжении 380 В была зафиксирована температура нагрева корпуса 39 °С, затем температура начала расти и достигла пика к 10-й минуте — 61 °С. Спустя непродолжительный период к 11-й минуте 46-й секунде температура снизилась до 44 °С. Таким образом, данный образец демонстрирует период нагрева с последующим его охлаждением, вызванным аварийным срабатыванием, произошедшим на 11-й минуте 46-й секунде.

Температура образца № 6 на 5-й минуте составила 55 °С, а к 10-й минуте поднялась до 77 °С. После этого наблюдается небольшое понижение температуры до 75 °С, к 12-й минуте 34-й секунде возник аварийный режим работы.

Образец № 7 спустя 5 минут после включения в сеть нагрелся до температуры 57 °С. В период с 5-й по 10-ю минуту наблюдается повышение температуры до 70 °С. К 12-й минуте 4-й секунде зафиксирована температура 78 °С.

Аварийное срабатывание в образце № 3 не произошло. При этом на протяжении 2-часового эксперимента температура нагрева корпуса то повышалась, то снижалась, в диапазоне температур от 31 °С до 44 °С образец продолжал функционировать, заряжая мобильный телефон. Следует отметить, что периодическое понижение температуры, возможно, и позволило данному образцу не выйти на аварийный режим работы.

Описания серии экспериментов были сведены в табл. 2.

Исходя из вышеприведенных результатов серии экспериментов, можно сделать

вывод, что образцы № 1, 2 и 5 имеют низкий уровень защиты к воздействию аварийного режима работы электросети, а именно перегрузки по напряжению.

Образцы № 3, 4, 6 и 7 более устойчивы к аварийному срабатыванию.

Зафиксированные максимальные температуры, соответствующие аварийному ре-

жиму работы — перегрузке по напряжению, отражают тепловое состояние компонентов устройства и свидетельствуют о том, что перегрузка по напряжению приводит к повышению температуры нагрева корпуса, что в свою очередь приводит к аварийному режиму. При данных условиях может возникнуть пожароопасная ситуация.

Таблица 2
Признаки, наблюдаемые в ходе проведения эксперимента по перенапряжению

Table 2
Signs observed during an overexertion experiment

Образец Sample	Визуальное описание эксперимента Visual description of the experiment
№ 1	На 2-й секунде наблюдали резкий хлопок сразу после включения в сеть. Остаточная температура составила 56 °C For 2 sec we observed a sharp pop immediately after switching on the network. The residual temperature was 56 °C
№ 2	На 5-й секунде наблюдали резкий хлопок. Остаточная температура составила 55 °C For 5 sec. A sharp pop was observed. The residual temperature was 55 °C
№ 3	На 120-й минуте работы температура нагрева зарядного устройства составила 31 °C. Аварийного режима не произошло For 120 minutes of operation, the charger's heating temperature was 31 °C. There was no emergency mode
№ 4	На 11-й минуте 51-й секунде произошли вспышка и разлет искр. Зарядное устройство перестало заряжать. Остаточная температура составила 44 °C For 11 min 51 sec. There was a flash and a scattering of sparks. The charger has stopped charging. The residual temperature was 44 °C
№ 5	Наблюдали резкий хлопок на 3-й секунде. Остаточная температура составила 56 °C A sharp pop was observed for 3 sec. The residual temperature was 56 °C
№ 6	На 12-й минуте 34-й секунде произошел резкий хлопок. Остаточная температура составила 75 °C At 12 min 34 sec sharp pop. The residual temperature was 75 °C
№ 7	На 12-й минуте 4-й секунде работы присутствовал запах гари. Остаточная температура составила 78 °C For 12 min 4 sec. There was a burning smell inside. The residual temperature was 78 °C

Однако образец № 3 в течение двух часов эксперимента показал свою устойчивую работоспособность. Поэтому для него было проведено дополнительное исследование с соблюдением прежних условий и созданием внешнего теплового нагрева. Для создания внешнего источника тепла мы ис-

пользовали спиртовку, температура факела которой достигла около 600 °C, что позволило смоделировать ситуацию, приближенную к условиям реального пожара.

В ходе данного эксперимента корпус начал плавиться, появилось открытое горение, которое перешло на корпус удлинителя,

и появились капающие горячие капли. Этот факт вызывает серьезные опасения, поскольку, если бы в непосредственной близости находились горючие материалы, это могло бы привести к стремительному развитию пожара.

Также в момент проведения эксперимента на 1-й минуте 23-й секунде был зафиксирован щелчок, характерный для срабатывания аварийного режима работы.

Несмотря на устойчивость образца № 3 к повышенному напряжению, внешнее тепловое воздействие привело его в негодность.

Исследование методом оптической микроскопии

Для проведения лабораторного исследования и детального изучения состояния

электронных компонентов и токоведущих элементов, после моделирования перенапряжения, образцы зарядных устройств были разобраны.

Исследование образцов, полученных в ходе экспериментов по моделированию перегрузки по напряжению в зарядных устройствах, проводилось с использованием стереомикроскопа «Альтами СМ0870» при увеличениях до 400 крат. Результаты представлены на рис. 1–7.

На рис. 1 показаны следы повреждений, обнаруженные на металлической пластине образца № 1 при напряжении 380 В. Анализ поверхности платы выявил: каплеобразную деформацию припоя, оплавление металлической пластины и оплавление металлической пластины с локальными шарообразными наплывами.

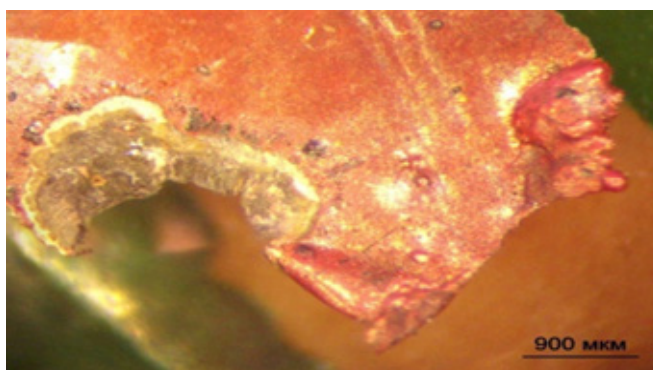


Рис. 1. Повреждения на образце № 1: оплавление металлической пластины с локальными шарообразными наплывами

Fig. 1. Damage to sample No. 1: melting of a metal plate with local spherical deposits

На рис. 2 представлены следы повреждений на поверхности конденсатора образца № 2 при напряжении 380 В. На верхней части цилиндрического корпуса конденсатора наблюдаются вздутие и разрыв насечки. Насечки предназначены для предотвращения взрыва корпуса конденсатора: они разрушаются под действием избыточного давления, выпуская пары электролита наружу.

На рис. 3 представлен крупный план шарообразных частиц, образовавшихся в образце № 3 при напряжении 380 В. Также при анализе повреждений выявили оплавление катушки и оплавление дорожки.

На рис. 4 зафиксированы следы повреждений на дорожке образца № 4 при напряжении 380 В. На поверхности платы обнаружены: разрыв и оплавление

с образованием шарообразных частиц на металлической дорожке и оплавление металлической пластины.

На рис. 5 представлены следы повреждений на металлической пластине образца № 5 при напряжении 380 В в виде оплавления металлической пластины с локальными шарообразными оплавлениями.

На рис. 6 представлены следы повреждений на плате образца № 6 при напряжении 380 В в виде оплавления припоя. На катушке признаков аварийного режима работы не обнаружено.

На образце № 7 при напряжении 380 В выявлены следы повреждений в виде оплавлений и деформации припоя.



Рис. 2. Повреждения на образце № 2: в верхней части цилиндрического корпуса конденсатора наблюдается вздутие и разрыв насечки

Fig. 2. Damage on sample No. 2: there is a swelling and rupture of the notch in the upper part of the cylindrical condenser body

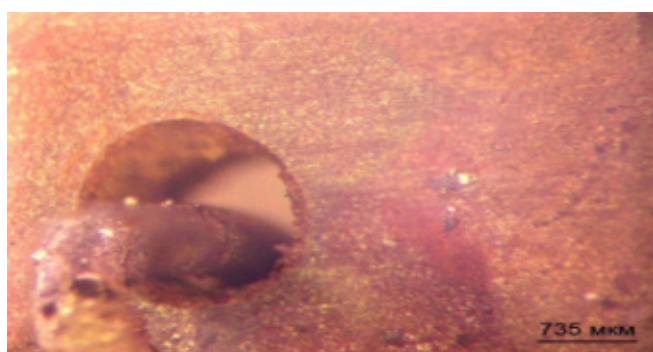


Рис. 3. Повреждения на образце № 3: крупный план шарообразных частиц

Fig. 3. Damage on sample No. 3: Close-up of spherical particles

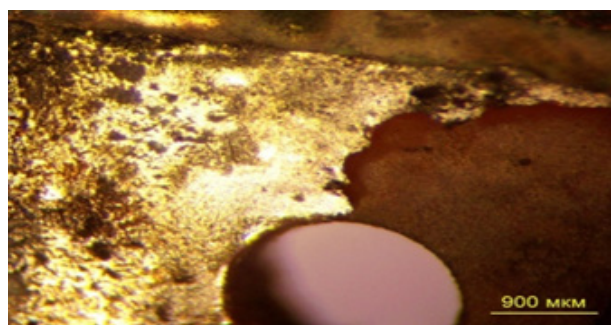


Рис. 4. Повреждения на образце № 4: разрыв и оплавление с образованием шарообразных частиц на металлической дорожке

Fig. 4. Damage to sample No. 4: rupture and melting with the formation of spherical particles on the metal track

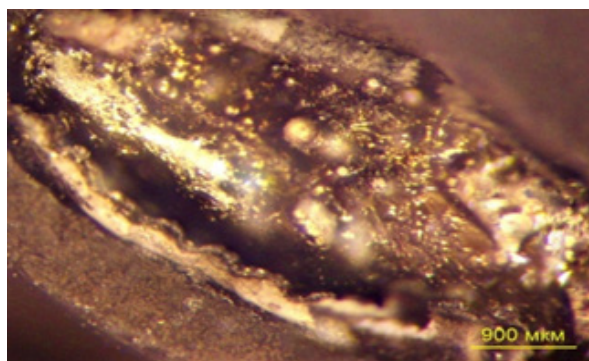


Рис. 5. Повреждения на образце № 5: оплавления металлической пластины с локальными шарообразными оплавлениями

Fig. 5. Damage to sample No. 5: metal plate reflows with local spherical reflows

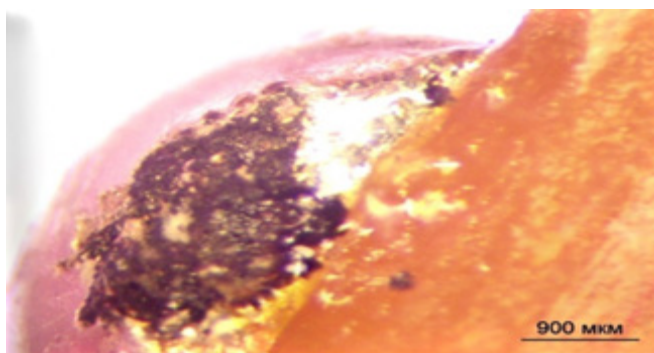


Рис. 6. Повреждения на образце № 6: на плате оплавление припоя

Fig. 6. Damage on sample No. 6: solder melting on the board

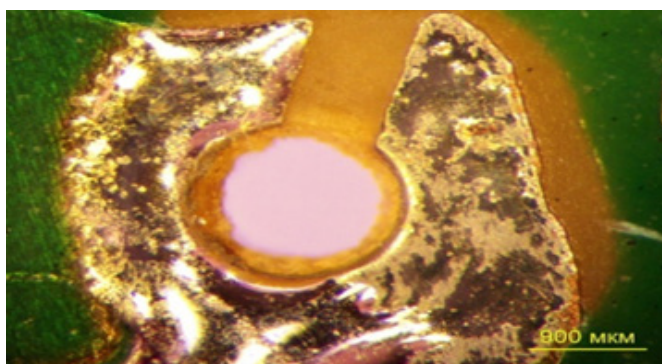


Рис. 7. Повреждения на образце № 7: оплавления и деформации припоя

Fig. 7. Damage on sample No. 7: solder reflow and deformation

Таким образом, исследование инструментальным лабораторным методом оптической микроскопии позволило выявить признаки термических повреждений, которые образуются на компонентах зарядных устройств при перегрузке по напряжению. Полученные повреждения были систематизированы и представлены в табл. 3.

Все вышеперечисленные повреждения, зафиксированные с помощью стереомикроскопа, сформировавшиеся в зарядных устройствах, характеризуют процесс перегрузки по напряжению.

Исследование показало, что на образцах № 1, 6 и 7 наблюдались повреждения в виде оплавления припоя. На образцах

№ 1, 4 и 5 были зафиксированы повреждения в виде оплавления на металлической пластине. На образцах № 3–5 наблюдались повреждения в виде шарообразных частиц. На образцах № 3 и 4 произошло

оплавление дорожек, при этом только на образце № 3 было зафиксировано оплавление катушки. Образец № 2 продемонстрировал повреждения на поверхности конденсатора.

Таблица 3
Термические повреждения зарядных устройств

Table 3
Thermal damage to chargers

Повреждения Damage	Образец Sample						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Оплавления припоя Solder reflow	+					+	+
На поверхности конденсатора On the surface of the capacitor		+					
Оплавление на металлической пластине Reflow on a metal plate	+			+	+		
Наличие шарообразных частиц The presence of spherical particles			+	+	+		
Оплавление дорожки Melting of the track			+	+			
Оплавление катушки Melting of the coil			+				

Использование стереомикроскопа обеспечивает детальное изучение и фиксацию микроструктурных изменений при увеличениях от 8 до 70 крат, что подтверждает его эффективность для анализа повреждений, вызванных перегрузкой по напряжению.

Выводы

На основании проведенной работы были сделаны следующие выводы.

Экспериментально определены температуры на поверхности зарядных устройств при перегрузке по напряжению, нагрев составил до 78 °С.

Также образец № 3 (f+ Charger Model TA8751) показал свою устойчивую работоспособность к аварийным режимам работы.

Методом оптической микроскопии зафиксированы термические повреждения на электронной плате, сформировавшиеся при перегрузке по напряжению в исследуемых образцах. К числу таких признаков следует отнести: оплавление припоя, шарообразные частицы на печатных контактах, разрыв насечек конденсаторов. Данные признаки могут быть использованы при поиске признаков аварийного режима перенапряжения и анализе электро-технической версии причины пожара.

Дальнейшее изучение данной проблемы диктуется необходимостью мониторинга

стремительно растущего многообразия потребительской и промышленной электроники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чешко И. Д., Плотников В. Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара : в 2 кн. СПб., 2010.
2. Исследование влияния аварийных режимов работы электрических сетей на зарядные устройства / Е. В. Федосеев [и др.] // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции. Иваново, 2025. С. 491–495. EDN: CXGEZT.
3. Yi H., Shen X., Wang J. Shortest path planning for mobile chargers // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1861. No. 1. P. 012104. DOI: 10.1088/1742-6596/1861/1/012104. EDN: KTSPEZ.
4. Kosykh E. A. AC Voltage Stabilizer for Overload and Overvoltage in Low-Voltage Networks // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2021. Novosibirsk, 2021. P. 125–129. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647655. EDN: EJPVBP.
5. Мокряк А. В. Анализ причин и возможности предотвращения электротехнических пожаров // Наукосфера. 2022. № 11-2. С. 209–213. EDN: KABRLZ.
6. Шагов Е. М. К вопросу о комплексной пожарно-технической и электро-технической экспертизе при установлении причины пожара // International Law Journal. 2022. Т. 5, № 7. С. 28–33. EDN: OCEUVK.
7. Tsovilis T. E., Topcagic Z. DC Overload Behavior of Low-Voltage Varistor-Based Surge Protective Devices // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35. No. 5. P. 2541–2543. DOI: 10.1109/tpwrd.2020.2965764. EDN: YVGMSE.
8. Богданов А. А. Особенности экспертизы аварийных режимов работы электросетей // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Железногорск, 2024. С. 18–21. EDN: BFGERJ.
9. Petrochenkov A. B., Romodin A. V., Leyzgold D. Y. Approach to calculation the parameters of emergency modes of electric grid using topological list // Journal of Physics: Conference Series : 2019 International Conference on Innovation Energy. Perm, 2019. P. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1415/1/012009. EDN: SFWNJU.
10. A Hybrid Overload Current Limiting and Short Circuit Protection Scheme For Voltage Mode Inverters // International Journal of Renewable Energy Research. 2020. No. v10i1. DOI: 10.20508/ijrer.v10i1.10234.g7887. EDN: RHYCFN.
11. Экспресс-методы экспертного исследования неорганических материалов при установлении очага пожара / Ю. Н. Елисеев [и др.]. СПб., 2019. 61 с. EDN: ZDADAL.
12. Laboratory calibration and application of the airborne thermal infrared hyperspectral imager (ATHIS) / Li Chunlai [et al.] // Infrared and Laser Engineering. 2020. Vol. 49. No. 5. P. 20190117. DOI: 10.3788/irla.20_2019-0117. EDN: EIRIPQ.

13. Vlasov A. B. Method for determining the quality of cable inlets sealant using infrared thermography // Вестник МГТУ. 2018. Vol. 21. No. 4. P. 632–637. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-4-632-637. EDN: YTIAUH.

14. Application of Infrared Thermal Imager to measure the temperature of Back-Up Structure of the TianMa radio telescope / Li Fu [et al.] // Experimental Astronomy. 2023. Vol. 56. No. 1. P. 223–238. DOI: 10.1007/s10686-023-09895-8. EDN: ONVVWB.

15. Review on Infrared Imaging Technology / F. Hou [et al.] // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 18. P. 11161. DOI: 10.3390/su141811161. EDN: PGAEZE.

REFERENCES

1. Cheshko I. D., Plotnikov V. G. Analysis of expert versions of fire occurrence : in 2 books. St. Petersburg, 2010.

2. Investigation of the influence of emergency modes of operation of electric networks on chargers / E. V. Fedoseev [et al.] // Modern fireproof materials and technologies : proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference. Ivanovo, 2025. P. 491–495. EDN: CXGEZT.

3. Yi H., Shen X., Wang J. Shortest path planning for mobile chargers // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1861. No. 1. P. 012104. DOI: 10.1088/1742-6596/1861/1/012104. EDN: KTSPEZ.

4. Kosykh E. A. AC Voltage Stabilizer for Overload and Overvoltage in Low-Voltage Networks // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2021. Novosibirsk, 2021. P. 125–129. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647655. EDN: EJPVBP.

5. Mokryak A. V. Analysis of the causes and possibilities of preventing electrical fires // Naukosfera. 2022. No. 11-2. P. 209–213. EDN: KABRLZ.

6. Shagov E. M. On the issue of comprehensive fire-technical and electrotechnical expertise in determining the cause of a fire // International Law Journal. 2022. Vol. 5. No. 7. P. 28–33. EDN: OCEUVK.

7. Tsovilis T. E., Topcagic Z. DC Overload Behavior of Low-Voltage Varistor-Based Surge Protective Devices // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35. No. 5. P. 2541–2543. DOI: 10.1109/tpwrd.2020.2965764. EDN: YVGMSE.

8. Bogdanov A. A. Features of expertise of emergency modes of operation of electric grids // Young scientists in solving urgent safety problems : proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference. Zheleznogorsk, 2024. P. 18–21. EDN: BFGERJ.

9. Petrochenkov A. B., Romodin A. V., Leyzgold D. Y. Approach to calculation the parameters of emergency modes of electric grid using topological list // Journal of Physics: Conference Series : 2019 International Conference on Innovation Energy. Perm, 2019. P. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1415/1/012009. EDN: SFWNJU.

10. A Hybrid Overload Current Limiting and Short Circuit Protection Scheme For Voltage Mode Inverters // International Journal of Renewable Energy Research. 2020. No. v10i1. DOI: 10.20508/ijrer.v10i1.10234.g7887. EDN: RHYCFN.

11. Express methods of expert examination of inorganic materials in the establishment of a fire source / Yu. N. Eliseev [et al.]. St. Petersburg, 2019. 61 p. EDN: ZDADAL.
12. Laboratory calibration and application of the airborne thermal infrared hyperspectral imager (ATHIS) / Li Chunlai [et al.] // Infrared and Laser Engineering. 2020. Vol. 49. No. 5. P. 20190117. DOI 10.3788/irla.20_2019-0117. EDN: EIRIPQ.
13. Vlasov A. B. Method for determining the quality of cable inlets sealant using infrared thermography // Vestnik of MSTU. 2018. Vol. 21. No. 4. P. 632–637. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-4-632-637. EDN: YTIAUH.
14. Application of Infrared Thermal Imager to measure the temperature of Back-Up Structure of the TianMa radio telescope / Li Fu [et al.] // Experimental Astronomy. 2023. Vol. 56. No. 1. P. 223–238. DOI: 10.1007/s10686-023-09895-8. EDN: ONVVWB.
15. Review on Infrared Imaging Technology / F. Hou [et al.] // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 18. P. 11161. DOI: 10.3390/su141811161. EDN: PGAEZE.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сысоева Татьяна Павловна, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., д. 149); РИНЦ ID: 3683-2066; Scopus Author ID: 57216502671; Researcher ID: AAE-9733-2022; ORCID: 0000-0003-0230-465; e-mail: syisik@mail.ru

Мокряк Андрей Юрьевич, канд. техн. наук, начальник отдела экспертизы пожаров и организации подготовки экспертов исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., д. 149); SPIN-код: 2339-7366; Author ID: 817195; e-mail: mokand7@mail.ru

Мокряк Анна Васильевна, научный сотрудник исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., д. 149); SPIN-код: 8987-0146; Author ID: 984582; e-mail: mokryakanna@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Andrey Y. Mokryak, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Fire Expertise and Organization of Expert Training at the Research Center for Fire Expertise, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN-code: 2339-7366; Author ID: 817195; e-mail: mokand7@mail.ru

Anna V. Mokryak, researcher at the Research Center for Fire Expertise, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN-code: 8987-0146; Author ID: 984582; e-mail: mokryakanna@mail.ru

УДК 614.841.41

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА ГОРЮЧИХ ГАЗОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

Аннотация. На фоне продолжающегося активного распространения и расширения областей применения литий-ионных аккумуляторов в России и за рубежом продолжают фиксироваться случаи пожаров, вызванных их самовозгоранием. Для оценки пожарных рисков при хранении, эксплуатации или транспортировке данного вида горючей нагрузки на объектах защиты представляется целесообразным качественно и количественно оценить состав продуктов пиролиза химически активных компонентов литий-ионных аккумуляторов батареи. Задача определения состава газообразных продуктов пиролиза литий-ионных аккумуляторных батарей на момент, предшествующий их прорыву из корпуса батареи и воспламенению, может быть решена с применением методов термодинамического моделирования с использованием предельных принципов термодинамики. Информация о составе пиролизных газов позволит создать модель горения литий-ионных аккумуляторных батарей, представляющую данный процесс как горение струи горючих газов.

Ключевые слова: пожарная безопасность, литий-ионные аккумуляторы, опасность взрыва, свойства горючей нагрузки, тепловой разгон, модель горения, оценка пожарных рисков

Для цитирования: Терентьев Д. И., Сатюков Р. С., Тикина И. В. Термодинамическое моделирование состава горючих газов, образующихся при пиролизе литий-ионных аккумуляторных элементов // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 34–45.

THERMODYNAMIC MODELING OF THE COMPOSITION OF COMBUSTIBLE GASES FORMED DURING THE PYROLYSIS OF LITHIUM-ION BATTERY CELLS

Dmitriy I. Terentiev, Roman S. Satukov, Irina V. Tikina
UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. Against the background of the ongoing active spread and expansion of the areas of application of lithium-ion batteries in Russia and abroad, cases of fires caused by their spontaneous combustion continue to be recorded. In order to assess the fire risks associated with the storage, operation, or transportation of this type of combustible load at protected facilities, it is advisable to qualitatively and quantitatively assess the composition of the pyrolysis products of the chemically active components of lithium-ion battery packs. The task of determining the composition

of the gaseous products of the pyrolysis of lithium-ion batteries at the moment preceding their breakthrough from the battery case and ignition can be solved using thermodynamic modeling methods using the limiting principles of thermodynamics. Information about the composition of the pyrolysis gases will allow to create a model of combustion of lithium-ion batteries, representing this process as the combustion of a jet of combustible gases.

Keywords: fire safety, lithium-ion batteries, explosion hazard, properties of combustible load, thermal acceleration, combustion model, assessment of fire risk

For citation: Terentiev D. I., Satukov R. S., Tikina I. V. Thermodynamic modeling of the composition of combustible gases formed during the pyrolysis of lithium-ion battery cells // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 34–45.

Общие представления о химических взаимодействиях компонентов кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных элементов при развитии теплового разгона

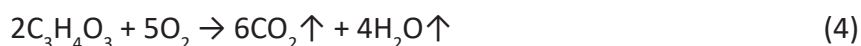
Считается, что выделение кислорода из электродной массы является решающим

фактором для старта теплового разгона. Применительно к кобальтсодержащим литий-ионным аккумуляторным элементам (ЛИАЭ), например, Samsung ICR форм-фактора 18650, источником появления кислорода внутри герметичного ЛИАЭ может быть распад электродной массы кобальтата лития LiCoO_2 ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Co}_2\text{O}_3$), предположительно, по схеме:



Выделение кислорода из оксидной электродной массы должно приводить к окислению органического электролита

(диметилкарбоната, диэтилкарбоната или этиленкарбоната), например, при полном окислении:



Эти реакции также являются экзотермическими.

С учетом того, что в аккумуляторном элементе, подверженном термическому разгону, полипропиленовый сепаратор, разделяющий электродные массы, с высокой вероятностью оказывается поврежденным (по крайней

мере, расплавленным), выглядит обоснованным предположение о распространении взаимодействий и на другие химически активные компоненты ЛИАЭ, в частности, восстановленные формы металлов (Li в углеродной электродной массе и Al). В этом случае дальнейший рост температуры внутри ЛИАЭ

должен приводить к увеличению количества межкомпонентных взаимодействий.

Следует отметить, что общая масса литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ), в том числе электромобилей, может достигать нескольких сотен килограммов, и они имеют составную структуру [1]. Такие батареи могут быть составлены из нескольких тысяч ЛИАЭ форм-фактора 18650, например, Тесла S может иметь батарею, составленную, в зависимости от модификации, из 5375 или 7104 ЛИАЭ. Установленные сборки аккумуляторных элементов представляют собой блоки, из которых собираются несколько модулей, образующих батарею, например, в последнем случае элементы соединены по схеме «6s74p». При такой составной компоновке пожар может начаться в каком-либо отдельном отсеке ЛИАБ, элементы которого по какой-либо причине перешли в критическое состояние. В этом случае уцелевшие отсеки ЛИАБ подвергнутся мощному внешнему нагреву от пожара, распространяющегося по электромобилю, что приведет к пиролизу (термическому разложению) компонентов основной массы сборок (блоков) аккумуляторных элементов и дальнейшему распространению горения [2].

Выглядит вполне обоснованным предположение о том, что пиролиз органических компонентов (электролит, сепаратор, пластиковые части предохранительного клапана) может приводить, помимо образования паров воды и углекислого газа по реакциям (2–4), также к образованию горючих газов — метана, угарного газа и молекулярного водорода [3, 4]. Образование и накопление этих газообразных продуктов неизбежно ведет к росту внутреннего давления, что в последующем провоцирует разгерметизацию элемента, ин-

тенсивный выброс и возгорание скоростной искро-газовой струи [5–8].

Очевидно, что для подробного описания высокотемпературного состояния системы «компоненты ЛИАЭ при пиролизе» на момент, предшествующий разгерметизации, из-за большого количества как предполагаемых участников, так и продуктов этих взаимодействий следует использовать специализированные расчетные методы.

Постановка компьютерного эксперимента

Оценка высокотемпературных взаимодействий между компонентами аварийного литий-ионного аккумуляторного элемента может быть выполнена с применением термодинамического моделирования. Этот метод позволяет качественно и количественно оценить равновесный состав продуктов высокотемпературного пиролиза герметичного ЛИАЭ исходя из предельных принципов термодинамики [9].

Для выполнения расчета равновесного высокотемпературного состава исследуемой системы был использован программный комплекс Terra. В состав данного программного комплекса входят расширенная база данных термодинамических свойств индивидуальных веществ (создана на основе базы «ИВТАНТЕРМО») и расчетный модуль, использующий критерий максимизации энтропии системы для численного поиска значений параметров ее равновесного состояния.

В таблице приведены количества компонентов кобальтсодержащего ЛИАЭ, предположительно способных взаимодействовать друг с другом при пиролизе. Эти данные были использованы для задания к расчету исходного состава системы.

Предварительно в базу данных программного комплекса Terra была добавлена информация о наборе термодинамических свойств кобальтата лития LiCoO_2 , полученная из базы данных HSC 9. Наборы свойств других предполагаемых участников взаимодействий, в т. ч. вышеупомянутых, уже присутствовали в базе данных программного комплекса.

Термодинамическое моделирование высокотемпературного равновесного состава

исследуемой системы было выполнено в температурном интервале 373–1073 К, с шагом 25 градусов.

Для оценки влияния высокого давления на равновесный состав продуктов пиролиза было выполнено два расчета — для давлений 0,1 и 0,5 МПа.

Возможность образования конденсированных растворов для продуктов взаимодействия в расчете не рассматривалась.

Таблица
Компоненты литий-ионного аккумулятора Samsung ICR 30A 18650,
предположительно способные к взаимодействиям при пиролизе

Table
Components of the Samsung ICR 30A 18650 lithium-ion battery
that are potentially capable of pyrolysis interactions

№	Наименование компонента Component name	Химическая формула Chemical formula	Масса, г Weight, g	Массовая доля, % Mass fraction, %
1	Пластиковые части клапана и оболочки, сепаратор Plastic parts of the valve and shell, separator	$\text{C}_3\text{H}_6(\text{n})$	2	6
2	Электролит (диметилкарбонат) Electrolyte (dimethyl carbonate)	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$	6	18
3	Углеродная масса Carbon mass	C	8	24
4	Кобальтат лития Lithium cobaltate	LiCoO_2	15	45
5	Восстановленная форма лития The reconstituted form of lithium	Li	1	3
6	Алюминиевая фольга Aluminum foil	Al	1(2)	3
7	Разбавитель газовой фазы (по требованию к расчету) Gas phase diluent (upon request)	Ar	0,3	1

Результаты термодинамического моделирования

На рис. 1 и 2 показаны температурные зависимости равновесного состава газовой фазы в высокотемпературной системе «ЛИАЭ

Samsung ICR 30A 18650» при давлениях 1 и 5 атм. Согласно полученным результатам моделирования, в обоих расчетах основными компонентами газовой фазы являются метан и молекулярный водород, т. е. газовую фазу образуют продукты разложения органических

компонентов ЛИАЭ (сепаратора, электролита, пластиковых элементов). При этом в температурном интервале 373–773 К при давлении 1 атм ведущим компонентом газовой среды является метан. При дальнейшем повышении равновесной температуры его начинает замещать молекулярный водород.

При повышении равновесного давления с 1 до 5 атм температурный интервал, в котором метан является лидирующим компонентом газовой фазы, становится шире: 373–873 К.

Из рис. 1 и 2 можно отметить, что повышение давления влияет на расположение

высокотемпературного интервала конверсии метана — при 1 атм наблюдается более интенсивное потребление метана с образованием угарного газа, конденсированного углерода и углекислого газа, при этом интенсивное увеличение содержания CO , CO_2 становится заметным с 973 К. При давлении 5 атм интенсивный рост содержания CO , CO_2 начинается только выше 1 048 К, т. е. рост равновесного давления в системе приводит к снижению образования молекулярного водорода и расширению температурного диапазона, в котором главным компонентом газовой фазы является метан.

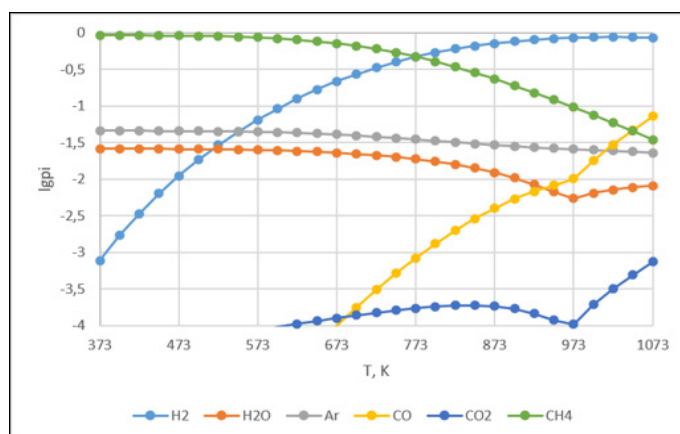


Рис. 1. Температурная зависимость равновесного состава газовой фазы в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 1 атм

Fig. 1. Temperature dependence of the equilibrium composition of the gas phase in the high-temperature system «Samsung ICR 30A 18650 LRE» at a pressure of 1 atm

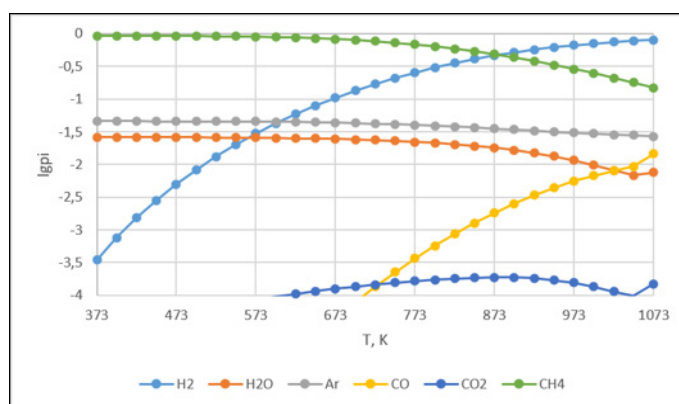


Рис. 2. Температурная зависимость равновесного состава газовой фазы в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 5 атм

Fig. 2. Temperature dependence of the equilibrium composition of the gas phase in the high-temperature system «Samsung ICR 30A 18650 LRE» at a pressure of 5 atm

В целом результаты моделирования температурной зависимости равновесного состава газовой фазы позволяют сделать следующие выводы:

1. С точки зрения предельных принципов термодинамики, процесс термического разложения компонентов внутри ЛИАЭ приводит к образованию смеси метана и водорода.

2. Соотношение метан/водород в газовой смеси сильно зависит от температуры в системе.

3. При увеличении равновесного давления в системе с 1 до 5 атм температурный

интервал, в котором лидирующим компонентом газовой фазы является метан, расширяется на 100 градусов и соответствует диапазону 373–873 К.

На рис. 3 и 4 показаны балансы распределения водорода между компонентами в исследуемой системе при равновесном давлении 1 и 5 атм. Поскольку водород как элемент входит в состав обоих основных горючих компонентов газовой фазы, рис. 3 и 4 следует воспринимать как температурную зависимость компонентного состава газообразного топлива, имеющегося в данной горючей нагрузке.

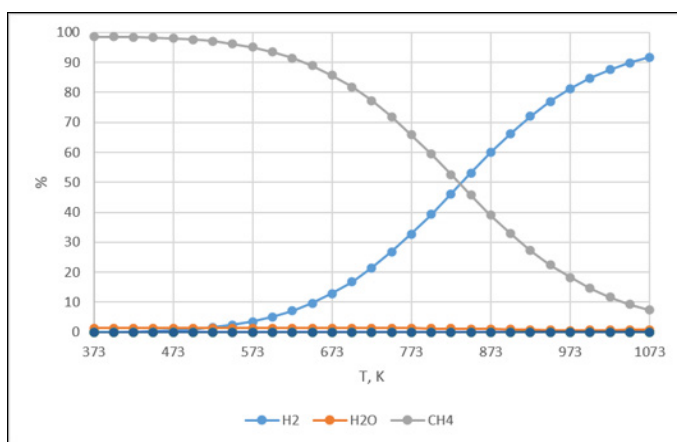


Рис. 3. Баланс водорода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 1 атм

Fig. 3. Hydrogen balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 1 atm

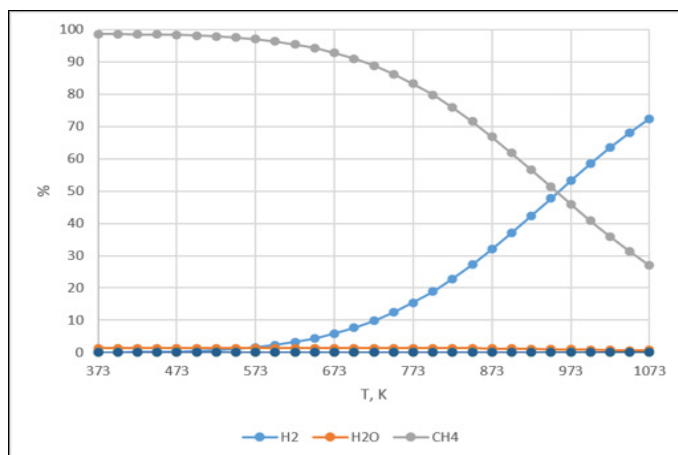


Рис. 4. Баланс водорода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 5 атм

Fig. 4. Hydrogen balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 5 atm

Также следует обратить внимание, что ожидаемое из реакций (2–4) образование паров воды, согласно результатам моделирования, оказалось полностью устранено за счет их взаимодействия с активными ме-

таллами в системе: при окислении парами воды лития получился конденсированный карбонат лития, алюминия — конденсированный оксид Al_2O_3 , а водород вернулся в состав топливных газов.



Следует отметить, что протекание реакции (5) в интервале температур 373–933 К более вероятно, чем реакции (6), поскольку на практике наличие оксидной пленки на алюминиевой фольге способно в определенной степени удерживать алюминий от взаимодействия с другими химически активными компонентами за счет ограничений химической кинетики.

Из рис. 3 и 4 также можно видеть ранее отмеченный эффект повышения стабильности содержания метана как основного компонента газовой фазы при увеличении равновесного давления. Если при равновесном давлении 1 атм паритет между метаном и молекулярным водородом достигается в области ~830 К, то при давлении 5 атм содержание водорода в этих газах сравнивается при ~950 К.

На рис. 5 и 6 показаны балансы кислорода в исследуемой системе при равновесных давлениях 1 и 5 атм. Данные графики демонстрируют, что в случае вовлечения в описываемые высокотемпературные взаимодействия химически активных металлов практически весь кислород системы оказывается в составе оксидных или солевых конденсированных соединений этих металлов. При равновесном давлении 1 атм в широком температурном диапазоне 373–998 К 88 % кислорода содержится в виде кон-

денсированного карбоната лития Li_2CO_3 , 11 % — в виде конденсированного оксида алюминия Al_2O_3 , 0,9 % — в виде паров воды. Изменения в таком распределении кислорода становятся заметными только при повышении равновесной температуры выше 1 023 К за счет термического разложения карбоната лития с образованием преимущественно угарного газа CO и конденсированного оксида лития Li_2O .

Из рис. 5 и 6 следует, что при повышении равновесного давления с 1 до 5 атм увеличивается стабильность оксидных и солевых конденсированных фаз, в результате чего в области температур 973–1073 К практически отсутствуют заметные на рис. 5 признаки термического разложения карбоната лития.

Из балансов кислорода также следует, что, с точки зрения термодинамического моделирования, алюминиевая электродная фольга еще на стадии пиролиза полностью окисляется кислородом, поставляемым из электродной массы кобальтата лития. Это противоречит результатам натурных экспериментов, демонстрирующих горение частиц алюминия после разгерметизации аккумуляторных элементов на воздухе с образованием характерного фонтана искр. Таким образом, процесс искрообразования в модели горения следует оценивать дополнительными средствами.

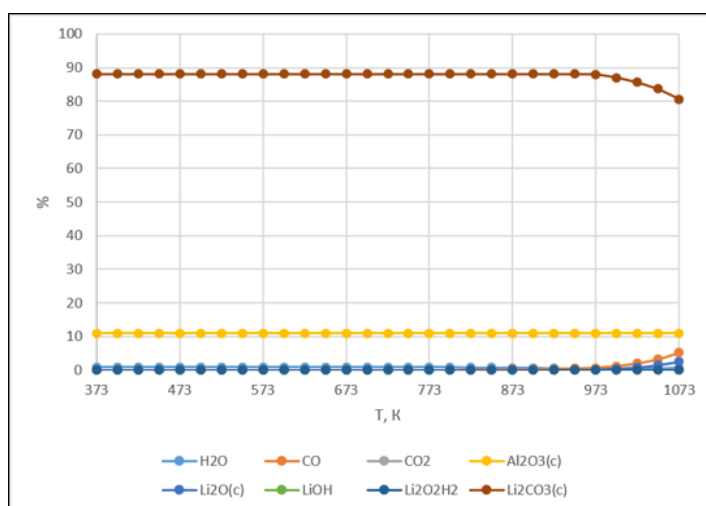


Рис. 5. Баланс кислорода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 1 атм

Fig. 5. Oxygen balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 1 atm

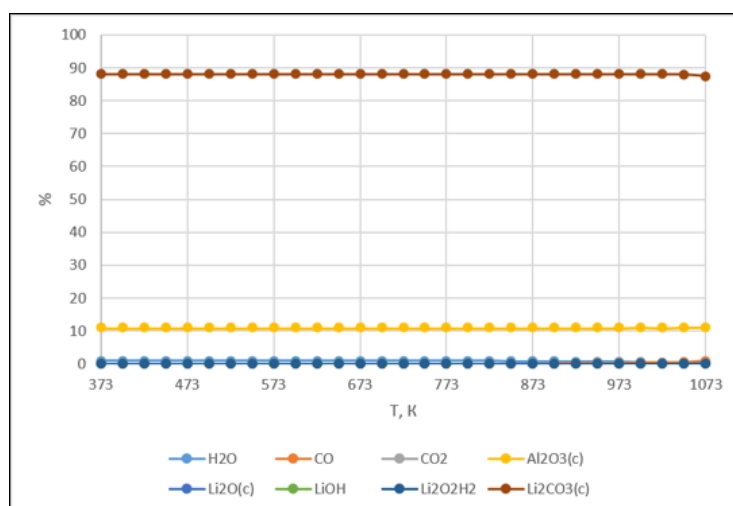


Рис. 6. Баланс кислорода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 5 атм

Fig. 6. Oxygen balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 5 atm

На рис. 7 и 8 показаны балансы углерода в исследуемой системе при равновесных давлениях 1 и 5 атм.

Из рис. 7 следует, что при давлении 1 атм в температурном интервале 373–723 К конденсированная углеродная фаза демонстрирует выраженную химическую инертность. Примерно 15 % углерода системы содержится в виде конденсированного кар-

боната лития, столько же — в виде метана, остальные 70 % представлены конденсированной углеродной фазой.

Также из рис. 7 следует, что в температурном интервале 673–1023 К наблюдается уменьшение содержания метана, продуктами взаимодействия в этом случае являются молекулярный водород и конденсированный углерод:



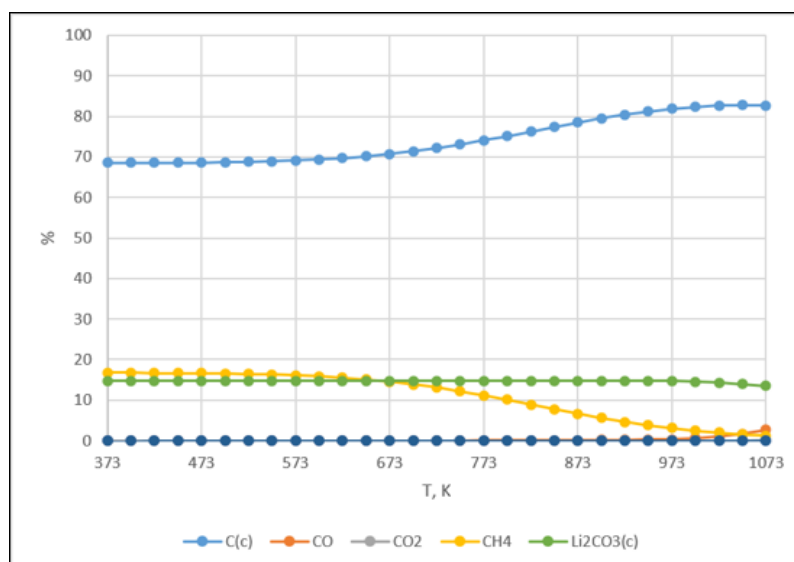


Рис. 7. Баланс углерода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 1 атм
 Fig. 7. Carbon balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 1 atm

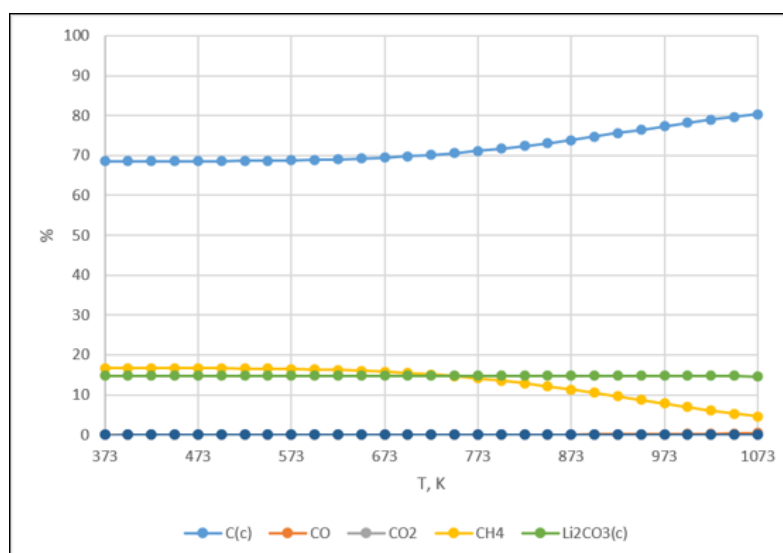


Рис. 8. Баланс углерода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 5 атм
 Fig. 8. Carbon balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 5 atm

Данные рис. 7 и 8 свидетельствуют, что при увеличении равновесного давления с 1 до 5 атм изменения в распределении углерода в системе выражаются в снижении степени конверсии метана в температурном интервале 873–1073 К, которая теперь преимущественно протекает по схеме (7), в результате чего образование угарного газа по схеме (8) оказывается пренебрежимо малым.

Выводы

1. Результаты термодинамического моделирования состава газообразных продуктов пиролиза аккумуляторных элементов Samsung ICR 30A 18650 позволяют рассматривать поврежденную литий-ионную батарею как емкость, в которой под давлением скапливаются готовые к воспламенению горючие газы, т. е. процесс рассматривается

с точки зрения пожара класса С. Основным компонентом газовой смеси, продуцируемой пиролизом компонентов литий-ионных аккумуляторов, можно считать метан, дополнительным — молекулярный водород. Масса продуцируемых пиролизом горючих газов составляет 20–25 % от общей массы литий-ионной аккумуляторной батареи в соответствии с исходным содержанием в ней органических материалов (электролита, сепаратора, других пластиковых частей).

2. Результаты термодинамического моделирования состава пиролизных газов в литий-ионных аккумуляторных батареях представляют собой предельное представление о потенциале горения данной горючей нагрузки, т. е. не учитывают возможность кинетических ограничений в ходе реализации взаимодействий компонентов, способных ограничивать накопление горю-

чих компонентов в системе. С точки зрения расчетов пожарных рисков, такой подход представляется оптимальным, поскольку является наихудшим сценарием пожара.

Таким образом, основные положения модели горения литий-ионных аккумуляторных батарей, необходимой для расчетов пожарных рисков, могут быть приняты из факта принадлежности данной горючей нагрузки к пожарам класса С.

Следует отметить, что из-за выброса части электродных масс, сопровождающего прорыв и воспламенение пиролизных газов, а также горения частей алюминиевого электрода, для учета специфики динамики дымообразования и токсичности газовой среды желательно использовать в модели горения соответствующие дополнения, позволяющие повысить точность прогнозирования динамики опасных факторов пожара.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. В России к 2030 году будет создана новая высокотехнологичная отрасль по производству электромобилей // Министерство экономического развития Российской Федерации : официальный сайт. URL: <https://clck.ru/3QArMe> (дата обращения: 25.05.2025). Дата публикации: 23.08.2021.
2. Предварительное исследование пожароопасных свойств литий-ионных аккумуляторов / Д. И. Терентьев [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 3 (44). С. 25–34.
3. Орлов О. И., Комельков В. А., Сорокин Д. В. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 177–189.
4. Елисеев Ю. Н., Мокряк А. В. Анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2020. № 3. С. 14–17.
5. Crafts C., Borek T., Mowry C. Safety Testing of 18650-Style Lithium-ion Cells. Sandia National Laboratories, SAND2000-1454C, May 2000.
6. Харламенков А. С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31, № 3. С. 96–102.
7. Контроль качества литий-ионных аккумуляторов / Д. В. Бессонов [и др.] // Вестник НЦБЖД. 2021. № 1 (47). С. 68–74.
8. Изучение термической устойчивости Li-ионных батарей / Д. В. Бессонов [и др.] // Безопасность критических инфраструктур и территорий. Проблемы безопасности строительных критических инфраструктур «Safety 2018» : сборник статей. Екатеринбург, 2018. С. 102–104.

9. Белов Г. В., Трусов Б. Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М., 2013. 96 с.

REFERENCES

1. A new high-tech industry for the production of electric vehicles will be created in Russia by 2030 // Ministry of Economic Development of the Russian Federation : official website. URL: <https://clck.ru/3QArMe> (accessed 25.05.2025). Date of publication: 23.08.2021.
2. Preliminary investigation of the fire-hazardous properties of lithium-ion batteries / D. I. Terentyev [et al.] // Technosphere safety. 2024. No. 3 (44). P. 25–34.
3. Orlov O. I., Komelkov V. A., Sorokin D. V. Fire hazard of lithium-ion batteries // Modern problems of civil protection. 2023. No. 4 (48). P. 177–188.
4. Yelisseyev Yu. N., Mokryak A. V. Analysis of fire hazard of lithium-ion batteries // Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia. 2020. No. 3. P. 14–17.
5. Crafts C., Borek T., Mowry C. Safety Testing of 18650-Style Lithium-ion Cells. Sandia National Laboratories, SAND2000-1454C, May 2000.
6. Kharlamenkov A. S. Fire hazard of using lithium-ion batteries in Russia // Fire and Explosion Safety. 2022. Vol. 31. No. 3. P. 96–102.
7. Quality control of lithium-ion batteries / D. V. Bessonov [et al.] // Bulletin of the National Library of Railways. 2021. No. 1 (47). P. 68–74.
8. Study of the thermal stability of Li-ion batteries / D. V. Bessonov [et al.] // Safety of critical infrastructures and territories. Problems of safety of construction critical infrastructures «Safety 2018» : collection of articles Branch of the Russian Academy of Sciences. Ekaterinburg, 2018. P. 102–104.
9. Belov G. V., Trusov B. G. Thermodynamic Modeling of Chemically Reacting Systems. Moscow, 2013. 96 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

Тикина Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 843403; Scopus Author ID: 56444380800; Researcher ID: KMY-6069-2024; ORCID: 0000-0001-6262-1580; e-mail: tikinaiv@uigps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy I. Terentiev, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Leading Researcher of the Scientific research Department of the educational and scientific complex, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 47228; Scopus Author ID: 55900790600; Researcher ID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366; e-mail: terentyevdi@uigps.ru

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

Irina V. Tikina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Productions, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 843403; Scopus Author ID: 56444380800; Researcher ID: KMY-6069-2024; ORCID: 0000-0001-6262-1580; e-mail: tikinaiv@uigps.ru

УДК 622.276.8

РАЗРАБОТКА СОСТАВА ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПИРОФОРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, СФОРМИРОВАВШИХСЯ В РЕЗЕРВУАРАХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЕРНИСТЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Галиахметов Эмир Айратович, Султанов Рифкат Мухатъярович, Хафизов Шамиль Ильдарович
Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрены механизмы образования пирофорных отложений в резервуарах для хранения сернистой нефти, обусловленные сероводородной коррозией стальных конструкций с образованием реактивных сульфидов железа и их интенсивным экзотермическим окислением при контакте с атмосферным кислородом. Особое внимание уделено факторам риска, таким как анаэробные условия хранения под слоем углеводородов и периодическое вскрытие резервуаров. Проведен сравнительный анализ эффективности дезактивации пирофорных отложений растворами, полученными реакцией карбамида и формальдегида с различными молярными соотношениями, обеспечивающими поликонденсацию с формированием прочной защитной полимерной пленки, надежно снижающей пирофорную активность. Детально описана методика лабораторных испытаний модифицированным методом: подготовка растворов, процедура обработки раствором и лабораторные испытания с регистрацией температуры саморазогрева и времени достижения пика реакции. Приведены результаты рентгенфлуоресцентного анализа обработанных образцов, позволяющие оценить минеральный состав отобранных образцов. Метод рекомендован для внедрения на объектах нефтяной промышленности. Предложенная технология обеспечивает экономию времени и повышение безопасности при проведении ремонтных работ. Полученные результаты демонстрируют готовность метода к внедрению. Предложенный метод дезактивации пирофорных отложений обеспечивает снижение риска возникновения аварий, связанного с пирофорной активностью на объектах нефтяной промышленности.

Ключевые слова: пирофорные отложения, пожары, сернистые отложения, нейтрализация пирофорных отложений, пожарная безопасность, температура саморазогрева, температура самовоспламенения

Для цитирования: Галиахметов Э. А., Султанов Р. М., Хафизов Ш. И. Разработка состава для нейтрализации пирофорных отложений, сформировавшихся в резервуарах для хранения сернистых нефтепродуктов // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 46–56.

DEVELOPMENT OF A COMPOSITION FOR NEUTRALIZING PYROPHORIC DEPOSITS FORMED IN STORAGE TANKS FOR SULFUR CONTAINING PETROLEUM PRODUCT

Emir A. Galiakhmetov, Rifkat M. Sultanov, Shamil I. Hafizov
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Abstract. The article considers the mechanisms of formation of pyrophoric deposits in tanks for storing sulfurous oil, caused by hydrogen sulfide corrosion of steel structures with the formation of reactive iron sulfides and their intense exothermic oxidation upon contact with atmospheric oxygen. Special attention is given to risk factors such as anaerobic storage conditions under a hydrocarbon layer and periodic opening of tanks. A comparative analysis of the effectiveness of deactivation of pyrophoric deposits with solutions with various molar ratios is conducted, ensuring polycondensation with the formation of a strong protective polymer film that reliably reduces pyrophoric activity. The laboratory testing methodology by a modified method is described in detail: preparation of solutions, solution treatment procedure, and laboratory tests with recording of self-heating temperature and time to reach the reaction peak. Results of X-ray fluorescence analysis of treated samples are presented, confirming a significant reduction in pyrophoric activity. The method is recommended for implementation at oil industry facilities. The proposed technology ensures time savings and increased safety during maintenance operations. The obtained results demonstrate the readiness of the method for implementation. The proposed method of deactivation of pyrophoric deposits ensures a reduction in the risk of accidents associated with pyrophoric activity at oil industry facilities.

Keywords: pyrophoric deposits, fires, sulfur deposits, neutralization of pyrophoric deposits, fire safety, self-heating temperature, autoignition temperature

For citation: Galiakhmetov E. A., Sultanov R. M., Hafizov Sh. I. Development of a composition for neutralizing pyrophoric deposits formed in storage tanks for sulfur containing petroleum product // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 46–56.

Введение

Пирофорные отложения являются одним из наиболее опасных факторов пожарной безопасности на объектах добычи, переработки и хранения сернистой нефти и нефтепродуктов. Они формируются на внутренних поверхностях резервуаров, аппаратов и трубопроводов в результате сероводородной коррозии стали с образованием сульфидов железа, которые при контакте с кислородом, содержащимся в воздухе, способны к самонагреву и самовозгоранию. В работах, посвященных анализу причин аварий и пожаров на резервуарных парках, подчеркивается, что пирофорные соединения относятся к характерным источникам

возгорания, особенно при проведении ремонтных и огневых работ [1–4].

Опасность представляют резервуары для хранения высокосернистой нефти и нефтепродуктов, где создаются условия для возникновения пирофорных отложений: пониженное содержание кислорода в газовом пространстве, наличие сероводорода и влаги, периодические циклы заполнения и опорожнения. При вскрытии такого оборудования и обеспечении доступа воздуха к ранее анаэробным отложениям происходит резкое изменение термодинамических условий, что приводит к интенсивному окислению сульфидов железа и может вызвать локальное возгорание с последующим распространением пожара [5–8].

Исследования коррозионных процессов во внутренних полостях резервуаров с сернистой нефтью показывают, что в составе осадка преобладают пирофорные сульфиды железа, продуктами трансформации которых являются оксиды и сера, а также примеси механического и минерального происхождения. Минеральный анализ таких отложений подтверждает наличие реакционноспособных фаз, которые могут сохранять пирофорные свойства даже при частичном высыхании и охлаждении [9, 10].

На сегодняшний день существует широкий спектр методов профилактики образования и дезактивации пирофорных сульфидов на объектах нефтедобычи и нефтепереработки. В данной статье по дезактивации пирофорных соединений рассмотрены традиционные подходы: предварительное снижение содержания сернистых соединений в сырье, защелачивание нефти и нефтепродуктов, применение коррозионностойких материалов и ингибиторов, образующих защитные пленки на металле [11, 12].

Наиболее распространены технологические решения, основанные на флегматизации и химической дезактивации, такие как смачивание отложений водой и длительное пропаривание оборудования перегретым паром. Такие методы имеют недостатки: отложения быстро высыхают и вновь становятся пирофорными, а пропаривание занимает 3–4 суток.

Материалы и методы

Анализ минерального состава пирофорных отложений из резервуаров для хранения сернистой нефти имеет ключевое значение для понимания механизмов их образования и выбора эффективных методов дезак-

тивации. По данным исследований, выполненных на действующих нефтебазах и НПЗ, такие отложения представляют собой многокомпонентные системы, включающие как, собственно, пирофорные сульфиды железа, так и продукты коррозии металла и механические примеси. Образцы, использованные для данного исследования, отобраны с каре действующих РВС-5000 и РВС-1000.

Для уточнения элементного состава образцов была проведена съемка на рентгенофлуоресцентном спектрометре, результаты которой представлены в табл. 1 для проб с РВС-1000 и РВС-5000. Анализ элементного состава позволил получить набор данных по широкому спектру элементов, содержащихся в пирофорных отложениях, таких как Si, Fe, S.

В пробе № 1 установлено содержание серы и оксида железа на уровне 25,292 % и 29,814 % соответственно. Проба № 2 отличается более высоким содержанием оксида железа (49,095 % Fe_2O_3) и меньшей долей серы (21,614 % S), что свидетельствует о более высокой степени окисления железосодержащей фазы.

Анализ полученных данных показал, что исследуемые пробы являются существенно неоднородными по элементному составу, разный уровень содержания железа и серы позволяет говорить о различии в условиях их образования и степени окисления. Сера и железо являются основными элементами.

Помимо рентгенофлуоресцентного анализа был так же применен метод порошковой рентгеновской дифракции, основой которого является регистрация дифракции рентгеновских лучей на порошкообразных или микрокристаллических образцах с целью определения их минерального

состава [13]. Результаты анализа минерального состава приведены в табл. 2. Данный метод позволяет выявить присутствующие минералы и определить соотношение различных форм соединений железа.

Целью лабораторных испытаний являлось экспериментальное определение температуры самовоспламенения пирофорных отложений и количественная оценка эффективности их дезактивации разработан-

ными растворами. Образцы пирофорных отложений отбирались непосредственно из резервуаров вертикальных стальных под потоком инертного газа для исключения преждевременного окисления. В лабораторных условиях материал помещался в фарфоровую чашу и измельчался до консистенции пастообразной массы, что обеспечивало репрезентативность и однородность пробы.

Таблица 1

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа

Table 1

The results of X-ray fluorescence analysis

Лабораторный номер образца Laboratory sample ID	Fe ₂ O ₃ , %	S, %	ППП*, % LOI*, %	Примеси суммарно, если не указано иное, <1 %, % Impurities, total, unless otherwise indicated <1 %, %
Проба № 1 Sample No. 1	29,814	25,292	44,001	SiO ₂ (0,29 %), MgO (0,15 %), MnO (0,07 %), Al ₂ O ₃ (0,12 %), Na ₂ O (0,11 %), Cl, Cu, Ni, Co, W, Cr (<0,07 %)
Проба № 2 Sample No. 2	49,095	21,614	27,504	SiO ₂ (0,63 %), MgO (0,29 %), MnO (0,18 %), Al ₂ O ₃ (0,24 %), Na ₂ O (0,15 %), TiO ₂ (0,03 %), Ni, Co, W, Cr, Cu (<0,09 %)

*ППП — потери при прокаливании пробы в муфельной печи при $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и неопределяемые компоненты.

*Note: LOI — loss on ignition of the sample in a muffle furnace at $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ and undetermined components.

Таблица 2

Результаты порошковой дифракции, %

Table 2

Powder diffraction results, %

Минеральный состав, % Mineral composition, %	Лабораторный номер образца Laboratory sample ID	
	Проба № 1 Sample No. 1	Проба № 2 Sample No. 2
Акагенит Acaganeite $\beta\text{-FeO(OH)}$	0,0	0,0
Макинавит Mackinawite $(\text{Fe, Ni})_9\text{S}_8$	1,1	17,8

Окончание таблицы 2

Минеральный состав, % Mineral composition, %	Лабораторный номер образца Laboratory sample ID	
	Проба № 1 Sample No. 1	Проба № 2 Sample No. 2
Марказит Marcasite FeS_2	5,2	6,5
Сера Sulphur S_8	64,6	38,0
Чукановит Chukanovite $\text{Fe}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	0,0	1,9
Магнетит Magnetite Fe_3O_4	1,1	2,6
Гематит Hematite Fe_2O_3	0,3	0,0
Гетит Goethite $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$	8,2	6,2
Пирит Pyrite FeS_2	16,3	6,4
Грейгит Greygite Fe_3S_4	3,2	20,6

Лабораторные испытания образцов пиррофорных отложений проводились по модернизированной методике, описанной в [14, 15]. В сосуд помещался образец массой $3,0 \pm 0,1$ г. Подача кислорода осуществлялась со скоростью 0,2–0,3 л/мин с предварительной калибровкой расходомера.

Образцы пиррофорных отложений сначала были испытаны в исходном состоянии для оценки их пиррофорной активности и определения исходной температуры самовоспламенения, после чего были подвергнуты обработке растворами, полученными при смешивании карбамида и формалина в молярных соотношениях 1:2, 1:6 (раствор № 1 и раствор № 2).

Порядок приготовления растворов заключался в следующем: в стеклянный реактор объемом 100 мл, установленный на магнитной мешалке, загружали 6,2 г карбамида, после чего прикапывали 37%-й водный раствор формалина объемом 17 г при температуре 20 °С, после чего перемешивали до стабилизации температуры — для получения раствора № 1. Аналогичным образом был приготовлен раствор № 2 при содержании карбамида 6,2 г, водного раствора формалина — 51 г.

Обработка образцов проводилась на протяжении суток для обеспечения полного взаимодействия реагентов с образцами. Эффективность снижения пиррофорной

активности определяется путем сопоставления полученных в ходе лабораторных испытаний данных с исходными показателями образцов, не подвергнутых обработке раствором.

Эффективность предложенного раствора при дезактивации пирофорных отложений обусловлена химической реакцией, протекающей непосредственно на поверхности реактивных сульфидов железа.

Полученный реагент полностью перекрывает доступ атмосферного кислорода к активным частицам сульфидов (FeS , FeS_2), предотвращая инициацию экзотермических окислительных реакций, ответственных за самовозгорание. Действие реагента на поверхности стабилизирует рыхлые пирофорные отложения, снижая риск их воспламенения, что подтверждается результатами лабораторных испытаний, приведенных в табл. 3.

Таблица 3
Результаты испытаний образцов

Table 3
Sample test results

№	Шифр образца Sample ID	Описание образца Sample description	Температура самовоспламенения, °C Autoignition temperature, °C	Длительность испытания Test duration
1	Проба № 1 Sample No. 1	Отложения с внутренней поверхности газоотводной линии РВС-1000 (от 01.09.2023) Deposits from the internal surface of the gas outlet line of RVS-1000 (dated 01.09.2023)	175	38 мин 8 с 38 min. 8 sec.
2	Проба № 2 Sample No. 2	Отложения с каре РВС-5000 (от 06.07.2023) Deposits from the square of RVS-5000 (dated 06.07.2023)	190	33 мин 15 с 33 min. 15 sec.
3	Проба № 1 Sample No. 1	Отложения с внутренней поверхности газоотводной линии РВС-1000 (от 01.09.2023) находились под воздействием раствора в течение 1 суток (раствор № 1) Deposits from the internal surface of the gas outlet line of RVS-1000 (dated 01.09.2023) were exposed to the solution for 1 day (Solution No. 1)	245	32 мин 15 с 32 min. 15 sec.
4	Проба № 2 Sample No. 2	Отложения с каре РВС-5000 (от 06.07.2023) находились под воздействием раствора в течение 1 суток (раствор № 1) Deposits from the square of RVS-5000 (dated 06.07.2023) were exposed to the solution for 1 day (Solution No. 1)	240	34 мин 48 с 34 min. 48 sec.
5	Проба № 1 Sample No. 1	Отложения с внутренней поверхности газоотводной линии РВС-1000 (от 01.09.2023) находились под воздействием раствора в течение 1 суток (раствор № 1) Deposits from the internal surface of the gas outlet line of RVS-1000 (dated 01.09.2023) were exposed to the solution for 1 day (Solution No. 1)	260	34 мин 43 с 34 min. 43 sec.

Окончание таблицы 3

№	Шифр образца Sample ID	Описание образца Sample description	Температура самовоспламенения, °С Autoignition temperature, °C	Длительность испытания Test duration
6	Проба № 2 Sample No. 2	Отложения с каре РВС-5000 (от 06.07.2023) находились под воздействием раствора в течение 1 суток (раствор № 1) Deposits from the square of RVS-5000 (dated 06.07.2023) were exposed to the solution for 1 day (Solution No. 1)	251	35 мин 16 с 35 min. 16 sec.
7	Проба № 1 Sample No. 1	Отложения с внутренней поверхности газоотводной линии РВС-1000 (от 01.09.2023) находились под воздействием раствора в течение 1 суток (раствор № 2) Deposits from the internal surface of the gas outlet line of RVS-1000 (dated 01.09.2023) were exposed to the solution for 1 day (Solution No. 2)	262	32 мин 11 с 32 min. 11 sec.
8	Проба № 2 Sample No. 2	Отложения с каре РВС-5000 (от 06.07.2023) находились под воздействием раствора в течение 1 суток (раствор № 2) Deposits from the square of RVS-5000 (dated 06.07.2023) were exposed to the solution for 1 day (Solution No. 2)	258	38 мин 15 с 38 min. 15 sec.
9	Проба № 1 Sample No. 1	Отложения с внутренней поверхности газоотводной линии РВС-1000 (от 01.09.2023) находились под воздействием раствора в течение 1 суток (раствор № 2) Deposits from the internal surface of the gas outlet line of RVS-1000 (dated 01.09.2023) were exposed to the solution for 1 day (Solution No. 2)	268	33 мин 16 с 33 min. 16 sec.
10	Проба № 2 Sample No. 2	Отложения с каре РВС-5000 (от 06.07.2023) находились под воздействием раствора в течение 1 суток (раствор № 2) Deposits from the square of RVS-5000 (dated 06.07.2023) were exposed to the solution for 1 day (Solution No. 2)	278	37 мин 28 с 37 min. 28 sec.

Выводы

Проведенные исследования подтвердили, что пирофорные отложения в резервуарах сернистой нефти представляют значительную пожарную опасность, обусловленную реактивными сульфидами железа (FeS, FeS₂), проявляющими пирофорные свойства при контакте с атмосферным кислородом после анаэробного хранения.

Обзор существующих методов нейтрализации показал ограниченную эффективность традиционных подходов, обеспечивающих краткосрочную защиту с технологическими недостатками, такими как коррозия оборудования и длительные простои.

Разработан метод дезактивации пирофорных отложений обработкой раствором реагента, полученного реакцией карбамида с формальдегидом. Лабораторные испыта-

ния продемонстрировали существенное повышение температуры самовоспламенения и увеличение времени реакции, что свидетельствует об эффективной дезактивации обработанных образцов. Оптимальным является соотношение реагентов 1:6. Метод отличается технологической простотой, безопасностью, превосходя традиционные способы. Технология рекомендована для внедрения на объектах хранения сернистой

нефти, что позволит сократить время подготовки резервуаров к ремонту и повысить безопасность эксплуатации.

Полученные результаты свидетельствуют о применимости разработки в условиях производства и ее готовности к апробации в реальных производственных условиях нефтяной промышленности, в частности на объектах транспорта и хранения сернистых нефтей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Миннихметов В. А. Эффективный метод дезактивации пиррофорных сульфидов в аппарате реактора гидроочистки // Наука и практика: современные тенденции развития : сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза, 2021. С. 614–615. URL: <https://clck.su/euUZy> (дата обращения: 04.05.2026).
2. Отдушкин И. С. Предотвращение самовозгорания пиррофорных отложений при добыче и транспортировке, а также хранении сернистых нефтей и газов // Булатовские чтения. 2018. № 2. С. 74–76. URL: <https://clck.su/HSFOv> (дата обращения: 04.05.2026).
3. Петров А. П., Иванов В. Г., Глухов Г. Ю. Исследование опасности самовозгорания пиррофорных отложений в резервуарах с нефтью // Технологии техносферной безопасности. 2009. № 3 (25). URL: <https://clck.su/cclyK> (дата обращения: 04.05.2026).
4. Сумарченкова И. А. Особенности образования пиррофорных отложений в резервуарах с высокосернистой нефтью // Флагман науки. 2025. № 8 (31). С. 129–131. URL: <https://clck.su/chaCD> (дата обращения: 04.05.2026).
5. Маковичук К. И., Султанов Р. М., Салихов И. К. Образование пиррофорных соединений и защита оборудования от них // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2018. С. 15–18. URL: <https://clck.su/RpYBo> (дата обращения: 04.05.2026).
6. Назаров В. П., Степаненко Д. А., Степаненко Д. А. Обоснование целесообразности повышения уровня пожаровзрывобезопасности при подготовке резервуаров к ремонтным огневым работам // Технологии техносферной безопасности. 2020. Вып. 3 (89). С. 75–85. DOI: 10.25257/TTS.2020.3.89.75-85.
7. Коррозия внутренней поверхности резервуаров с сернистой нефтью и пиррофорные свойства образующихся отложений / И. Р. Бегишев [и др.] // Практика противокоррозионной защиты. 2020. Т. 25, № 1. С. 44–50. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2020.95.1-6.
8. Исследование состава отложений на поверхности резервуаров при хранении сернистых нефтей / К. И. Маковичук [и др.] // Интеграционные процессы мирового научно-технологического развития : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической

конференции в 2 ч. Белгород, 2017. Ч. II. С. 123–127. URL: <https://clck.su/mLyQX> (дата обращения: 04.05.2026).

9. Zhang Y., Wang Y., Li J. Oxidation to spontaneous combustion of pyrophoric iron sulphides in oil storage tanks: A case study // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2023. Vol. 85. Art. 105259. URL: <https://clck.su/ljdTo> (дата обращения: 04.05.2026).

10. Предупреждение возгорания пирофорных отложений в стальных резервуарах / Л. А. Храмцова [и др.] // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2019. № 1. С. 48–58. DOI: 10.20295/2223-9987-2019-1-50-58.

11. Ханипов А. Р. Современные решения по обеспечению промышленной безопасности резервуарных парков // *Аллея науки*. 2021. Т. 2, № 16 (63). С. 177–184. URL: <https://clck.su/GRpoq> (дата обращения: 04.05.2026).

12. Применение сульфоксидов как эффективных дезактиваторов пирофорных отложений / И. К. Салихов [и др.] // *Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов : сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Году гражданской обороны*. Иваново, 2017. С. 200–203. URL: <https://clck.su/RpYBo> (дата обращения: 04.05.2026).

13. Развитие метода рентгеновской дифракции в лаборатории минералогии ООО «Тюменский нефтяной научный центр» / М. А. Александров [и др.] // *Нефтяная провинция*. 2024. № 1 (37). С. 59–73. DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.59-73>.

14. Разработка модифицированного метода испытания образцов пирофорных отложений, сформировавшихся в резервуарах для хранения серосодержащих нефтей и нефтепродуктов, на пирофорную активность / И. Ф. Хафизов [и др.] // *Техносферная безопасность*. 2025. № 1 (46). С. 127–135.

15. Моделирование тепловых процессов при нагреве пирофорного слоя в резервуаре вертикальном стальном для хранения нефти и нефтепродуктов / А. Г. Азовцев [и др.] // *Технологии техносферной безопасности*. 2018. Вып. 2 (78). С. 43–54. DOI: 10.25257/TTS.2018.2.78. 43–54.

REFERENCES

1. Minniakhmetov V. A. Effective method for decontamination of pyrophoric sulfides in the process plant of hydrotreating reactor // *Science and Practice: Current Development Trends : Collection of Articles from the III International Scientific and Practical Conference*. Penza, 2021. P. 614–615. URL: <https://clck.su/euUZy> (accessed 04.05.2026).

2. Otdyshkin I. S. Prevention of the firefighting of pyrochoric deposits at the production and transportation, and the storage of sulfur oil and gas // *Readings of A. I. Bulatov*. 2018. No. 2. P. 74–76. URL: <https://clck.su/HSFOv> (accessed 04.05.2026).

3. Petrov A. P., Ivanov V. G., Gluhov G. Yu. Research of the risk of spontaneous combustion of pyrophoric deposits in reservoirs of oil // *Technology of technosphere safety*. 2009. No. 3 (25). URL: <https://clck.su/cclyK> (accessed 04.05.2026).

4. Sumarchenkova I. A. Mechanism of pyrophoric deposit formation in crude oil tanks // *Flagman nauki*. 2025. No. 8 (31). P. 129–131. URL: <https://clck.su/chaCD> (accessed 04.05.2026).

5. Makovichuk K. I., Sultanov R. M., Salikhov I. K. Formation of pyrophoric compounds and protection of equipment against them // Industrial Safety Expertise and Diagnostics of Hazardous Production Facilities. 2018. P. 15–18. URL: <https://clck.su/RpYBo> (accessed 04.05.2026).
6. Nazarov V. P., Stepanenko D. A., Stepanenko D. A. Rationale for increasing the level of fire safety during preparation of tanks for fire repairs // Technology of technosphere safety. 2020. Vol. 3 (89). P. 75–85. DOI: 10.25257/TTS.2020.3.89.75-85.
7. Corrosion of the inner surface of the tanks with sulfurous oil and pyrophoric properties of formed deposits / I. R. Begishev [et al.] // Theory and Practice of Corrosion Protection. 2020. Vol. 25. No. 1. P. 44–50. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2020.95.1-6.
8. Investigation of the composition of deposits on the surface of tanks during storage of sour crude oils / K. I. Makovichuk [et al.] // Integration Processes of Global Scientific and Technological Development : collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference in 2 parts. Belgorod, 2017. Part II. P. 123–127. URL: <https://clck.su/mLyQX> (accessed 04.05.2026).
9. Zhang Y., Wang Y., Li J. Oxidation to spontaneous combustion of pyrophoric iron sulphides in oil storage tanks: A case study // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2023. Vol. 85. Art. 105259. URL: <https://clck.su/ljdTo> (accessed 04.05.2026).
10. Prevention of ignition of pyrophoric deposits in steel tanks / L. A. Khramtsova [et al.] // Bulletin of Scientific Research Results. 2019. No. 1. P. 48–58. DOI: 10.20295/2223-9987-2019-1-50-58.
11. Khanipov A. R. Modern solutions for ensuring industrial safety of tank farms // Alley of Science. 2021. Vol. 2. No. 16 (63). P. 177–184. URL: <https://clck.su/GRpoq> (accessed 04.05.2026).
12. Application of sulfoxides as effective deactivators of pyrophoric deposits / I. K. Salikhov [и др.] // Current Issues of Improving Engineering Systems for Ensuring Fire Safety of Facilities : collection of materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference, dedicated to the Year of Civil Defense. Ivanovo, 2017. P. 200–203. URL: <https://clck.su/RpYBo> (accessed 04.05.2026).
13. Development of the X-ray diffraction method in the mineralogy laboratory of Tyumen Petroleum Research Center LLC / M. A. Aleksandrov [et al.] // Neftyanaya Provintsiya. 2024. No. 1 (37). P. 59–73. DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.59-73>.
14. The development of the modified method for testing samples of pyrophoric deposits formed in storage tanks for sulfur-containing oils and petroleum products for pyrophoric activity / I. F. Khafizov [et al.] // Technospheric safety. 2025. No. 1 (46). P. 127–135.
15. Modeling of thermal processes when heating of pyrophoric deposits at the vertical steel tanks for oil storage / A. G. Azovtsev [et al.] // Technology of technosphere safety. 2018. Vol. 2 (78). P. 43–54. DOI: 10.25257/TTS.2018.2.78.43-54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галиахметов Эмир Айратович, магистрант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); e-mail: galiahmetovemir@yandex.ru

Султанов Рифкат Мухатьярович, д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); РИНЦ ID: 49775; Scopus Author ID: 6701679307.

Шамиль Ильдарович Хафизов, магистрант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); e-mail: chafisovSI_44@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Emir A. Galiakhmetov, Master's student of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation); e-mail: emirgaliakhmetov@gmail.com

Rifkat M. Sultanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation); ID RSCI: 49775; Scopus Author ID: 6701679307.

Shamil I. Hafizov, Master's student of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation); e-mail: chafisovSI_44@mail.ru

УДК 614.841.45

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В СОСТАВЕ ПЕНООБРАЗУЮЩИХ СРЕДСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Сафаргалин Айдар Расихович, Хафизов Ильдар Фанилевич, Попова Елена Викторовна
Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является экспериментальное определение оптимального количества поверхностно-активных веществ (ПАВ) в пенообразующих составах для повышения качества пожаротушения. Актуальность исследования обусловлена потребностью в обоснованном подходе к усовершенствованию огнетушащих составов, сочетающих оптимальные свойства. Для достижения поставленной цели в работе применен метод сталагмометрии, позволивший оценить поверхностное натяжение растворов ПАВ в диапазоне концентраций от 0,01 до 5 %. В ходе эксперимента были выявлены основные реологические характеристики, определена критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) и проведен анализ с использованием уравнения адсорбции Гиббса для определения поверхностной избыточной концентрации ПАВ. Основная задача заключалась в установлении концентраций, обеспечивающих баланс между низким поверхностным натяжением и высокой пенообразующей способностью. Результаты исследования показали, что зависимость поверхностного натяжения от концентрации имеет двухэтапный характер с четко выраженным минимумом, что свидетельствует о достижении насыщения адсорбционного слоя при ККМ. Экспериментально установлено, что применение раствора ПАВ в концентрации 0,2–0,3 % обеспечивает формирование пены с улучшенными эксплуатационными характеристиками: повышенной смачиваемостью, равномерностью покрытия и устойчивостью пенного слоя при тушении. Определенный оптимальный диапазон концентраций позволяет разрабатывать высокоэффективные огнетушащие составы на основе ПАВ.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, критическая концентрация мицеллообразования, поверхностное натяжение, теория Гиббса, изотерма адсорбции, пожаротушение, пенообразователи, водные растворы, сталагмометрия, оптимизация

Для цитирования: Сафаргалин А. Р., Хафизов И. Ф., Попова Е. В. Оптимизация концентрации пенообразующих составов для систем пожаротушения // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 57–62.

OPTIMIZATION OF THE CONCENTRATION OF SURFACTANTS IN THE COMPOSITION OF FOAMING EXTINGUISHING AGENTS

Aidar R. Safargalin, Ildar F. Khafizov, Elena V. Popova
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to experimentally determine the optimal amount of surfactants in foaming formulations to improve the quality of fire extinguishing. The relevance of the study is due to the need for a sound approach to improving fire extinguishing compounds that combine optimal properties. To achieve this goal, the stalagmometry method was used, which made it possible to estimate the surface tension of surfactant solutions in the concentration range from 0.01 to 5 %. During the experiment, the main rheological characteristics were identified, the critical concentration of micelle formation (KKM) was determined, and an analysis was performed using the Gibbs adsorption equation to determine the surface excess concentration of surfactants. The main task was to establish concentrations that ensure a balance between low surface tension and high foaming capacity. The results of the study showed that the dependence of surface tension on concentration has a two-stage character with a clearly defined minimum, which indicates that saturation of the adsorption layer has been achieved at KKM. It has been experimentally established that the use of a surfactant solution in a concentration of 0.2–0.3 % ensures the formation of foam with improved performance characteristics: increased wettability, uniformity of coating and stability of the foam layer during extinguishing. A certain optimal concentration range allows the development of highly effective extinguishing agents based on surfactants.

Keywords: surfactants, critical concentration of micelle formation, surface tension, Gibbs theory, adsorption isotherm, firefighting, foaming agents, aqueous solutions, stalagmometry, optimization

For citation: Safargalin A. R., Khafizov I. F., Popova E. V. Optimization of the concentration of foaming compounds for fire extinguishing systems // *Technosphere safety*. 2026. No. 3 (52). P. 57–62.

Введение

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) представляют собой группу соединений, которые адсорбируются на границах фаз и заметно уменьшают поверхностное натяжение. Это вызвано особенностью дифильной структуры с гидрофильными и гидрофобными частями. Эффективность ПАВ зависит от поверхностной активности, показывающей насколько сильно вещество снижает натяжение при низких концентрациях, и насыщения адсорбционного слоя, определяющего минимальное натяжение при полном заполнении слоя. Критическая концентра-

ция мицеллообразования (KKM) — ключевой показатель поведения ПАВ в растворах. Количество KKM молекулы позволяет определить остаются ли молекулы изолированными или происходит формирование мицеллы, что влияет на такое свойство раствора, как поверхностное натяжение. Теория Гиббса лежит в основе описания адсорбции, связывая ее с изменениями натяжения через основное уравнение. Использование основного уравнения теории Гиббса дает возможность предсказывать свойства растворов по концентрации ПАВ. Для улучшения свойств огнетушащих составов изучили зависимости натяжения от концентрации [1, 2]:

определение оптимальных значений помогает контролировать стабильность пены, ее дисперсность и текучесть [2, 3].

Материалы и методы

Для оптимизации концентраций пенообразующих смесей на базе ПАВ применили набор экспериментальных и теоретических подходов, направленных на рост эффективности тушения [1, 4, 5]. Исследуемый диапазон концентраций ПАВ составил от 0,01 до 5 %.

Основной параметр, т. е. поверхностное натяжение на границе вода — воздух измеряли сталагмометрией, методом отрыва капли от капилляра [3, 5]. Измерения выполнялись на лабораторной установке, включающей сталагмометр с капилляром радиусом $r = 0,0003$ м.

Сила отрыва капли F определялась как среднее значение из 10 последовательных измерений для каждой концентрации ПАВ. Поверхностное натяжение σ рассчитывалось по формуле, выведенной из условия равновесия сил в момент отрыва капли:

$$\sigma = \frac{F}{2\pi r}, \quad (1)$$

Для применения термодинамического аппарата поверхностных явлений массовые концентрации ПАВ $C_{\%}$ были переведены в молярные единицы C , моль/л, по формуле [3, 5]:

$$C = \frac{C_{\%} \cdot \rho}{M} \cdot 10, \quad (2)$$

где:

$\rho = 1$ г/мл — плотность водного раствора;

$M = 264$ г/моль — молекулярная масса ПАВ.

Анализ велся по $\ln C$. ККМ находили по излому на графике σ от концентрации. Для интерпретации использовали изотерму Гиббса:

$$\Gamma = -\frac{1}{RT} \left(-\frac{d\sigma}{d\ln C} \right), \quad (3)$$

где:

Γ — поверхностная избыточная концентрация (адсорбция) ПАВ, моль/м²;

d — символ дифференциала (производной);

R — универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль · К));

T — абсолютная температура, К.

Результаты и их обсуждение

Исследование показало зависимость поверхностного натяжения от концентрации ПАВ в водных растворах [6, 7]. Данные

в таблице иллюстрируют двухэтапный характер с четким переходом.

На начальной стадии (0,01–0,1 %) натяжение падает с 25,8 до 20,6 мН/м из-за адсорбции молекул ПАВ на поверхности [3]. В зоне

0,2–0,3 % достигается ККМ с минимумом 16,4 мН/м (рис.). Здесь слой насыщен, формируется устойчивая пена. Выше 0,3 % натяжение стабилизируется (16,1–17,1 мН/м), подтверж-

дая мицеллообразование [3, 6]. Оптимальная концентрация 0,2–0,3 % дает низкое натяжение, улучшая смачивание, растекание и устойчивость пены [1, 2, 8].

Таблица
Экспериментальные данные зависимости поверхностного натяжения от концентрации ПАВ

Table
Experimental data of the dependence of surface tension on surfactant concentration

Концентрация ПАВ, % Surfactant concentration, %	Концентрация ПАВ, моль/л Surfactant concentration, mol/L	lnC	Поверхностное натяжение σ , мН/м Surface tension σ , mN/m
0,01	0,0003788	-7,88	25,8
0,03	0,0011364	-6,78	23,9
0,05	0,0018939	-6,27	22,4
0,08	0,0030303	-5,80	21,5
0,1	0,0037878	-5,58	20,6
0,2	0,0075758	-4,88	17,8
0,3	0,0113636	-4,47	16,4
0,5	0,0189394	-3,97	17,1
1	0,0378788	-3,28	16,97
2	0,0757576	-2,58	16,92
5	0,1893939	-1,66	16,1

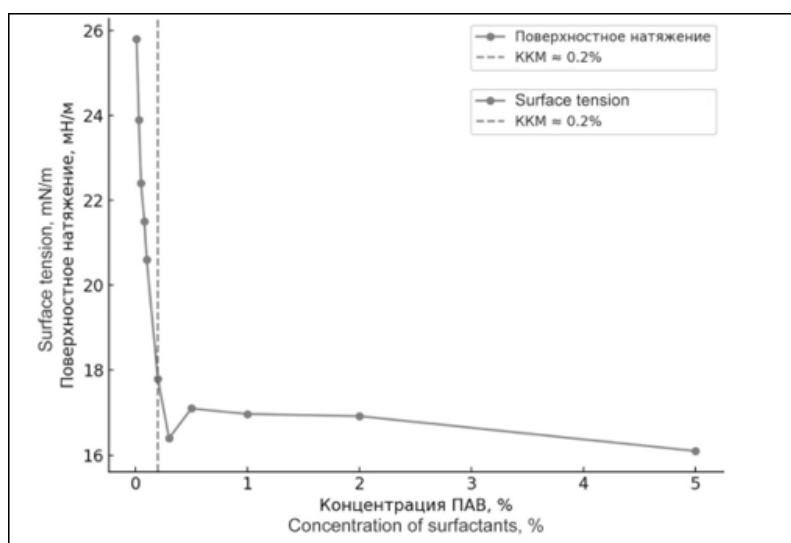


Рис. Зависимость поверхностного натяжения водного раствора от концентрации ПАВ
Fig. Dependence of the surface tension of an aqueous solution on the concentration of surfactants

Заключение

В работе методом сталагмометрии экспериментально определено оптимальное содержание ПАВ в пенообразующем составе для повышения эффективности пожаротушения. Установлено, что зависимость поверхностного натяжения от концентрации носит двухстадийный характер: на первом этапе до 0,1 % наблюдается резкое снижение σ за счет адсорбции молекул, а в интервале 0,2–

0,3 % достигается критическая концентрация мицеллообразования, что соответствует минимуму поверхностного натяжения 16,4 мН/м. При дальнейшем увеличении концентрации свыше 0,3 % значения σ стабилизируются, что делает рост содержания ПАВ нецелесообразным. Таким образом, оптимальный диапазон 0,2–0,3 % обеспечивает баланс между низким натяжением и устойчивым пенообразованием, что подтверждает практическую значимость полученных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шароварников А. Ф., Шароварников С. А. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение. М. : Пожнаука, 2005. 335 с. EDN: UWCCSP.
2. Иванов И. Ю., Навроцкий О. Д., Доукешева Е. А. Огнетушащая и пленкообразующая способность огнетушащих составов на основе фторированных поверхностно-активных веществ // Journal of Civil Protection. 2024. Т. 8, № 1. С. 21–31. DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-1.21.
3. Русанов А. И., Щёкин А. К. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. 3-е изд., стер. СПб. : Лань, 2022. 612 с. EDN: CBDHDR.
4. ГОСТ Р 50588-2012. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2012. 38 с.
5. Кругляков П. М., Ексерова Д. Р. Пены и пенные пленки. М. : Химия, 1990. 432 с.
6. Исследование фторированных поверхностно-активных веществ для разработки пленкообразующего огнетушащего состава / И. Ю. Иванов [и др.] // Journal of Civil Protection. 2022. Т. 6, № 4. С. 415–428. DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. EDN: DGPXST.
7. Experimental and simulation study of fluorine-free firefighting foam reinforced with aerogel particles and polymers / Yan B. [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2025. Vol. 708. Art. 136011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.136011>.
8. Rodhia R., Sahdeo S. K., Kumar B. Optimizing foaming agent concentration and recycled fine aggregate content to enhance mechanical and durable properties of foam concrete mixes // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 97. Art. 110801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110801>.

REFERENCES

1. Sharovarnikov A. F., Sharovarnikov S. A. Foaming agents and foams for extinguishing fires. Composition, properties, application. Moscow : Pozhnauka, 2005. 335 p. EDN: UWCCSP.
2. Ivanov I. Yu., Navrotskii O. D., Dokesheva E. A. Fire extinguishing and film-forming ability of fire extinguishing compositions based on fluorinated surfactants // Journal of Civil Protection. 2024, Vol. 8, No. 1. P. 21–31. DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-1.21.

3. Rusanov A. I., Shchekin A. K. Micellization in Surfactant Solutions. 3rd ed. Saint Petersburg : Lan, 2022. 612 p. EDN: CBDBDR.
4. GOST R 50588-2012. Foaming agents for extinguishing fires. General technical requirements and test methods. Moscow : Standartinform, 2012. 38 p.
5. Kruglyakov P. M., Ekserova D. R. Foams and foam films. Moscow : Khimiya, 1990. 432 p.
6. Research of fluorinated surfactants for the development of a film-forming fire extinguishing composition / I. Yu. Ivanov [et al.] // Journal of Civil Protection, 2022. Vol. 6, No. 4. P. 415–428. DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. EDN: DGXST.
7. Experimental and simulation study of fluorine-free firefighting foam reinforced with aerogel particles and polymers / Yan B. [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2025. Vol. 708. Art. 136011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.136011>.
8. Rodhia R., Sahdeo S. K., Kumar B. Optimizing foaming agent concentration and recycled fine aggregate content to enhance mechanical and durable properties of foam concrete mixes // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 97. Art. 110801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110801>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сафаргалин Айдар Расихович, аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета (450044, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Матвея Пинского, д. 4); Author ID: 1313761; e-mail: playtostory@gmail.com

Хафизов Ильдар Фанилевич, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450044, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Матвея Пинского, д. 4); Author ID: 592403; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Попова Елена Викторовна, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450062, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1); Author ID: 633418; e-mail: evpopova10@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aidar R. Safargalin, graduate student, Ufa State Petroleum Technological University (4 Matvey Pinsky St., Ufa, 450044, Russian Federation); Author ID: 1313761; e-mail: playtostory@gmail.com

Ildar F. Khafizov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (4 Matvey Pinsky St., Ufa, 450044, Russian Federation); Author ID: 592403; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Elena V. Popova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (1 Kosmonavtov St., Ufa, 450062, Russian Federation); Author ID: 633418; e-mail: evpopova10@yandex.ru

УДК 614.84

ОБЗОР ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДНЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Тухбатулин Максим Наильевич¹, Тикина Ирина Владимировна¹, Цыганков Михаил Сергеевич²

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

²Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Для защиты металлоконструкции от воздействия пламени используются огнеупорные составы, которые относятся к пассивной огнезащите. Эти материалы под воздействием высоких температур формируют изолирующий от тепла барьер, который препятствует быстрому нагреву металлических элементов, удерживая температуру металла ниже критического значения, что позволяет конструкции сохранять свою прочность в течение времени, необходимого для эвакуации людей. Поэтому в рамках стратегии по снижению пожарной опасности объектов инфраструктуры огнезащитная обработка металлоконструкций играет фундаментальную роль. В работе проведено сравнение физических качеств и свойств ряда огнезащитных красок на водной основе для защиты металлических конструкций, таких как степень перетира, кажущаяся вязкость состава, плотность, расход при покрытии в 1 мм, адгезия покрытия, время высыхания, температура нанесения и эксплуатации, а также срок службы.

Ключевые слова: пожар, огнестойкость, огнезащита, металлические конструкции, огнезащитные покрытия, вспучивающиеся покрытия

Для цитирования: Тухбатулин М. Н., Тикина И. В., Цыганков М. С. Обзор физических свойств водных огнезащитных покрытий для металлических конструкций // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 63–74.

OVERVIEW OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF WATER-BASED FLAME-RETARDANT COATINGS FOR METAL STRUCTURES

Maxim N. Tukhbatulin¹, Irina V. Tikina¹, Mikhail S. Tsygankov²

¹UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

²St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. To protect metal structures from the effects of flame, fire-resistant compounds are used; these are classified as passive fire protection. Under the influence of high temperatures, these materials form a heat-insulating barrier that prevents the rapid heating of metal elements. By keeping the metal temperature below the critical value, the structure retains its strength for the duration required for people to evacuate. Therefore, in the context of a strategy to reduce the fire hazard of facilities, fire-retardant treatment of metal structures plays a fundamental

role. The study compares the physical characteristics and properties of a number of water-based fire-retardant paints used to protect metal structures, such as the degree of grinding, apparent viscosity of the composition, density, consumption rate for a 1 mm coating, coating adhesion, drying time, application and operating temperature, as well as service life.

Keywords: fire, fire resistance, fire protection, metal structures, fire-retardant coatings, intumescent coatings

For citation: Tukhbatullin M. N., Tikina I. V., Tsygankov M. S. Overview of the physical properties of water-based flame-retardant coatings for metal structures // Technospheric safety. 2026. No. 3 (52). P. 63–74.

Введение

Пожар представляет собой серьезную угрозу жизни и имуществу людей. Согласно анализу обстановки с пожарами и их последствиями на территории Российской Федерации в опубликованных отчетах МЧС России доля пожаров в период с 2022 по 2024 гг. увеличивалась [1–3]. Типичный сценарий пожара включает в себя несколько процессов: первоначально происходит возгорание, которое определяется как начало процесса горения, за ним следует распространение огня — стадия развития пожара, во время которой увеличивается скорость выделения тепла и температура пожара [4]. Высокая интенсивность термического воздействия оказывает деструктивное влияние на физико-механические свойства металлических конструкций. Так, при нагреве стали происходит коалесценция зерен аустенита, приводящая к снижению удельной поверхности границ зерен и, как следствие, к уменьшению усталостной прочности. Увеличение размера зерна также способствует снижению механической прочности стали из-за повышения концентрации дефектов, инициирующих разрушение, ставя под угрозу общую устойчивость сооружения.

Проведение специальных пожарно-профилактических мероприятий является неотъемлемой частью обеспечения пожарной безопасности зданий [5]. Одной из важных составляющих таких мероприятий является огнезащита строительных конструкций [6]. Она позволяет повысить огнестойкость зданий и сооружений, снизить риск возникновения пожара и распространения огня, а также обеспечить безопасность жизнедеятельности людей [7].

Принцип действия этого приема заключается в нанесении на металлические конструкции составов, которые в случае воздействия высоких температур образуют твердый углеродистый пенококс, обладающий слабой передачей тепла, что существенно увеличивает время нагрева конструкций и создает дополнительное время для эвакуации людей и имущества [8]. Исследования показывают, что в случае отсутствия обработки нагрев металлических конструкций до 500 °C происходит в течение 15 минут. При наличии обработки время сохранения целостности увеличивается от 1 до 3 ч [9]. Указанный подход считают актуальным, поскольку он позволяет сконцентрировать огнезащитный эффект на границе раздела между материалом и окружающей средой, т. е. там, где он необходим [10].

В работе был проведен сравнительный обзор ряда показателей (степень перетира, кажущаяся вязкость состава, плотность, расход для покрытия толщиной 1 мм, адгезия покрытия, время высыхания, температуре нанесения и эксплуатации, а также срок службы) современных водных огнезащитных покрытий («ТИТАН-ТМ», «ТИТАН-М», «ТЕКСОТЕРМ», ОСМ-1 ГЕФЕСТ, Pirex-Metal Plus и «ВД-АК-502-ОВ NEO») с целью предварительной оценки их работоспособности.

Водные огнезащитные покрытия были выбраны в качестве объекта исследования, т. к. в них отсутствуют вредные вещества и при воздействии высоких температур или открытого огня они не выделяют токсичные газы. Это гарантирует безопасность для здоровья человека и не наносит вреда окружающей среде. Также неоспоримым преимуществом этого вида покрытий является высокая адгезия и устойчивость к воздействию влаги, что позволяет использовать его в условиях повышенной влажности [11].

Теоретические основы

Общее описание красок:

1. «ТИТАН-ТМ» — двухкомпонентная система огнезащитного покрытия, призванная увеличить предел огнестойкости стальных конструкций, включая конструкции с приведенной толщиной металла менее 5,8 мм, в зданиях и сооружениях I и II степени огнестойкости. Она формируется из слоя жидкой теплоизоляции и слоя огнестойкой краски [12].

2. «ТИТАН-М» — огнезащитная краска с воднодисперсионным однокомпонентным составом, который относится к типу вспучивающихся материалов. «ТИТАН-М» служит для улучшения устойчивости к огню стальных

металлических конструкций. Огнезащитные свойства основываются на многократном вспучивании в процессе теплового воздействия на защищаемую поверхность конструкции при пожаре.

3. «ТЕКСОТЕРМ» является огнезащитной эмалью, включающей уникальное полиакриловое вещество с составом, обогащенным органическими растворителями, и содержанием сухих веществ более 70 %. Особенность эмали в том, что при нагреве свыше 200 °С она расширяется, образуя слой углеродной пены. Эта пена обладает отличными теплоизоляционными свойствами, эффективно защищая конструкции от прямого воздействия огня и перегрева.

4. «ОСМ-1 ГЕФЕСТ» — однокомпонентный огнезащитный состав, который при нагревании вспучивается, создавая защитный слой. Состав применяется для защиты стальных элементов в зданиях различного назначения — от промышленных до жилых, — эксплуатируемых в условиях умеренного климата (температура от –40 °С до +60 °С и влажность до 80 %). Возможна колеровка состава в заводских условиях по желанию заказчика без ущерба для его огнезащитных свойств (необходимо согласование с производителем). Для защиты от атмосферных воздействий рекомендуется нанесение поверх огнезащитного слоя финишного лака «ГЕФЕСТ ОФЛ-1» или других совместимых материалов, одобренных производителем. «ОСМ-1 ГЕФЕСТ» соответствует всем требованиям пожарной безопасности, установленным в Техническом регламенте [13] и [14].

5. «ВД-АК-502-ОВ NEO» — огнезащитная краска, предназначенная для повышения предела огнестойкости металлических конструкций в жилых, промышленных и общественных зданиях.

6. «Pirex-Metal Plus» — средство, представляющее собой огнестойкую краску для металлургических изделий, которая также предусматривает улучшение огнестойкости каркасов из металла при условии их защиты от непосредственного контакта с водой. Может наноситься как на внутренние, так и на наружные

металлические элементы, расположенные под укрытием, с предварительным нанесением защитного слоя.

В таблице представлены базовые характеристики исследуемых огнезащитных составов на водной основе, предназначенных для применения на металлических конструкциях.

Таблица
Сравнительные характеристики огнезащитных красок на водной основе
для защиты металлических конструкций

Table
Comparative characteristics of water-based fire-resistant paints
for protecting metal structures

Наименование параметра Name of the parameter	ТИТАН-ТМ TINAN-TM	ТИТАН-М TINAN-M	ТЕКСОТЕРМ TEKSOTERM	ОСМ-1 ГЕФЕСТ OSM-1 GEFEST	ВД-АК-502- ОВ NEO VD-AK-502OV NEO	Pirex-Metal Plus
Цвет Colour	белый white	белый white	белый/светло-серый white/light grey	н/д not the data	светло-серый light grey	белый, возможна колеровка white, tinting is possible
Характеристика по основе Characteristics based on	водная water	водная water	водная water	водная water	водно-дисперсионная water dispersion	водно-дисперсионная water dispersion
Степень перетира по методу «Клин», мкм, максимальное значение The degree of grinding according to the "wedge" method, microns, no more	300	175	300	320	300	250
Кажущаяся вязкость состава по вискозиметру Брукфильда при температуре $20,0 \pm 0,5$ °C, мПа · с Apparent viscosity of the composition according to the Brookfield viscometer at a temperature of $20.0 \pm \pm 0.5$ °C, MPa · s	140 000	125 000	50 000	125 000	130 000	130 000
Плотность покрытия, кг/м ³ Density, kg/m ³ .	570 ± 120	1 220 ± 130	1 400 ± 100	1 220 ± 130	1 400 ± 100	1 400 ± 100
Теоретический расход для получения покрытия толщиной 1 мм (1 000 мкм), кг/м ² The theoretical consumption for obtaining a coating	1,2 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,4 ± 0,1

Окончание таблицы

Наименование параметра Name of the parameter	ТИТАН-ТМ TINAN-TM	ТИТАН-М TINAN-M	ТЕКСОТЕРМ TEKSOTERM	ОСМ-1 ГЕФЕСТ OSM-1 GEFEST	ВД-АК-502- ОВ NEO VD-AK-502OV NEO	Pirex-Metal Plus
with a thickness of 1 mm (1 000 microns), kg/m ²						
Адгезия покрытия X-образ- ным надрезом, баллы, макси- мальное значение Adhesion of the coating with an X-shaped incision, point, no more	2	2	2,5	2,5	2	2,5
Время высыхания до степени 3 при температуре не более 20 °С, ч Drying time to a degree of 3 no more at a temperature of 20 °С, h	10	9	10	24	12	12
Срок службы покрытия The service life of the coating	не менее 25 лет at least 25 years old	не менее 25 лет at least 25 years old	не менее 15 лет at least 15 years old	не менее 10 лет at least 10 years old	не менее 12 лет at least 12 years old	до 10 лет без защитно- го покрытия и до 15 лет с защитным покрытием up to 10 years without protective coating and up to 15 years with protective coating
Диапазон температур эксплу- атации покрытия, °С Operating temperature range of the coating, °С	-50...+50	-50...+50	-20...+40	+5...+40	0...+40	+5...+35
Температура нанесения, °С Application temperature, °С	от +5 from +5	от +5 from +5	от +5 from +5	от +5 from +5	от +5 from +5	от +5 from +5

К основным параметрам для составления характеристики были отнесены следующие:

- 1) степень перетира — максимальный размер твердых частиц (пигментов и наполнителей), которые остаются после процесса диспергирования в лакокрасочных материалах;
- 2) кажущаяся вязкость — напряжение сдвига, приложенное к жидкости, деленное на скорость сдвига;
- 3) адгезия покрытия — прилипание лакокрасочного материала к окрашиваемой поверхности.

Метод определения степени перетира прибором «Клин» (гриндометром) описан в [15]. «Клин» состоит из измерительной плиты с клинообразным пазом, параллельным ее продольной оси, и скребка (рис. 1). Суть метода заключается в определении глубины клиновидного паза прибора (в мкм) в месте появления видимых частиц или начала штрихов путем его заполнения пробой.

Определение кажущейся вязкости с применением вискозиметра Брукфильда (рис. 2) производилось в соответствии с [16].

Принцип действия основан на измерении крутящего момента. Синхронный двигатель вращает калиброванный шпиндель в образце с постоянной скоростью.

Сопротивление, оказываемое продуктом вращению шпинделя, прямо пропорционально его вязкости и проявляется в виде измеряемого крутящего момента.

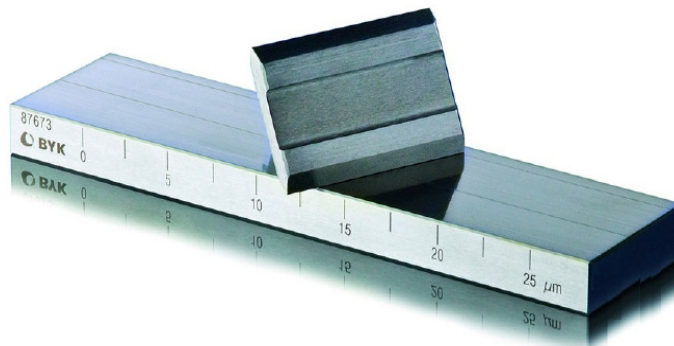


Рис. 1. Внешний вид гриндометра

Fig. 1. Appearance of the grinder



Рис. 2. Внешний вид вискозиметра Брукфильда

Fig. 2. Appearance of the Brookfield Viscometer

Результаты и обсуждения

Сравнение основных параметров, приведенных выше красок представлено на диаграммах (рис. 3–7).

Степень перетира влияет напрямую на качество адгезии с поверхностью нанесения и на такую характеристику краски, как ее укрывистость: чем меньше перетир, тем выше укрывистость, что сокращает не только время, затрачиваемое на ее нанесение, но и общее количество слоев нанесения. Обычно огнезащитную краску наносят

в 2–4 слоя, при этом общая толщина влажного слоя не должна превышать 0,6–0,8 мм. Общеизвестно, что нарушение правил нанесения (увеличение слоя либо не соблюдение требований времени формирования огнезащитного покрытия) может привести к снижению адгезии, срока эксплуатации и снижению огнезащитных свойств краски. Как видно из представленной диаграммы (рис. 3), наибольшая степень перетира у краски «ТИТАН-М» и Pirex-Metal Plus. Схожие значения у красок «ТИТАН-ТМ», «ТЕКСТОТЕРМ» и «ВД-АК-502ОВ NEO».

Наименьшей степенью перетира обладает краска «ОСМ-1 ГЕФЕСТ».

На рисунке 4 представлена сравнительная характеристика кажущейся вязкости состава по вискозиметру Брукфильда.

Показатель кажущейся вязкости применяется для создания необходимой структуры вспененного слоя (пенококса), который образуется при воздействии высоких температур. Если вязкость слишком

низкая, покрытие будет стекать с защищаемой подложки, а если чрезмерно высокая — образующиеся в процессе разложения порофора газы не смогут адекватно продиффундировать, и покрытие не вспучится. Наибольшей вязкостью обладает краска «ТИТАН-ТМ», на втором месте «ВД-АК-502ОВ NEO» и Pirex-Metal Plus, на третьем — «ТИТАН-М» и «ОСМ-1 ГЕФЕСТ», на последнем — «ТЕКСТОТЕРМ».

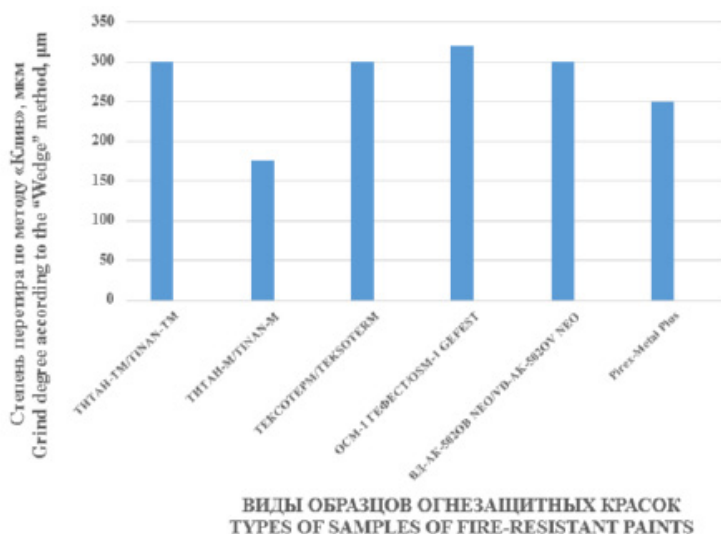


Рис. 3. Оценка параметра огнезащитных красок по степени перетира по методу «Клин», мкм

Fig. 3. Evaluation of the parameter of flame-retardant paints according to the "Wedge" method, microns

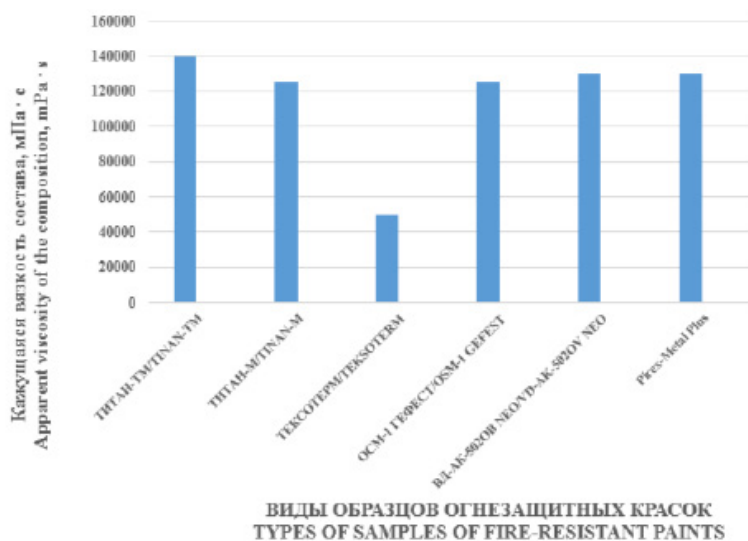


Рис. 4. Кажущаяся вязкость состава по вискозиметру Брукфильда при температуре $20,0 \pm 0,5$ °C, мПа·с

Fig. 4. Apparent viscosity of the composition according to the Brookfield viscometer at a temperature of 20.0 ± 0.5 °C, MPa·s

Сравнение плотности покрытия конструкции рассматриваемыми красками наглядно показано на рисунке 5.

Плотность покрытия влияет на качество слоя, определяя расход и величину дополнительной нагрузки на металлоконструкцию, а также насколько быстро при нагреве увеличивается толщина покрытия, что напрямую влияет на образование теплоизоляционного слоя. Значения плотности покрытия для высокоэффективных огнезащитных составов ле-

жат в диапазоне 1,25–1,60 г/см³. Наибольшая плотность покрытия у «ТЕКСТОТЕРМ», «ВД-АК-502ОВ NEO» и Pirex-Metal Plus, т.е. эти краски имеют лучшую укрывистость. Наименьшей плотностью покрытия обладает «ТИТАНТ-ТМ». Все остальные краски удовлетворяют нормативным требованиям ($1\,300 \pm \pm 100$ кг/м³), содержащимся в [17].

Показатели адгезии покрытия Х-образным надрезом в баллах представлены на рисунке 6.

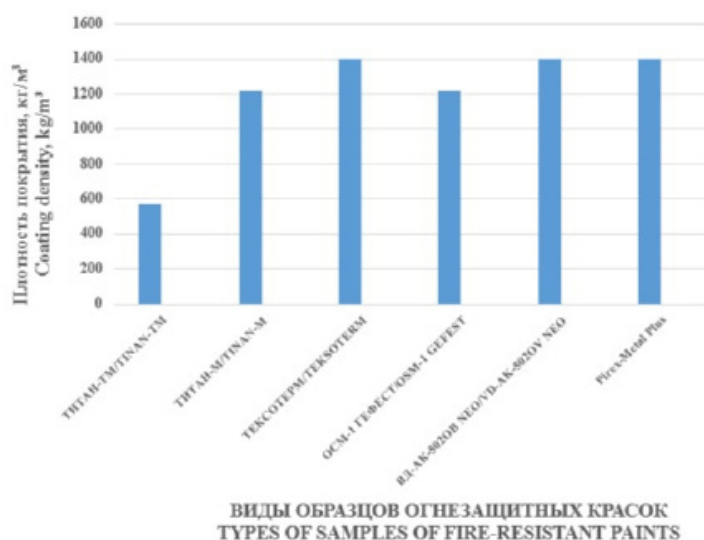


Рис. 5. Плотность покрытия металлических конструкций огнезащитной краской, кг/м³

Fig. 5. The density of coating metal structures with flame retardant paint, kg/m³

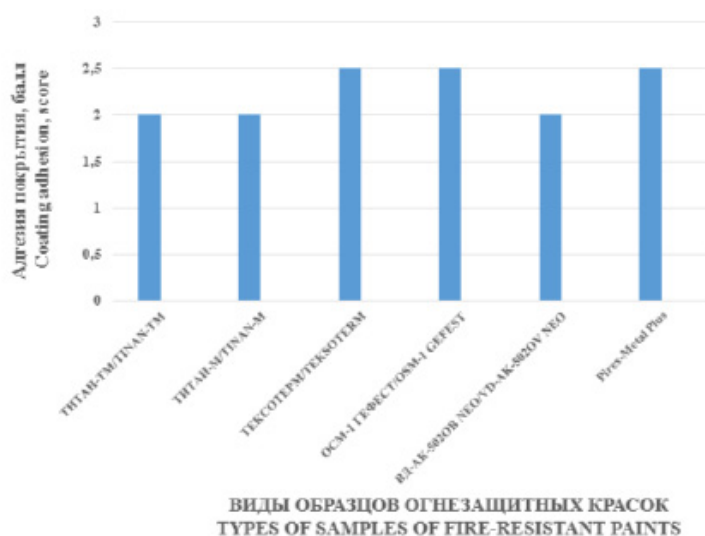


Рис. 6. Адгезия покрытия Х-образным надрезом, баллы

Fig. 6. Adhesion of the coating with an X-shaped incision, points

Слабая адгезия может привести к отслаиванию или осыпанию покрытия и снижению огнезащитных свойств теплоизолирующего слоя. Согласно требованию [18] адгезия огнезащитных покрытий должна быть не более 2 баллов, что допускает присутствие незначительного отслаивания покрытия в местах пересечения решетки,

а также разрушение площади поверхности решетки не более чем на 5 %. Соответствие этим требованиям выявлено только у трех красок: «ТИТАН-ТМ», «ТИТАН-М» и «ВД-АК-502ОВ NEO».

Время высыхания до степени 3 рассматриваемых красок продемонстрировано на рисунке 7.

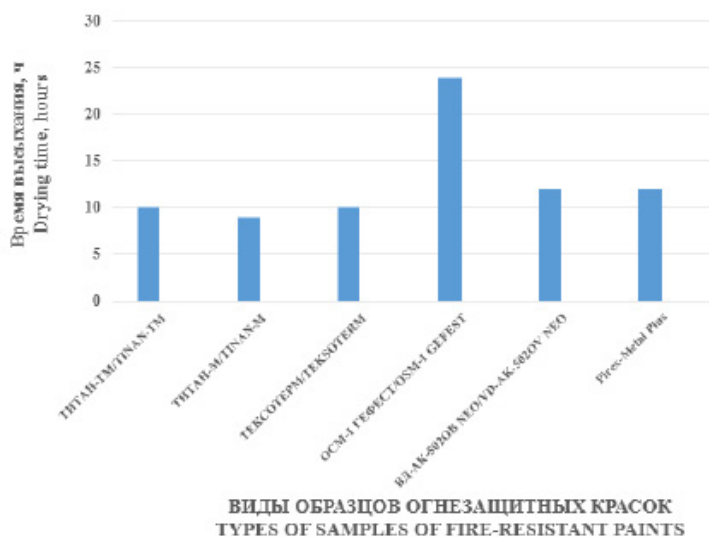


Рис. 7. Время высыхания огнезащитной краски до степени 3 при температуре 20 °С, ч
Fig. 7. Drying time of the flame-retardant paint to a degree of 3 at a temperature of 20 °C, h

В современном мире время играет ключевую роль. Наблюдается стремление к уменьшению временных затрат абсолютно на все виды работ. При этом несоблюдение рекомендаций производителя по времени межслойного высыхания может привести к дефектам покрытия, что снизит его огнезащитные свойства (образование пузырьков на поверхности покрытия). На рисунке приведено время высыхания при 20 °С, но стоит отметить, что время высыхания напрямую зависит от условий окружающей среды, степени разбавления материала, толщины огнезащитного покрытия и других факторов. Недосохший слой имеет низкую прочность и может не выдерживать вес последующих слоев и разрушаться. По этому параметру

сильно отличается от всех красок «ОСМ-1 ГЕФЕСТ» с рекордным временем высыхания слоя в 24 ч.

Выводы

Систематизация литературных источников и проведенный сравнительный анализ ряда огнезащитных красок на водной основе для металлических конструкций показывают, что представленные образцы в целом обладают схожими параметрами. По предварительной оценке, стоит выделить краску «ТИТАН-М», обладающую наилучшими свойствами, и «ОСМ-1 ГЕФЕСТ» с наихудшими показателями среди рассматриваемых красок. Однако оценить эффективность

анализируемых покрытий затруднительно, поскольку в рамках этой работы не рассматривалось их поведение в экстремальных условиях. Для получения более достоверных результатов необходимы дальнейшие исследования (морозостойкость, климатические

исследования показателей огнезащитной эффективности, в т. ч. в виде наложенных совместно друг на друга графиков «температура на необогреваемой поверхности металлических конструкций» — «время» согласно протоколам испытаний).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2022 г. Статистика пожаров и их последствий : информационно-аналитический сборник. Балашиха : ВНИИПО МЧС России, 2023. 80 с.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2023 г. Статистика пожаров и их последствий : информационно-аналитический сборник. Балашиха : ВНИИПО МЧС России, 2024. 110 с.
3. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствий : информационно-аналитический сборник. Балашиха : ВНИИПО МЧС России, 2025. 112 с.
4. Kim Y., Lee S., Yoon H. Fire-Safe Polymer Composites: Flame-Retardant Effect of Nanofillers // *Polymers*. 2021. No. 13 (4). P. 540.
5. Sigmann S. B. Playing with fire: Chemical safety expertise required // *Chemical Education*. 2018. Vol. 95. P. 1736–1746.
6. Нормирование огнестойкости и идентификация строительных конструкций / И. С. Кузнецова [и др.] // *Пожары и ЧС*. 2019. № 4. С. 28–38.
7. Покровская Е. Н. Экономическая эффективность огнезащиты строительных материалов // *Московский экономический журнал*. 2019. № 10. С. 553–557.
8. Fire-Resistant Properties of Green Intumescent Coating Incorporated with BioAsh for Steel Protection / J. H. Beh [et al.] // *Advances in Material Science and Engineering*. Singapore : Springer, 2021. P. 257–264. DOI: 10.1007/978-981-16-3641-7_30.
9. Lee J. S. Investigation of Water-based and Solvent-based Polymer Binders on the Fire Protection Performance and Mechanical Properties of Intumescent Coating : Bachelor's thesis. Malaysia, 2019. P. 21–32.
10. Thin coatings for fire protection: An overview of the existing strategies, with an emphasis on layer-by-layer surface treatments and promising new solutions / A.-L. Davesne [et al.] // *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 154. Art. 106217
11. Fire Safety Management in India: A Review : Conference paper / A. Vidyadharan [et al.] // *Advances in Fire and Process Safety*. 2018. P. 171–181.
12. Об утверждении свода правил СП 2.13130 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» : приказ МЧС России от 12.03.2020 № 151 (ред. от 06.11.2025) // Судебные и нормативные акты Российской Федерации : сайт. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-mchs-rossii-ot-12032020-n-151/prikaz/?ysclid=msegs4ml67932035348> (дата обращения: 10.05.2026).
13. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон № 123-ФЗ : принят Государственной Думой 04.07.2008 : одобрен Советом Федерации 11.07.2008 //

Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 24.04.2026).

14. ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. М. : Стандартинформ, 2009. 9 с.

15. ГОСТ 31973-2013. Материалы лакокрасочные. Метод определения степени перетира. М. : Стандартинформ, 2014. 8 с.

16. ГОСТ 25271-93. Пластмассы. Смолы жидкие, эмульсии или дисперсии. Определение кажущейся вязкости по Брукфильду. Минск : Издательство стандартов, 1994. 11 с.

17. ГОСТ Р 59273-2020. Огнезащитный состав (покрытие) по стали на водно-дисперсионной основе. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2021. 7 с.

18. ГОСТ 15140-78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии. М. : Стандартинформ, 2009. 8 с.

REFERENCES

1. Fires and fire safety in 2022. Statistics of fires and their consequences : information and analytical collection. Balashikha : VNIPO EMERCOM of Russia, 2023. 80 p.

2. Fires and fire safety in 2023. Statistics of fires and their consequences : information and analytical collection. Balashikha : VNIPO EMERCOM of Russia, 2024. 110 p.

3. Fires and fire safety in 2024. Statistics of fires and their consequences : information and analytical collection. Balashikha : VNIPO EMERCOM of Russia, 2025. 112 p.

4. Kim Y., Lee S., Yoon H. Fire-Safe Polymer Composites: Flame-Retardant Effect of Nanofillers // Polymers. 2021. No. 13 (4). P. 540.

5. Fire Safety Management in India: A Review : Conference paper / A. Vidyadharan [et al.] // Advances in Fire and Process Safety. 2018. P. 171–181.

6. Sigmann S. B. Playing with fire: Chemical safety expertise required // Chemical Education. 2018. Vol. 95. P. 1736–1746.

7. Rationing of fire resistance and identification of building structures / Kuznetsova I. S. [et al.] // Fires and emergencies. 2019. No. 4. P. 28–38.

8. Fire-Resistant Properties of Green Intumescent Coating Incorporated with BioAsh for Steel Protection / J. H. Beh [et al.] // Advances in Material Science and Engineering. Singapore : Springer, 2021. P. 257–264. DOI: 10.1007/978-981-16-3641-7_30

9. Lee J. S. Investigation of Water-based and Solvent-based Polymer Binders on the Fire Protection Performance and Mechanical Properties of Intumescent Coating : Bachelor's thesis. Malaysia, 2019. P. 21–32.

10. Thin coatings for fire protection: An overview of the existing strategies, with an emphasis on layer-by-layer surface treatments and promising new solutions / A.-L. Davesne [et al.] // Progress in Organic Coatings. 2021. Vol. 154. Art. 106217.

11. Pokrovskaya E. N. Economic efficiency of fire protection of building materials // Moscow Economic Journal. 2019. No. 10. P. 553–557.

12. On approval of the code of rules SP 2.13130 "Fire protection systems. Ensuring the fire resistance of protective objects" : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 12.03.2020 No. 151

(as amended on 06.11.2025) // Judicial and Regulatory acts of the Russian Federation : website. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-mchs-rossii-ot-12032020-n-151/prikaz/?ysclid=msegs4ml67932035348> (accessed 10.05.2026).

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

14. GOST R 53295-2009. Fire protection products for steel structures. General requirements. Method for determining fire-retardant effectiveness. Moscow : Standartinform, 2009. 9 p.

15. GOST 31973-2013 Paint and varnish materials. A method for determining the degree of grinding. Moscow : Standartinform, 2014. 8 p.

16. GOST 25271-93 Plastics. Liquid resins, emulsions or dispersions. Determination of apparent viscosity by Brookfield. Minsk : Publishing House of Standards, 1994. 11 p.

17. GOST R 59273-2020 Flame retardant (coating) for water-dispersion-based steel. Technical specifications. Moscow : Standartinform, 2021. 7 p.

18. GOST 15140-78 Paint and varnish materials. Methods for determining adhesion. Moscow : Standartinform, 2009. 8 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тухбатулин Максим Наильевич, адъюнкт очной формы обучения адъюнктуры Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 1254387; ORCID: 0009-0004-4586-1143; e-mail: tuchbatulin93@mail.ru

Тикина Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 843403; ORCID: 0000-0001-6262-1580; e-mail: IVTikina@yandex.ru

Цыганков Михаил Сергеевич, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 149); РИНЦ ID: 1229735; e-mail: 33mixon33@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maxim N. Tukhbatulin, the full-time study adjunct UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira Str., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); AuthorID: 1254387; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6262-1580>; e-mail: tuchbatulin93@mail.ru

Irina V. Tikina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira Str., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); AuthorID: 843403; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6262-1580>; e-mail: IVTikina@yandex.ru

Mikhail S. Tsygankov, the full-time study adjunct, Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia, (149 Moskovsky Prospekt, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation); ID RISC: 1229735; e-mail: 33mixon33@mail.ru

УДК 614.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОТЕКАНИЯ ПОЖАРА НА ГИБРИДНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ЗАПРАВОЧНОЙ СТАНЦИИ

Королев Денис Сергеевич¹, Епифанов Евгений Николаевич², Кончаков Сергей Александрович³

¹ Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России, г. Воронеж, Российская Федерация

² Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, г. Воронеж, Российская Федерация

³ Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Вопросы обеспечения пожарной безопасности на объектах защиты тесно связаны с финансовыми вложениями. Поэтому неудивительно, что предлагаются различные варианты по уменьшению вторых, не снижая общий уровень безопасности. К одним из таких способов можно отнести комбинирование похожих технологических процессов, объединение помещений по классу функциональной пожарной опасности. Характерным мировым примером является строительство комбинированных (гибридных) автомобильных заправочных станций, позволяющее снизить капитальные и эксплуатационные расходы, сэкономить земельные ресурсы. В этом случае специалисты должны обеспечить комплексный подход для защиты населения и их имущества. Однако оба вида топлива (водород и бензин) представляют собой взрывоопасные вещества, способные привести к катастрофическим последствиям. Для предотвращения деструктивных ситуаций на подобных объектах следует проводить оценку пожарной опасности и устанавливать величину пожарного риска. В нашем исследовании оценку риска проводили при помощи специального программного обеспечения при различных сценариях. Наиболее опасным был признан случай, при котором происходит утечка водорода из диспенсера, что приводит к факельному возгоранию, а это в свою очередь разрушает топливораздаточную колонку с бензином, вызывая вторичную аварию. Данное исследование может стать основой как для определения безопасных противопожарных расстояний между технологическим оборудованием, так и оптимизации планировки объекта защиты.

Ключевые слова: гибридная автозаправочная станция, вероятность события, пожарная безопасность, риск, эмпирические зависимости

Для цитирования: Королев Д. С., Епифанов Е. Н., Кончаков С. А. Исследование процесса протекания пожара на гибридной автомобильной заправочной станции // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 75–90.

A STUDY OF THE FIRE BEHAVIOR AT A HYBRID VEHICLE FILLING STATION

Denis S. Korolev¹, Evgeny N. Epifanov², Sergey A. Konchakov³

¹ Voronezh institute of Advanced Training of Employees of the EMERCOM of Russia, Voronezh, Russian Federation

² Voronezh State University of Forestry and Technologies named G. F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

³ SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

Abstract. Fire safety issues at protected facilities are currently closely intertwined with financial investments. Therefore, it's not surprising that various options are being proposed to reduce the latter without compromising overall safety. Some of these methods include combining similar technological processes and grouping facilities according to functional fire hazard class. A typical global example is the construction of combined (hybrid) petrol stations, which reduce capital and operating costs and conserve land resources. In this case, specialists must ensure a comprehensive approach to protecting the population and their property. However, both fuels (hydrogen and gasoline) are explosive substances that can lead to catastrophic consequences. To prevent destructive situations at such facilities, it is necessary to conduct a fire hazard assessment and determine the fire risk. In our study, the risk assessment was conducted using specialized software across various scenarios. The most dangerous scenario was identified as a hydrogen leak from the dispenser, leading to a flare-up fire that, in turn, destroys the gasoline dispenser, causing a secondary accident. This study can serve as a basis for determining safe fire distances between process equipment and optimizing the layout of the protected facility.

Keywords: hybrid petrol station, probability of event, fire safety, risk, empirical dependencies

For citation: Korolev D. S., Epifanov E. N., Konchakov S. A. A study of the fire behavior at a hybrid vehicle filling station // *Technosphere safety*. 2026. No. 3 (52). P. 75–90.

Введение

В условиях стремительного изменения климата, отказа от традиционных видов топлива, нехватки энергии происходит постепенная переориентация всех отраслей промышленности на использование возобновляемых источников энергии и развитие зеленой энергетики. Большинство стран мира, включая и Российскую Федерацию, обозначили развитие водородной энергетики как национальную стратегию в достижении технологического преимущества и суверенитета [1–3].

На сегодняшний день производство удобрений, повышение качества бензина, улучшение свойств стали, производство маргарина и твердых кондитерских жиров методом

гидрогенизации растительных масел, охлаждение генераторов на электростанциях, проведение гидроочистки, гидрообессеривания, гидрокрекинга, регенерации катализаторов не обходится без применения водорода. Перспектива перехода на водородную энергетику с углеводородной и дальнейшее использование в качестве топлива для автомобилей увеличивают потребность в чистом источнике энергии на порядок [4]. Например, в КНР строительство комбинированных заправочных станций кратно возросло. С 2016 г. было построено свыше 270 гибридных (водородно-бензиновых) автомобильных станций, считающихся одним из оптимальных вариантов, обусловленных снижением затрат на строительство и обслуживание объектов защиты в пределах одного земельного участка.

Отметим, что водород представляет собой легкий взрывоопасный газ, обладающий широким диапазоном воспламенения и минимальной энергией зажигания в сравнении с традиционными источниками энергии (природным газом, бензином), и в совокупности с человеческим фактором, выходом из строя инфраструктуры (клапанов, фланцевых соединений и др.), способностью охрупчивать металл, слабой организацией системы безопасности повышает вероятность возникновения деструктивных ситуаций техногенного характера [5, 6]. Несоблюдение противопожарных расстояний повышает риск того, что при возгорании одного объекта огонь быстро перекинется на рядом стоящие здания, сооружения или строения — возникнет эффект домино.

Поэтому основной целью настоящей работы является всесторонний анализ и оценка пожарной опасности водородно-бензиновой инфраструктуры на примере многотопливной заправки.

Методы и результаты исследований

Многотопливные автомобильные заправочные станции (АЗС) характеризуются повышенной взрывопожароопасностью, особенно если она расположена в городской черте с высокой плотностью населения и интенсивным движением. Следовательно, установление причин образования горючей среды и источников зажигания является неотъемлемой задачей в обеспечении безопасности людей.

В качестве объекта исследования выбрана стандартная многотопливная заправочная станция (рис. 1), включающая несколько зон [7]:

- заправочное оборудование (компрессоры, резервуары для хранения топлива, система трубопроводов);
- зона заправки водородом (топливораздаточные колонки);
- зона заправки бензином (топливораздаточные колонки);
- торговая зона.

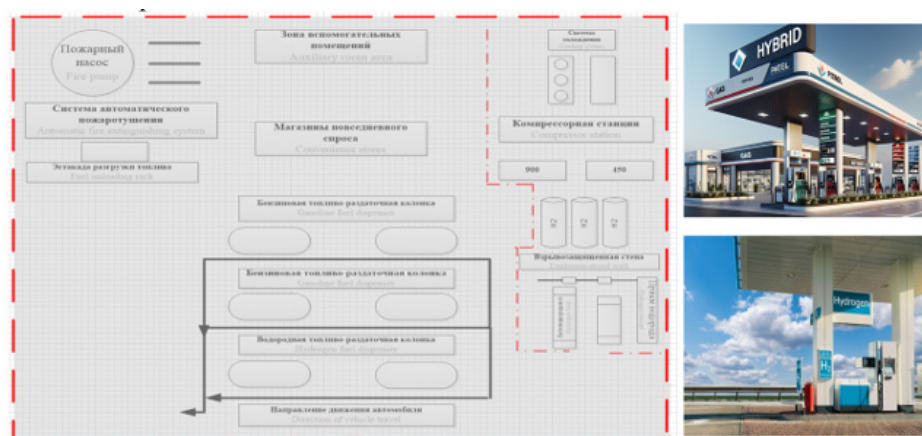


Рис. 1. Принципиальная схема комбинированной заправочной станции

Fig. 1. Schematic diagram of a combined filling station

Все зоны перегружены людьми и транспортными средствами, это увеличивает тяжесть потенциальных последствий. Водородное топливо, как и бензин, производится

за пределами гибридной заправочной станции и при помощи автомобильного транспорта с композитными баллонами под высоким давлением доставляется к потребителю.

Согласно статистическим данным, к обстоятельствам, способствующим возникновению пожаров и взрывов на подобных объектах, следует отнести (рис. 2):

- человеческий фактор: нарушение правил пожарной безопасности, диверсия третьих лиц, применение беспилотных воздушных судов, человеческая рассеянность (например, когда автовладелец забывают вытащить заправочный пистолет из бака автомобиля), искры системы выхлопа автомобиля;
- технологический и химический факторы: отказы технологического оборудования, использование оборудования несоответствующего уровня, класса и степени защиты, неисправность электрического оборудования, воздействие электростатического электричества, усталость металла, коррозия;
- механический фактор: проведение ремонтных и очистных работ, поврежде-

ние водородного дозатора, некачественная перепрессовка;

- факторы окружающей среды: воздействие атмосферного электричества.

В целях обеспечения пожарной безопасности на объекте защиты реализована система безопасности, которая должна сработать за доли секунды, минимизируя объемы выброса горючего газа:

- пожарная автоматика (система пожарной сигнализации, система пожаротушения, система комплексного управления);
- устройство защиты электрических цепей (исключение образования искр, перегрузки, больших переходных сопротивлений и т. д.);
- ручная система аварийного отключения;
- система зануления и заземления;
- предусмотрено обвалование.



Рис. 2. Наиболее вероятные места возникновения аварийных ситуаций

Fig. 2. Most likely locations for the occurrence of emergency situations

В основу методологии идентификации пожарного риска был заложен принцип комплексного анализа пожароопасных свойств используемых веществ, применяемого оборудования, позволяющего опре-

делить интенсивность излучения и потенциальный вред, оказываемый на человека (рис. 3) [8, 9].

Для определения инициирующих событий использовали основные руководящие

документы [9, 10], которые опираются на вероятности базовых событий, с учетом реализованной на объекте защиты системы пожарной безопасности, влияющей на их развитие. Водородная энергетика — достаточно молодое направление, следова-

тельно, специализированной базы данных по частотам отказов водородного оборудования пока не существует, поэтому частоты инициирующих событий получали расчетным способом, анализом литературы, экспертным опросом [9–13].



Рис. 3. Алгоритм идентификации пожарного риска для гибридной АЗС (ГС — горючая среда, ИЗ — источник зажигания)

Fig. 3. Fire risk identification algorithm for a hybrid petrol station (CS — combustible medium, IS — ignition source)

Для определения наиболее вероятного и неблагоприятного сценария возникновения деструктивного события подготовили графологическое дерево отказов на основе логического рассуждения и оценки опасности системы при эксплуатации водорода (рис. 4). В табл. 1 представлены основные показатели вероятности.

К сценариям с повышенной взрывопожароопасностью при утечке водорода следует отнести:

- истечение газа из отверстия (в случае быстрой утечки образуется турбулентная струя, быстро создающая взрывоопасную смесь, присутствует высокий риск мгновенного воспламенения от электростатики самой струи);

- импульс волны давления при разрыве резервуара с водородом;
- образование огненного шара;
- взрыв (мгновенное и отсроченное воспламенение утечки водорода высокого давления из заправочного шланга);
- импульс волны давления при сгорании газопаровоздушной смеси;
- тепловое излучение при факельном горении (опасная тепловая волна).

Для моделирования развития взрывоопасной ситуации, связанной с выходом водорода, использовали специальное программное обеспечение, реализующее вычислительную динамическую модель тепломассопереноса при горении. Программа особое внимание уделяет распространению

опасных факторов пожара и теплопередаче. Также были приняты следующие условия:

— основное вещество — водород (давление — 35 МПа, массовый расход — 0,6 кг/с);

— побочный продукт — бензин (плотность — 0,725 г/мл, объем бака автомобиля — 45 л);

— скорость ветра — 2 м/с;

— внутренний диаметр шланга — 6,35 мм.

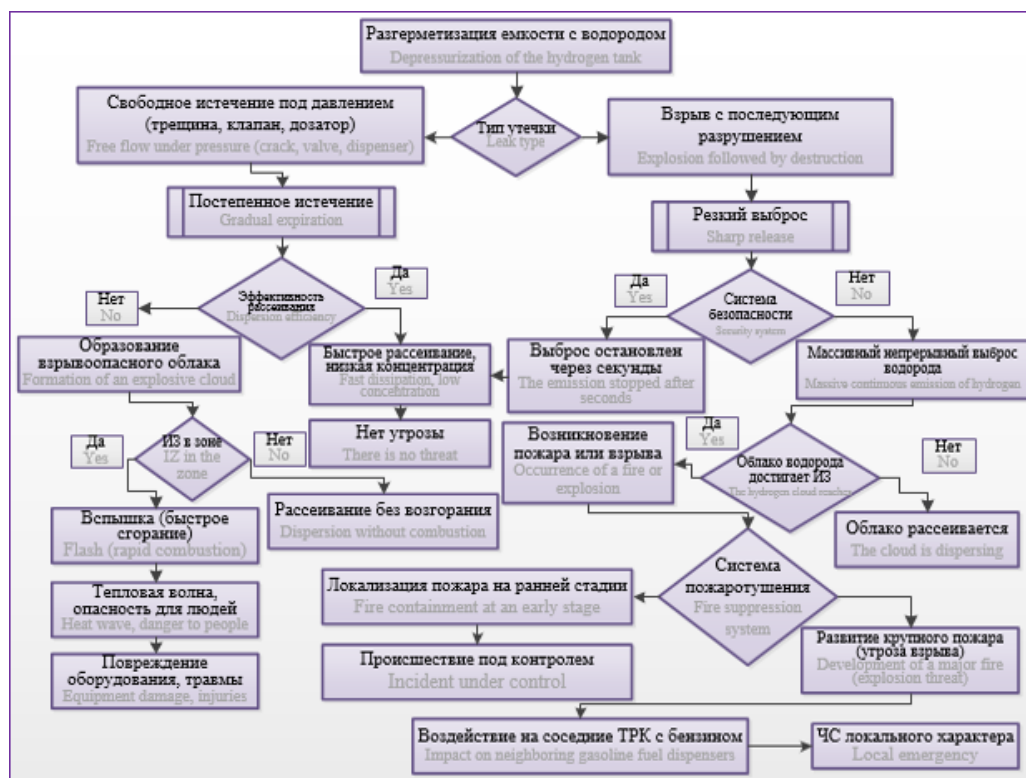


Рис. 4. Дерево отказов для сценария утечки водорода

Fig. 4. Derevo otkazov dlya stsenariya utechki vodoroda

Таблица 1
Вероятность возникновения оперативного события

Table 1
Probability of occurrence of an operational event

Обозначение Designation	Определение Definition	Значение Meaning
Разгерметизация резервуара для хранения сжиженных газов (водород) (полное разрушение) Leakage of a liquefied gas storage tank (hydrogen) (complete destruction)		
$Q_{1,1}$	Разрушение — мгновенное воспламенение — огненный шар Destruction — instantaneous ignition — fireball $Q_{1,1} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
$Q_{1,2}$	Разрушение — мгновенное воспламенение — взрыв Destruction — instantaneous ignition — explosion $Q_{1,2} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1 \cdot 0,2 = 1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$

Окончание таблицы 1

Обозначение Designation	Определение Definition	Значение Meaning
$Q_{1.3}$	Разрушение — мгновенное воспламенение — быстрое сгорание без взрыва Destruction — instantaneous ignition — rapid combustion without an explosion $Q_{1.3} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
$Q_{1.4}$	Разрушение — нет мгновенного воспламенения — облако — последующее воспламенение бензина Destruction — no instant ignition — cloud — subsequent ignition of gasoline $Q_{1.4} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,3 = 8,1 \cdot 10^{-8}$	$8,1 \cdot 10^{-8}$
При частичном разрушении резервуара с водородом Partial destruction of the hydrogen tank		
$Q_{2.1}$	Утечка — мгновенное воспламенение — огненный шар Leak — instant ignition — fireball $Q_{2.1} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
$Q_{2.2}$	Утечка — мгновенное воспламенение — взрыв Leak — instantaneous ignition — explosion $Q_{2.2} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,2 = 1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
$Q_{2.3}$	Утечка — мгновенное воспламенение — быстрое сгорание Leak — instantaneous ignition — rapid combustion $Q_{2.3} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
$Q_{2.4}$	Утечка — нет мгновенного воспламенения — облако — последующее воспламенение бензина Leak — no immediate ignition — cloud — subsequent ignition of gasoline $Q_{2.4} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,3 = 8,1 \cdot 10^{-7}$	$8,1 \cdot 10^{-7}$
$Q_{2.5}$	Утечка — нет мгновенного воспламенения — облако — воспламенение водорода — переход на бензин Leak — no instant ignition — cloud — hydrogen ignition — transition to gasoline $Q_{2.5} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,7 \cdot 0,5 = 9,45 \cdot 10^{-7}$	$9,45 \cdot 10^{-7}$

В большинстве случаев техногенные аварии одновременно наносят ущерб материальному имуществу, окружающей среде, представляют серьезную опасность для людей. Поэтому в нашем исследовании обеспечим единообразную оценку потерь по всем трем аспектам. Кроме того, предполагается, что вы-

ход водорода наружу будет происходить в разных направлениях для понимания опасности в различных местах объекта защиты.

Сценарий 1 подразумевает: постепенную утечку горючего газа — рассеивание — образование газообразного облака — вспышку — тепловую волну (1):

$$Q_{s1} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,9 = 2,43 \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

На рис. 5 показано стремительное распространение пламени после внезапного воспламенения водорода. С течением времени температура начинает уменьшаться, а максимальное значение зафиксировано на отметке 927 °С. Отметим, что пламя поднимается

вверх и распространяется на бензиновую топливораздаточную колонку (ТРК). Через 2–4 с с момента начала возгорания огонь переходит в устойчивое состояние. Термическое излучение колеблется вверх-вниз под воздействием потоков ветра. После стабилизации пламени

происходит тепловое воздействие на бензиновую топливораздаточную колонку со средним значением $116,1 \text{ кВт/м}^2$.

Сценарий 2 подразумевает вспышку газовой среды при том, что система обеспечения безопасности не срабатывает (2):

$$Q_{s2} = 2,43 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9 = 2,187 \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

На рис. 6 представлена несколько иная ситуация: когда факельное горение водорода распространяется в противоположную сторону, а длина струи достигает 17 м, что обусловлено отсутствием препятствий.

Однако, если проезжая часть находится на расстоянии 15 м от места утечки, то тепловому воздействию будут подвергать-

ся люди и мимо проезжающие автомобили. При этом значение лучистого теплового потока составит 48 кВт/м^2 . Поэтому любой автомобиль, припаркованный ближе 15 м, будет поврежден. Также существует вероятность летального исхода у людей при воздействии на них опасного фактора в течение 10 с.

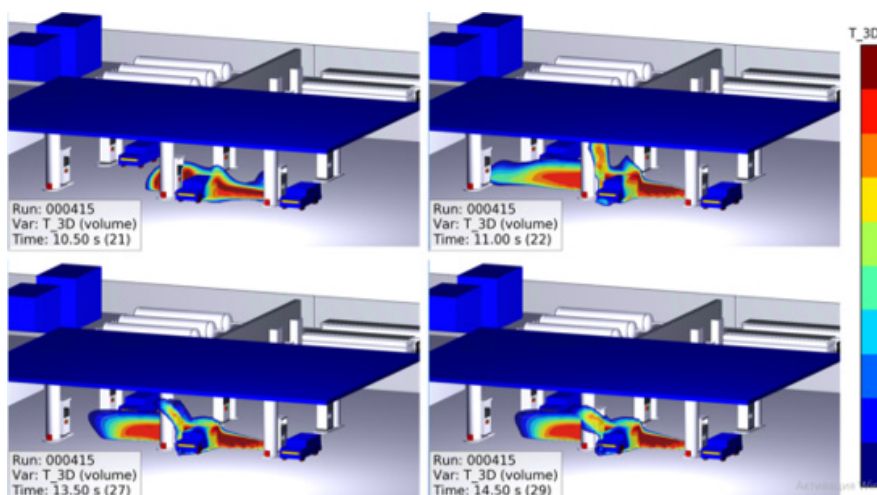


Рис. 5. Развитие деструктивной ситуации с водородом по сценарию 1

Fig. 5. Development of a destructive situation with hydrogen according to scenario 1

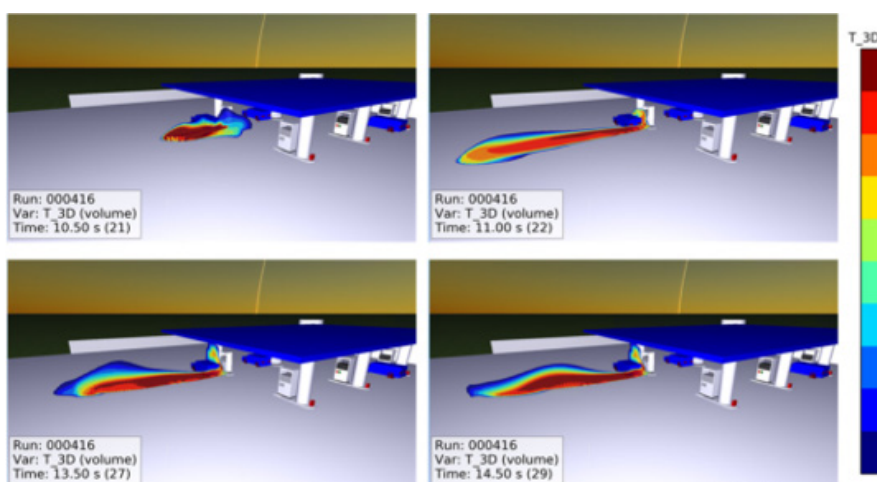


Рис. 6. Развитие деструктивной ситуации с водородом по сценарию 2

Fig. 6. Development of a destructive situation with hydrogen according to scenario 2

Сценарий 3 — ситуация, когда газообразный водород будет скапливаться в пространстве между топливораздаточными колонками. Инициатором горения может быть маломощный источник зажигания: искра статического электричества, искры выхлопной трубы, что обусловлено крайне малой энергией воспламенения водорода (0,02 мДж).

В этом случае произойдет взрыв с максимальным расчетным избыточным давлением 0,055 МПа. Такое давление может привести к серьезным повреждениям основных строительных конструкций, технологического оборудования, к утечке бензина и последующим негативным последствиям.

Сценарий 4 также подразумевает возможность взрыва водорода. Ключевым отличием от сценария 3 выступает ограниченность объема горючего вещества, определяемая объемом бака автомобиля (рис. 7). Максимальное давление взрыва будет относительно низкое, что обусловлено свободным окружающим пространством, быстрым испарением водорода. По мере того, как топливо в автомобиле будет заканчиваться, негативные последствия также будут снижаться.

Повышенное давление в локальной зоне не достигнет дороги или здания АЗС. Серьезные повреждения может получить ТРК (3):

$$Q_{s4} = 1,25 \cdot 10^{-7} \cdot 0,3 \cdot 1 = 3,645 \cdot 10^{-8} \quad (3)$$

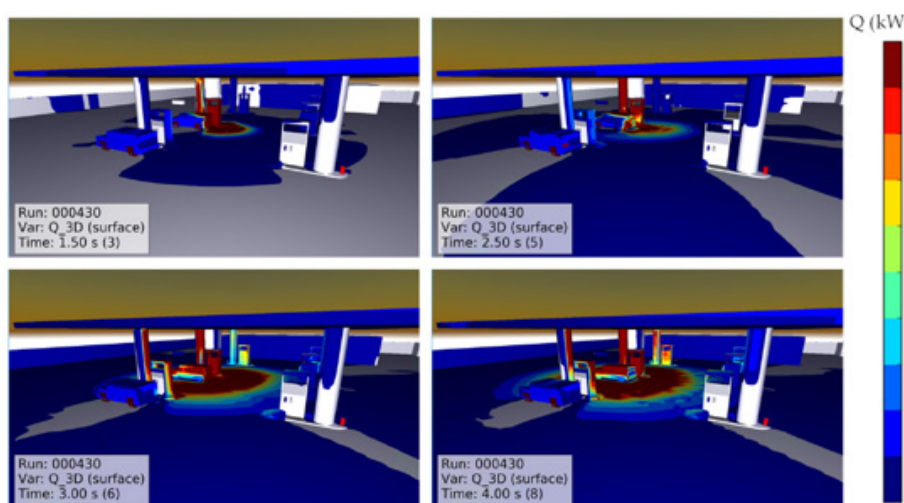


Рис. 7. Развитие деструктивной ситуации с водородом по сценарию 4

Fig. 7. Development of a destructive situation with hydrogen according to scenario 4

При некоторых обстоятельствах, способствующих длительному воздействию теплового излучения, может быть разрушена соседняя ТРК.

Отметим, что при моделировании всех четырех сценариев наблюдается колебание давления от отрицательного до положительного манометрического, после — достигаются показатели атмосферного давления. В соот-

ветствии с основными критериями повреждений при воздействии максимального избыточного давления отмечается деформация стальных конструкций, находящихся в зоне действия системы подачи газа.

Рассмотрим некоторые эмпирические зависимости по исследованию (табл. 2–4). Для струйного горения водорода (4) и для теплового потока 15 кВт/м² (5):

$$R = 0,9 \cdot \sqrt{m} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,9 \cdot \sqrt{0,6} \cdot \frac{35}{0,1} = 244 \text{ м.} \quad (4)$$

$$R = 0,4 \cdot \sqrt{m} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,4 \cdot \sqrt{0,6} \cdot \frac{35}{0,1} = 108,5 \text{ м.} \quad (5)$$

Линейная аппроксимация для диапазона 35–70 МПа (6):

$$R = (P) = 3,1 \cdot P.$$

$$R_1 = (35) = 108,5. \quad (6)$$

$$R_2 = (50) = 155.$$

$$R_3 = (70) = 217.$$

Массовый расход водорода зависит от диаметра отверстия, тогда (7):

$$m = C_d \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot P \cdot \sqrt{\frac{M}{ZRT}}.$$

$$m = 0,85 \cdot \frac{\pi \cdot (0,00635)^2}{4} \cdot 35 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{0,002}{1,1 \cdot 8,314 \cdot 293}}. \quad (7)$$

$$m = 0,85 \cdot 3,167 \cdot 10^{-5} \cdot 3,5 \cdot 10^7 \cdot 8,63 \cdot 10^{-4} = 0,01488.$$

где:

C_d — коэффициент истечения 0,85;

M — молярная масса 0,002 кг/моль;

Z — коэффициент сжимаемости при 35 МПа (~1,1);

R — газовая постоянная 8,314 Дж/(моль · К);

T — 293 К.

Таблица 2
Эмпирические зависимости (диаметр, площадь, масса)

Table 2
Empirical dependencies (diameter, area, mass)

Диаметр, d (мм) Diameter, d (mm)	Площадь, S (мм ²) Area, S (mm ²)	Масса, m (кг/с) Weight, m (kg/s)
1	0,785	0,0117
3,18	7,94	0,118
6,35	31,67	0,6
10	78,54	1,168
12,7	126,7	1,885

Определим зависимость теплового потока и расстояния. Из закона сохранения энергии для факела (8):

$$q(r) = \frac{\eta \cdot m \cdot H_c}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{0,2 \cdot 0,6 \cdot 120 \cdot 10^6}{12,57 \cdot r^2} = \frac{1,146 \cdot 10^6}{r^2}, \quad (8)$$

где H_c — доля энергии, идущая на излучение, $120 \cdot 10^6$.

В нашем случае путем моделирования получаются несколько другие значения, поэтому продолжим аппроксимацию уравнения. Степенная функция (9):

$$q = q_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^n = 48 = 116 \cdot \left(\frac{2}{15}\right)^n. \quad (9)$$

$$\left(\frac{2}{15}\right)^n = 0,4138.$$

$$n = \frac{\ln 0,4138}{\ln 0,1333} = \frac{-0,882}{-2,015} = 0,438.$$

$$q(r) = 116 \cdot \left(\frac{2}{15}\right)^{0,438}.$$

Таблица 3
Эмпирические зависимости (радиус, тепловой поток, негативное воздействие)

Table 3
Empirical dependencies (radius, heat flow, negative impact)

Радиус, r (м) Radius, r (m)	Тепловой поток, q (кВт/м ²) Heat flux, q (kW/m ²)	Воздействие Impact
1	144,5	смертельно за 1–2 с fatally in 1–2 sec.
2	116	—
5	77,5	ожоги 3-й степени third-degree burns
10	56,6	ожоги 3-й степени second-degree burns
15	48	—

Рассчитаем вероятность возникновения одного из негативных событий. Предположим, что на гибридной АЗС

имеются 4 баллона, 20 фланцевых соединений, 8 клапанов, тогда суммарная вероятность (10):

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{сум}} &= 4 \cdot Q_{2.1} + 20 \cdot Q_{\text{фл}} + 8 \cdot Q_{\text{кл}}. \\ Q_{\text{фл}} &= 0,1 \cdot Q_{2.1} = 5 \cdot 10^{-7}. \\ Q_{\text{кл}} &= 0,5 \cdot Q_{2.1} = 2,5 \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{сум}} = 4 \cdot 5 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 5 \cdot 10^{-7} + 8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 5,0 \cdot 10^{-5}.$$

Тогда вероятность аварии за определенный промежуток времени (t) (для малых вероятностей) будет определяться формулой (11):

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda_{\text{сум}} \cdot t} \approx \lambda_{\text{сум}} \cdot t. \quad (11)$$

Таблица 4
Вероятность негативного события

Table 4
Probability of a negative event

Время, t (лет) Time, t (years)	Риск, $P(t)$ Risk, $P(t)$	Вероятность Probability
1	$5 \cdot 10^{-5}$	1/20000
2	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1/4000
5	$5 \cdot 10^{-4}$	1/2000
20	$1 \cdot 10^{-3}$	1/1000

Для определения величины пожарного риска распределим зоны объекта защиты и вероятности поражения людей в них:

— зона водородного оборудования, емкость с водородом (зона В): $Q_{1.1}, Q_{1.2}, Q_{1.3}, Q_{2.1}, Q_{2.2}, Q_{2.3}, Q_{2.5}$;

— зона бензинового оборудования, емкости (зона Б): $Q_{1.4}, Q_{2.4}, Q_{2.5}$;

— зона административного здания (зона А): только вторичные воздействия

(ударная волна, тепловое излучение на расстоянии и т. д.);

— селитебная зона (зона С): только социальный риск.

Значение потенциального пожарного риска следует определять по формуле (12). Для расчета индивидуального пожарного риска следует использовать формулу (13). Сводная табл. 5 рассчитанных значений представлена ниже.

$$P_n = \sum_{j=1}^J Q_j \cdot L_{nj}, \quad (12)$$

$$R_n = \sum_{i=1}^N P_i \cdot q_{im}, \quad (13)$$

где:

J — количество рассматриваемых сценариев развития неконтролируемого горения на объекте защиты;

Q_j — вероятность реализации выбранного сценария пожара, год^{-1} ;

L_{nj} — вероятность поражения человека при выбранном сценарии;

q_{im} — вероятность присутствия человека.

Таблица 5
Сводная таблица расчетных значений

Table 5
Summary table of calculated values

Зона анализа The analysis area	Величина P_n , год ⁻¹ Value of P_n , year ⁻¹	Величина R_n , год ⁻¹ Value of R_n , year ⁻¹	Величина S_n , год ⁻¹ Value of S_n , year ⁻¹
Зона В Zone B	$1,09725 \cdot 10^{-5}$	$R_{\text{раб}} = 1,087 \cdot 10^{-6}$	$S = 5 \cdot 10^{-7}$
Зона Б Zone Б	$9,135 \cdot 10^{-7}$	$R_{\text{админ}} = 1,66 \cdot 10^{-7}$	—
Зона А Zone А	$5,5 \cdot 10^{-8}$	—	—

Таким образом, для рабочих, постоянно находящихся у водородной зоны, риск превышает допустимые значения, установленные ст. 93 Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ [14].

Заключение

1. Полученные результаты величины пожарного риска показывают, что уровень безопасности выходит за пределы допустимых значений, установленных Техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности [14] для зоны, в которой постоянно находятся рабочие. Поэтому разработка мощной системы обеспечения пожарной безопасности является приоритетной задачей.

2. При помощи специального программного обеспечения проводили моделирование развития пожара по четырем сценариям. Наиболее худшим определен сценарий, в котором возникает эффект домино. В целом по всем сценариям результаты можно резюмировать следующим образом:

- при возникновении утечки водорода под давлением из диспенсера с последующим возгоранием длина факела пламени составила 17 м, оказывая негативное влияние

на бензиновую ТРК (утечка горючего топлива);

- в случае возникновения взрыва избыточное давление стремительно возрастает, достигая высоких пиковых показателей в ограниченном пространстве, разрушая технологическое оборудование.

3. Для предотвращения условий, способствующих возникновению пожара и взрыва, рекомендуется:

- усилить защиту от маломощных источников зажигания (искр, статического электричества и т. д.) в зоне расположения диспенсеров;

- обеспечить физическое разделение водородной и бензиновой заправочных зон для минимизации вероятности возникновения эффекта домино;

- обеспечить свободное прохождение воздушных потоков по территории объекта защиты.

4. В нормативных документах [9, 10, 14] нет четких требований, предъявляемых к противопожарным расстояниям при использовании водородного оборудования, его размещению и т. д., учитывающих его высокую диффузию и широкий диапазон воспламеняемости водорода. Кроме того, методика [9, 10] не позволяет в полном объеме

оценить величину пожарного риска в случае возникновения эффекта домино.

Таким образом, проектирование и безопасное строительство гибридных водородно-бензиновых станций может быть обеспечено при условии соблюдения приемлемых уровней пожарного риска.

Рассмотренные варианты оперативных событий могут быть использованы при проектировании подобного рода заправочных станций. В будущих исследованиях целесообразно проанализировать ситуации, когда проведено техническое переоснащение или оказывают влияние потоки ветра.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Терехов Е. Ю., Елистратов В. В. Эколого-экономическое сравнение технологий производства водорода в рамках стратегии низкоуглеродного развития // Альтернативная энергетика и экология. 2025. № 2 (431). С. 56–70.
2. Терентьев Д. И., Сатюков Р. С. Анализ сведений о пожарах, вызванных самовозгоранием литий-ионных аккумуляторных батарей // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 20–27.
3. Терентьев Д. И., Кокшаров А. В., Сатюков Р. С. Особенности формирования токсичной газовой среды в помещении при пожаре кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных батарей, составленных из элементов форм-фактора 18650 // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 24–32.
4. Mathematical intellectual algorithm for determining the fire hazard parameters of oil and oil refining products / D. S. Korolev [et al.] // AIP Conference Proceedings. Melville, New York, 2021. P. 70028.
5. Krysanov N. S., Berdonosova E. A., Klyamkin S. N. Hydrogen separation from gas mixtures: evaluation of adsorbent performance using the IAST model // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2025. Vol. 10. No. 4. P. 342–350.
6. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник в 2 ч. М., 2004. Ч. I. 713 с.
7. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник в 2 ч. М., 2004. Ч. II. 774 с.
8. Факеров Х. Н., Мухторзода С. С. Цифровая трансформация торговли в контексте регионального развития: методология, модели и вызовы центральной Азии // Экономика Таджикистана. 2025. № 4. С. 203–210.
9. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://clck.su/goXLF> (дата обращения: 24.02.2026).
10. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://clck.su/lcRPI> (дата обращения: 24.02.2026).

11. Аминов Р. З., Бурденкова Е. Ю., Портянкин А. В. Методика оценки годового риска от поломок, пожаров и взрывов на основе графов состояний в электролизных цехах // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11, № 4. С. 305–310.
12. Разработка и обоснование способа безопасного использования водорода при перегреве рабочего тела в паротурбинном цикле АЭС / А. Н. Байрамов [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. 2024. № 12 (429). С. 48–94.
13. Аминов Р. З., Портянкин А. В. Анализ компоновочных решений электролизного цеха водородной надстройки с учетом надежности и взрывопожароопасности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 5-6. С. 29–36.
14. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123 : принят Государственной Думой 04.07.2008 : одобрен Советом Федерации 11.07.2008 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 24.02.2026).

REFERENCES

1. Terekhov E. Yu., Elistratov V. V. Ecological and economic comparison of hydrogen production technologies within the framework of a low-carbon development strategy // Alternative Energy and Ecology. 2025. No. 2 (431). P. 56–70.
2. Terentyev D. I., Satyukov R. S. Analysis of data on fires caused by spontaneous combustion of lithium-ion batteries // Technosphere Safety. 2025. No. 4 (49). P. 20–27.
3. Terentyev D. I., Koksharov A. V., Satyukov R. S. Features of the formation of a toxic gas environment in a room during a fire in cobalt-containing lithium-ion batteries made up of 18650 form factor cells // Technosphere Safety. 2025. No. 3 (48). P. 24–32.
4. Mathematical intellectual algorithm for determining the fire hazard parameters of oil and oil refining products / D. S. Korolev [et al.] // AIP Conference Proceedings. Melville, New York, 2021. P. 70028.
5. Krysanov N. S., Berdonosova E. A., Klyamkin S. N. Hydrogen separation from gas mixtures: evaluation of adsorbent performance using the IAST model // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2025. Vol. 10. No. 4. P. 342–350.
6. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. Fire and Explosion Hazard of Substances and Materials and Means of Their Extinguishing: A Reference Book in 2 parts. Moscow, 2004. Part I. 713 p.
7. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. Fire and Explosion Hazard of Substances and Materials and Means of Their Extinguishing: A Reference Book in 2 parts. Moscow, 2004. Part II. 774 p.
8. Fakerov Kh. N., Mukhtorzoda S. S. Digital Transformation of Trade in the Context of Regional Development: Methodology, Models, and Challenges for Central Asia // Economy of Tajikistan. 2025. No. 4. P. 203–210.
9. On Approval of the Methodology for Determining the Estimated Values of Fire Risk at Industrial Facilities : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 26.06.2024 No. 533 // Codex : electronic fund of legal and regulatory technical documents. URL: <https://clck.su/goXLF> (accessed 24.02.2026).

10. On approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures, and fire compartments of various functional fire hazard classes : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 14.11.2022 No. 1140 // Codex : electronic fund of legal and regulatory technical documents. URL: <https://clck.ru/lcRPI> (accessed 24.02.2026).

11. Aminov R. Z., Burdenkova E. Yu., Portyankin A. V. Methodology for assessing the annual risk from breakdowns, fires, and explosions based on state graphs in electrolysis shops // Reliability and Safety of Energy. 2018. Vol. 11. No. 4. P. 305–310.

12. Development and justification of a method for the safe use of hydrogen during overheating of the working fluid in the steam turbine cycle of a nuclear power plant / A. N. Bayramov [et al.] // Alternative Energy and Ecology. 2024. No. 12 (429). P. 48–94.

13. Aminov R. Z., Portyankin A. V. Analysis of layout solutions for the electrolysis shop of the hydrogen superstructure taking into account reliability and explosion and fire hazard // News of higher educational institutions. Problems of Energy. 2018. Vol. 20. No. 5–6. P. 29–36.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Королев Денис Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник Воронежского института повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России (394000, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, д. 231); РИНЦ ID: 829407; e-mail: spectrumpotronus@yandex.ru

Епифанов Евгений Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и правовых отношений Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (394000, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8); РИНЦ ID: 825680.

Кончаков Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); РИНЦ ID: 809831.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis S. Korolev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Research Officer, Voronezh institute of Advanced Training of Employees of the EMERCOM of Russia (231 Krasnoznamennaya St., Voronezh, 394000, Russian Federation); ID RSCI: 829407; e-mail: spectrumpotronus@yandex.ru

Evgeny N. Epifanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Life Safety and Legal Relations, Voronezh State University of Forestry and Technologies named G. F. Morozov (8 Timiryazeva St., Voronezh, 394000, Russian Federation); ID RSCI: 825680.

Sergey A. Konchakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Civil Defense, Population and Territory Protection, SFA of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); ID RSCI: 809831.

УДК 614.84:678.5

ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТИ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ БРОМИРОВАННОЙ НОВОЛАЧНОЙ КАРДАНЛЬНОЙ СМОЛОЙ

Баёв Александр Александрович¹, Шкуро Алексей Евгеньевич², Пазникова Светлана Николаевна¹

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

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

Аннотация. В работе исследована огнезащитная эффективность бромированной новолачной карданольной смолы в древесно-полимерных композитах на основе полиэтилена низкого давления. Высокая горючесть традиционных древесно-полимерных композитов ограничивает их применение в строительстве, что обуславливает поиск возобновляемых антипиренов. Композиты с содержанием бромированной новолачной карданольной смолы, варьируемым в интервале от 0 до 12,5 мас. %, изготавливались методами вальцевания и горячего прессования. Огнезащитное действие бромированной новолачной карданольной смолы оценивали по потере массы, длине прогоревшей части, скорости распространения пламени, наличию горящих капель и структурной целостности образца. Установлено, что оптимальная концентрация модификатора составляет 9,6 мас. %. При этом потеря массы снижается с 65 до 6,8 %, длина поврежденной зоны уменьшается с 150 до 5,5 мм, а скорость распространения пламени сокращается с 28,6 до 9,7 мм/мин. Образование воспламеняющихся капель и разрушение исследуемых образцов были полностью исключены в рамках проведения эксперимента. Результаты проведенного исследования демонстрируют высокую эффективность бромированной новолачной карданольной смолы в качестве экологически ориентированного антипирена для разработки пожаробезопасных древесно-полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: древесно-полимерные композиты, полиэтилен низкого давления, бромированная новолачная карданольная смола, огнезащитная эффективность, горючесть, потеря массы, скорость распространения пламени, антипирены биогенного происхождения

Для цитирования: Баёв А. А., Шкуро А. Е., Пазникова С. Н. Древесно-полимерные композиты пониженной горючести, модифицированные бромированной новолачной карданольной смолой // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 91–100.

LOW-FLAMMABILITY WOOD-POLYMER COMPOSITES MODIFIED WITH BROMINATED NOVOLAC CARDANOL RESIN

Alexander A. Baev¹, Alexey E. Shkuro², Svetlana N. Paznikova¹

¹ UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This study investigated the fire-retardant efficacy of brominated novolac cardanol resin in wood-polymer composites based on low-density polyethylene. The high flammability of traditional wood-polymer composites limits their use in construction, necessitating the search for renewable flame retardants. Composites with brominated novolac cardanol resin contents ranging from 0 to 12.5 wt. % were manufactured using rolling and hot-pressing methods. The fire-retardant performance of brominated novolac cardanol resin was assessed based on mass loss, burnt-out length, flame propagation velocity, the presence of burning droplets, and the structural integrity of the sample. The optimal modifier concentration was found to be 9.6 wt. %. Moreover, mass loss is reduced from 65 to 6.8 %, the damaged zone length is shortened from 150 to 5.5 mm, and the flame propagation rate is reduced from 28.6 to 9.7 mm/min. The formation of burning droplets and sample failure is completely eliminated. The study results confirm the high effectiveness of brominated novolac cardanol resin as an environmentally friendly flame retardant for the creation of fire-resistant wood-polymer composite materials.

Keywords: wood-plastic composites, low-density polyethylene, brominated novolac cardanol resin, fire retardant performance, flammability, weight loss, flame spread rate, biogenic flame retardants

For citation: Baev A. A., Shkuro A. E., Paznikova S. N. Low-flammability wood-polymer composites modified with brominated novolac cardanol resin // *Technospheric safety*. 2026. No. 3 (52). P. 91–100.

Введение

Древесно-полимерные композиты (ДПК) получили широкое распространение в строительстве, интерьерной отделке и мебельном производстве благодаря удачному сочетанию эстетики натуральной древесины с технологичностью, влагостойкостью и долговечностью термопластичных матриц [1–3]. Тем не менее внедрение ДПК в ответственные инженерные и строительные конструкции существенно ограничено их высокой пожарной опасностью. Горючесть композитов обусловлена синергетическим характером термического разложения компонентов: древесный наполнитель выступает в роли капиллярного фитиля, а полимерная фаза (преимущественно полиэтилен или полипропилен) при деградации генерирует значительные объемы тепла и легковоспламеняющихся летучих соединений [4].

Для снижения пожарной опасности ДПК традиционно применяются интумесцентные системы на основе полифосфата аммония (ПФА), галогенсодержащие антипирены и минеральные наполнители. ПФА проявляет высокую активность в конденсированной фазе, катализируя дегидратацию целлюлозы и формирование термостабильного углеродного барьера. Однако достижение требуемых показателей огнестойкости требует высоких концентраций добавки (обычно > 20 мас. %), что приводит к существенному ухудшению прочностных характеристик и реологических свойств расплава при переработке. Галогенированные антипирены, напротив, эффективны в газовой фазе даже при низких дозировках, но их применение сдерживается ужесточением экологических норм, экотоксичностью продуктов разложения и коррозионной активностью выделяющихся галогеноводородов.

В качестве экологически ориентированной и технологически совместимой альтернативы рассматриваются модифицированные продукты биогенного происхождения, в частности бромированная карданольная новолачная смола (БНКС) [5–8]. Сырьевой базой для ее синтеза служит карданол — возобновляемый фенольный компонент, извлекаемый из околоплодников орехов кешью и характеризующийся наличием реакционноспособной гидроксильной группы и ненасыщенной углеводородной цепи [9]. Карданол и его производные широко используются в производстве смол, клеев, защитных покрытий и фармацевтических субстанций. Введение брома в структуру новолачной смолы (рис. 1) позволяет реализовать газофазный механизм ингибирования горения за счет высвобождения активных радикалов, а ароматический каркас способствует интенсивному коксообразованию в конденсированной фазе [6].

Экспериментальные данные подтверждают высокую огнезащитную активность

бромированных производных карданола. Обработка древесно-стружечных плит (ДСП) низкомолекулярными бромированными аналогами обеспечивает высший класс огнезащитной эффективности по ГОСТ Р 53292–2009, однако сопровождается выделением токсичных газов (HBr , CO_2) и рядом стойких органических загрязнителей [10, 11]. Переход к высокомолекулярной бромированной новолачной карданольной смоле позволяет существенно снизить негативные эффекты. Потеря массы образцов ДСП после огневых испытаний составляет всего 4 % (против 71 % для эталона), время самостоятельного горения сокращается до 63 с, при этом смола одновременно выполняет функции связующего и антипирена [6]. При введении БНКС в композиты на основе ПВХ и древесной муки оптимальная дозировка составляет 6 мас. %, что обеспечивает двукратное уменьшение времени горения, снижение потери массы на 30 % и сокращение зоны термического разрушения на 20 % [10].

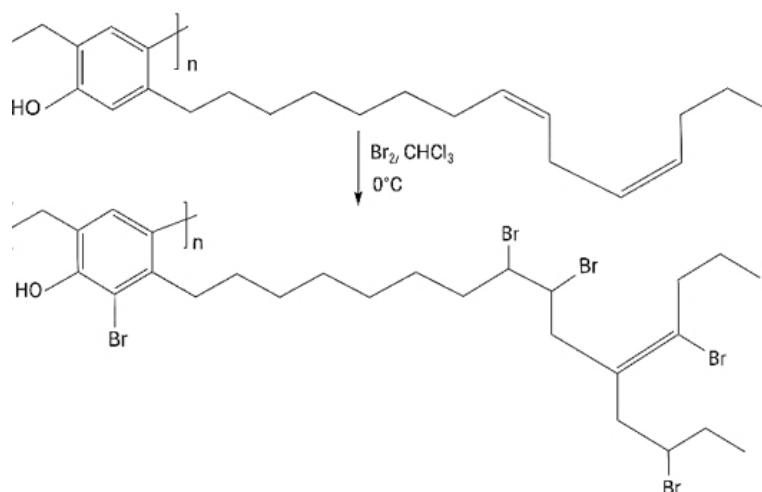


Рис. 1. Реакция бромирования карданольной новолачной смолы

Fig. 1. Bromination reaction of cardanol novolac resin

Хотя эффективность совместного применения БНКС и традиционных интумесцентных систем (например, ПФА) доказана, этот

подход требует тщательного исследования. С одной стороны, сочетание газофазного радикального замедления и барьерного

действия коксового слоя может усилить их воздействие. С другой стороны, кислотные продукты разложения ПФА могут вызвать преждевременное разрушение смоляной матрицы, а летучие броморганические соединения — дестабилизировать формирующийся вспученный интумесцентный слой. Кроме того, влияние концентрации БНКС на комплекс физико-механических свойств ДПК, изготовленных на основе полиолефинов, остается недостаточно изученным.

Цель работы — определить показатели огнезащитной эффективности бромированной новолачной карданольной смолы в древесно-полимерных композитах на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД), включая количественную оценку потери массы, геометрических параметров повреждений образца и кинетики распространения пламени.

Методическая часть

В качестве полимерной матрицы для получения древесно-полимерных композитов использован полиэтилен низкого давления марки 273 (ТУ 2243-104-00203335–2005). Наполнителем служила древесная мука марки 180 (ГОСТ 16361–87) с дисперсностью частиц, обеспечивающей однородное распределение в полимерной фазе. Функцию огнезащитного модификатора выполняла бромированная новолачная карданольная смола, характеризующаяся следующими параметрами: среднемассовой молекулярной массой $M_w = 4\,056$ г/моль, среднечисловой молекулярной массой $M_n = 1\,792$ г/моль, индексом полидисперсности $M_w / M_n = 2,26$, динамической вязкостью 62100 мПа·с (75 °С), содержанием связанного брома 52,8 мас. %.

Для реализации синергетического огнезащитного эффекта в состав композитов дополнительно вводили компоненты классической интумесцентной системы: ПФА в качестве кислотного источника, катализирующего дегидратацию целлюлозы и образование угольного кокса; пентаэритрит (ПЭ) как углеводородный источник, формирующий пористую структуру вспученного слоя; оксид сурьмы (III) в качестве синергиста галогенсодержащих антипиренов, усиливающего газофазное ингибирование за счет образования летучих бромидов сурьмы.

Гомогенизацию компонентов осуществляли на смесительных вальцах ПД-320-160/160 при температуре 180 °С. Формование образцов для испытаний проводили методом горячего прессования при температуре 170 °С и давлении 5 МПа с последующим контролируемым охлаждением в пресс-форме. Составы исследуемых композитов с варьированием содержания БНКС представлены в таблице 1.

Огнезащитное действие БНКС на образцах композитов оценивали по комплексу показателей, определяемых в ходе испытаний на горючесть в соответствии с ГОСТ Р 53292–2009: количественно фиксировали потерю массы образцов после огневого воздействия (мас. %), длину прогоревшей части (мм) и скорость распространения пламени (мм/мин), рассчитываемую по времени прохождения фронтом горения калиброванного участка. Дополнительно проводили качественную оценку наличия горящих капель расплава и структурного разрушения образцов (растрескивание, расслоение, обугливание) с указанием частоты проявления данных признаков в серии из пяти параллельных испытаний для каждого состава.

Таблица 1
Составы исследованных композитов
 Table 1
 Formulations of the studied composites

№	Содержание компонента, масс. % Component content, mass. %					
	ПЭНД HDPE	Древесная мука Wood flour	ПФА PFA	Пентаэритрит Pentaerythritol	Оксид сурьмы Antimony oxide	БНКС BNCR
1	44,4	35,6	13,3	4,4	2,2	0
2	42,9	34,3	12,9	4,3	2,1	3,4
3	41,5	33,2	12,4	4,1	2,1	6,6
4	40,2	32,1	12,0	4,0	2,0	9,6
5	38,9	31,1	11,7	3,9	1,9	12,5

Анализ результатов

Результаты испытаний на горючесть, представленные в табл. 2, демонстрируют выраженную зависимость огнезащитных характеристик композитов от содержания бромированной новолачной карданольной смолы.

Введение БНКС даже в минимальной концентрации (3,4 мас. %) обеспечивает десятикратное снижение потери массы и сокращение длины поврежденной зоны более чем в 2 раза по сравнению с немодифицированным композитом. При содержании БНКС $\geq 6,6$ мас. % полностью исключаются образование горящих капель и структурное разрушение образцов, что свидетельствует о стабилизации конденсированной фазы при горении. Оптимальные показатели достигнуты при дозировке 9,6 мас. %: минимальная потеря массы — 6,8 %, наименьшая длина прогара — 5,5 мм и мини-

мальная скорость распространения пламени — 9,7 мм/мин. Дальнейшее увеличение концентрации до 12,5 мас. % не приводит к существенному улучшению большинства параметров, а некоторое возрастание скорости распространения пламени (до 19,3 мм/мин) может быть связано с изменением реологии расплава и дисперсности наполнителя в системе.

На основе экспериментальных данных установлены закономерности изменения показателей горючести образцов ДПК в зависимости от содержания БНКС. Графическая интерпретация этих зависимостей приведена на рис. 2–4.

Комплексная оценка огнезащитной эффективности БНКС показывает, что введение модификатора в концентрации 9,6 мас. % обеспечивает оптимальное снижение всех ключевых показателей пожарной опасности ДПК на основе ПЭНД: потеря массы сокращается в 9,6 раза, длина прогоревшей

зоны — в 27 раз, скорость распространения пламени — в 2,9 раза, при этом полностью исключается образование горящих капель и структурное разрушение. Дальнейшее увеличение дозировки БНКС не дает суще-

ственного прироста эффективности, что позволяет рекомендовать концентрацию 9,6 мас. % в качестве оптимальной для разработки составов ДПК с пониженной горючестью.

Таблица 2
Результаты испытаний
Table 2
Test results

Номер образца в плане Number sample in the plan	1	2	3	4	5
Содержание БНКС, масс. % Content of BNCR, mass. %	0,0	3,4	6,6	9,6	12,5
Потеря массы после испытаний на горючесть, масс. % Mass loss after combustion tests, mass. %	65,0	15,7	16,7	6,8	5,8
Длина прогоревшей части образца, мм Length of the burnt part of the sample, mm	150,0	61,3	31,4	5,5	7,0
Скорость распространения пламени, мм/мин Flame propagation velocity, mm/min	28,6	12,9	13,6	9,7	19,3
Горящие капли Burning drops	да (1/5) yes (1/5)	да (1/5) yes (1/5)	нет no	нет no	нет no
Разрушение образца Destruction of the sample	да (4/5) yes (4/5)	нет no	нет no	нет no	нет no

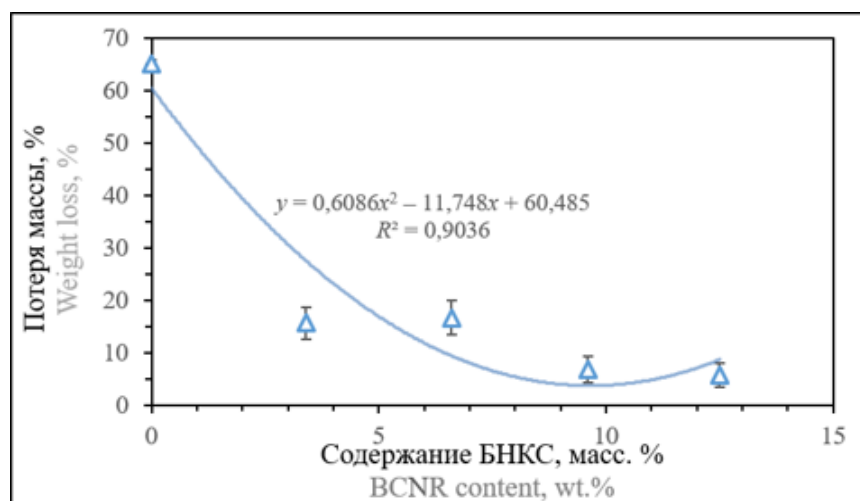


Рис. 2. Зависимость потери массы от содержания в образце БНКС после испытаний на горючесть
Fig. 2. Dependence of mass loss of BNCR in the sample after flammability tests on the content

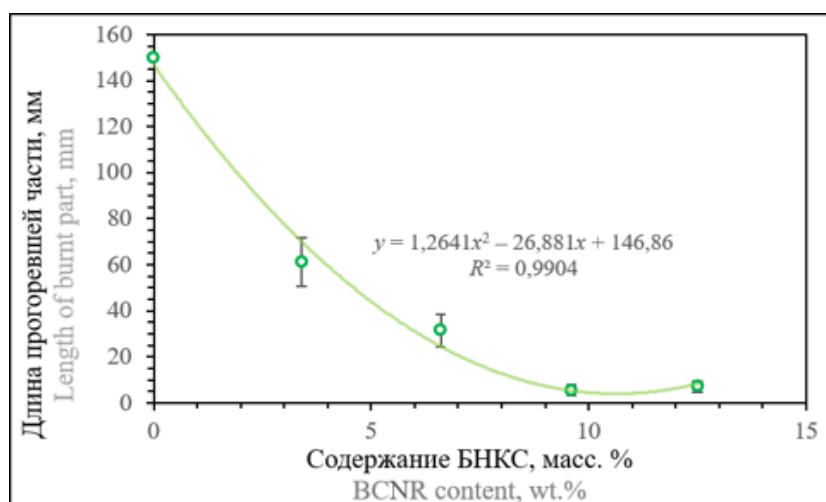


Рис. 3. Зависимость длины прогоревшей части от содержания в образце БНКС после испытаний на горючесть

Fig. 3. Dependence of the length of the burnt part on the content of BCNR in the sample after flammability tests

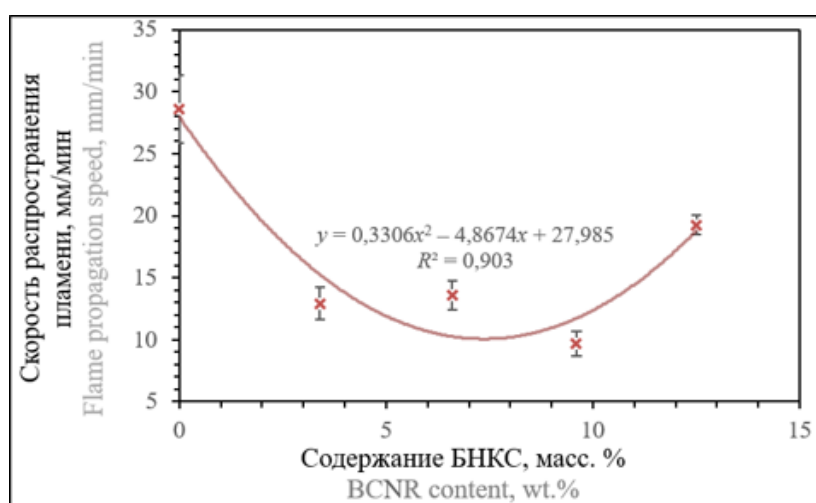


Рис. 4. Зависимость скорости распространения пламени от содержания в образце БНКС

Fig. 4. Dependence of flame propagation rate on the content of BCNR in the sample

Заключение

В ходе работы было исследовано влияние бромированной карданольной новолачной смолы на показатели горючести древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена низкого давления. Было выявлено, что добавление БНКС в количестве от 3,4 до 12,5 мас. % значительно уменьшает пожароопасность материала благодаря комплексному механизму огнезащиты: газофазному ингибированию пламени (выделению активного брома) и увеличению кок-

сообразования в конденсированной фазе (ароматического каркаса смолы).

Наилучшая концентрация модификатора составляет 9,6 мас. %. При этом значении достигается максимальный эффект: потеря массы после огневых испытаний сокращается до 6,8 % (в 9,6 раза меньше, чем у немодифицированного образца), длина прогоревшей зоны уменьшается до 5,5 мм, а скорость распространения пламени снижается до 9,7 мм/мин. Горящие капли и структурное разрушение образцов полностью предотвращаются. Дальнейшее

увеличение содержания БНКС до 12,5 мас. % не приводит к значительному улучшению параметров, а рост скорости распространения пламени до 19,3 мм/мин свидетельствует о достижении предела эффективности и возможном изменении реологических свойств полимерной системы.

Результаты исследования подтверждают высокую перспективность БНКС, биогенного антипирена экологически безопасного происхождения, для модификации ДПК.

Рекомендуемая концентрация добавки в 9,6 мас. % обеспечивает соответствие композитов повышенным требованиям пожарной безопасности при сохранении технологичности переработки. В будущих исследованиях необходимо детально изучить влияние БНКС на комплекс физико-механических и реологических характеристик материалов, а также оценить токсичность продуктов термического разложения модифицированных композитов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов / А. Г. Хантимиров [и др.] // Известия КГАСУ. 2023. № 3 (65). С. 26–35. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26. EDN: CMSMHV.
2. Аникеева К. Г., Сафин Р. Р. Обзор свойств древесно-полимерных композитов на основе биоразлагаемых полимеров // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 160–169. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-160-169. EDN: HSWOAI.
3. Талалаева Г. В., Пазникова С. Н. Современные композиционные материалы: перспективы и риски применения их в области комплексной безопасности и гражданской обороны // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20, № 1 (75). С. 107–114. EDN: FABFAX.
4. Повышение огнестойкости полимерных композитов / А. Н. Блазнов [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1. С. 267–271. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.036. EDN: UCVMUF.
5. Влияние технологических факторов на свойства бакелизированной фанеры с карданолсодержащим бакелитовым лаком / О. Ф. Шишлов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 4. С. 44–47.
6. Synthesis of brominated cardanol derivatives and their efficiency as fire retardants for wood / O. F. Shishlov [et al.] // Polymer Science, Series D. 2014. Vol. 7, No. 3. P. 238–245. DOI: 10.1134/S1995421214030186.
7. Analysis of the influence of cardanol content on the properties of phenol-cardanol-formaldehyde novolac resins / O. F. Shishlov [et al.] // Polymer Science, Series D. 2014. Vol. 7, No. 1. P. 61–64. DOI: 10.1134/S1995421214010109.
8. Синтез и свойства клеев для древесных слоистых пластиков на основе спирторастворимых резольных фенолкарданолформальдегидных смол / О. Ф. Шишлов [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 7. С. 9–14.
9. Глухих В. В., Шкуро А. Е., Шишлов О. Ф. Синтез, свойства и применение продуктов полимеризации карданола (обзор) // Химия растительного сырья. 2013. № 1. С. 5–14. DOI:10.14258/jcprn.1301005. EDN: RYJXJ.

10. Красильникова М. А., Баёв А. А., Шкуро А. Е. Получение огнестойких древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида // Деревообрабатывающая промышленность. 2025. № 1. С. 45–52. EDN: XYQJFJ.

11. Изучение термоллиза огнестойких древесно-полимерных композитов / М. А. Красильникова [и др.] // Современные проблемы обеспечения безопасности : сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 24–25 апреля 2025 г. Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2025. С. 56–60. EDN: HPZDDR.

REFERENCES

1. Influence of Modification on the Durability of Polyvinyl Chloride Wood-Polymer Composites / A. G. Khantimirov [et al.] // Izvestiya of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2023. No. 3 (65). P. 26–35. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26. EDN: CMSMHV.

2. Anikeeva K. G., Safin R. R. Review of the Properties of Wood-Polymer Composites Based on Biodegradable Polymers // Systems. Methods. Technologies. 2023. No. 4 (60). P. 160–169. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-160-169. EDN: HSWOAI.

3. Talalaeva G. V., Paznikova S. N. Modern Composite Materials: Prospects and Risks of Their Application in the Field of Comprehensive Security and Civil Defense // Technologies of Civil Security. 2023. Vol. 20, No. 1 (75). P. 107–114. EDN: FABFAX.

4. Increasing the fire resistance of polymer composites / A. N. Blaznov [et al.] // Polzunovsky Vestnik. 2025. No. 1. P. 267–271. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.036. EDN: UCBMUF.

5. Influence of technological factors on the properties of bakelized plywood with cardanol-containing bakelite varnish / O. F. Shishlov [et al.] // Bulletin of the Kazan Technological University. 2014. Vol. 17, No. 4. P. 44–47.

6. Synthesis of brominated cardanol derivatives and their effectiveness as fire retardants for wood / O. F. Shishlov [et al.] // Polymer Science, Series D. 2014. Vol. 7, No. 3. P. 238–245. DOI: 10.1134/S1995421214030186.

7. Analysis of the influence of cardanol content on the properties of phenol-cardanol-formaldehyde novolac resins / O. F. Shishlov [et al.] // Polymer Science, Series D. 2014. Vol. 7, No. 1. P. 61–64. DOI: 10.1134/S1995421214010109.

8. Synthesis and properties of adhesives for wood laminates based on alcohol-soluble resole phenol-cardanol-formaldehyde resins / O. F. Shishlov [et al.] // Adhesives. Sealants. Technologies. 2014. No. 7. P. 9–14.

9. Glukhikh V. V., Shkuro A. E., Shishlov O. F. Synthesis, Properties, and Application of Cardanol Polymerization Products (Review) // Chemistry of Plant Raw Materials. 2013. No. 1. P. 5–14. EDN: RCYXJ.

10. Krasilnikova M. A., Baev A. A., Shkuro A. E. Obtaining fire-resistant wood-polymer composites based on polyvinyl chloride // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost. 2025. No. 1. P. 45–52. EDN: XYQJFJ.

11. Study of thermolysis of fire-resistant wood-polymer composites / M. A. Krasilnikova [et al.] // Modern Problems of Safety Assurance : Collection of Materials of the XXVII International Scientific

and Practical Conference, Yekaterinburg, April 24–25, 2025. Ekaterinburg : UISFS of EMERCOM of Russian, 2025. P. 56–60. EDN: HPZDDR.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Баёв Александр Александрович, адъюнкт Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 547246; ORCID: 0009-0002-1121-6360; e-mail: pancho.99@inbox.ru

Шкуро Алексей Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (620100, Российская Федерация, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37); РИНЦ ID: 652044; Scopus AuthorID: 56151722700; ORCID: 0000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

Пазникова Светлана Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры химии и процессов горения Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 403160; e-mail: paznikova2007@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Baev, adjunct of the UISFS of EMERCOM of Russian (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); RSCI ID: 547246; ORCID: 0009-0002-1121-6360; e-mail: pancho.99@inbox.ru

Alexey E. Shkuro, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Pulp and Paper Industry Technologies and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (37 Sibirsky Tract, Ekaterinburg, 620100, Russian Federation); ID RSCI: 652044; Scopus Author ID: 56151722700; ORCID: 0000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

Svetlana N. Paznikova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Chemistry and Gorenje Processes, UISFS of EMERCOM of Russian (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 403160; e-mail: paznikova2007@mail.ru

УДК 614.842:005

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИ ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЮДЕЙ В УЧРЕЖДЕНИЯХ СОЦИАЛЬНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Харченко Милита Владимировна¹, Хохлова Алла Юрьевна²

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

² Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема информационного обеспечения управленческой деятельности руководителей учреждений социального обслуживания в области пожарной безопасности. Актуальность исследования обусловлена высокой социальной значимостью указанных объектов, характеризующихся круглосуточным пребыванием маломобильных и немобильных групп населения, системными недостатками в организации пожарной безопасности, подтвержденными статистическими данными о пожарах и их тяжелых последствиях. На основе системного анализа существующих моделей управления, ретроспективных статистических данных о пожарах в учреждениях социального обслуживания за период с 2007 по 2023 гг. и результатов экспертного опроса руководителей организаций выявлен и структурирован компонентный состав информационной поддержки процесса принятия управленческих решений. Предложена функциональная организация системы, детализированная в виде трех блоков: предотвращение пожаров, минимизация негативных последствий и сквозные интегрирующие функции. Определены ключевые информационные компоненты: нормативно-правовая база, данные о состоянии объекта защиты, результаты анализа пожарных рисков, статистическая отчетность, сведения о персонале, финансово-экономические показатели и информация о внешней среде. Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования систем управления пожарной безопасностью в социальных учреждениях.

Ключевые слова: информационная поддержка, управленческие решения, пожарная безопасность, учреждения социального обслуживания, маломобильные группы населения, компоненты информационной поддержки, модели управления

Для цитирования: Харченко М. В., Хохлова А. Ю. Функциональная организация информационной поддержки при принятии управленческих решений по обеспечению пожарной безопасности людей в учреждениях социального обслуживания // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 101–114.

FUNCTIONAL ORGANIZATION OF INFORMATION SUPPORT IN MAKING MANAGEMENT DECISIONS TO ENSURE FIRE SAFETY OF PEOPLE IN SOCIAL SERVICE INSTITUTIONS

Milita V. Kharhenko¹, Alla Yu. Khokhlova²

¹ UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

² SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article discusses the problem of information support for the management activities of heads of social service institutions in the field of fire safety. The relevance of the study is due to the high social significance of these facilities, which are characterized by the round-the-clock presence of low-mobility and non-mobile groups of the population, as well as systemic deficiencies in the organization of fire safety, confirmed by statistical data on fires and their severe consequences. Based on a systematic analysis of existing management models, retrospective statistical data on fires in social service institutions for the period from 2007 to 2023, and the results of an expert survey of heads of organizations, a component structure of information support for the management decision-making process was identified and structured. The functional organization of the system is proposed, detailed in the form of three blocks: fire prevention, minimization of negative consequences and complex integrating functions. The key information components are identified: the regulatory framework, data on the state of the protected facility, the results of fire risk analysis, statistical reporting, information about personnel, financial and economic indicators, as well as information about the external environment. The results of the study can be used to improve fire safety management systems in social institutions.

Keywords: information support, managerial decisions, fire safety, social service institutions, low-mobility population groups, information support components, management models

For citation: Kharhenko M. A., Khokhlova A. Yu. Functional organization of information support in making management decisions to ensure fire safety of people in social service institutions // Technospheric safety. 2026. No. 3 (52). P. 101–114.

Введение

Эффективность управления сложными социально-экономическими системами в значительной степени определяется качеством информационного обеспечения лиц, принимающих управленческие решения. Указанный тезис приобретает особую значимость применительно к сфере обеспечения пожарной безопасности, где цена ошибочного управленческого решения может исчисляться человеческими жизнями. Наиболее уязвимой категорией объектов защиты в этом контексте выступают учреждения социального обслуживания, предназначенные для круглосуточного пребы-

вания в них граждан пожилого возраста и инвалидов, частично или полностью утративших способность к самостоятельному передвижению.

Статистические данные свидетельствуют о системных проблемах в организации пожарной безопасности в рассматриваемых объектах. За период с 2007 по 2023 гг. на территории Российской Федерации в учреждениях социального обслуживания зарегистрирован 431 пожар, из них 30 случаев повлекли гибель 219 человек и травмирование 126 человек [1]. При этом в 60 % случаев гибель людей наступала вследствие несвоевременной эвакуации, а в 38,9 % — из-за болезненного состояния получателей социальных услуг,

исключающего возможность самостоятельного передвижения [2]. Выявленные обстоятельства указывают на недостаточную эффективность существующих механизмов принятия управленческих решений руководителями организаций.

Ключевым фактором, определяющим качество управленческих решений, выступает информационная поддержка, представляющая собой целенаправленный процесс обеспечения руководителя релевантной, достоверной и своевременной информацией, необходимой для идентификации проблем, генерации альтернативных решений, выбора и реализации оптимальных решений, а также контроля их исполнения [3].

В работах В. И. Козлачкова и его соавторов [4–6] обоснована необходимость перехода от традиционной (типовой) модели надзорной деятельности к риск-ориентированному подходу, предусматривающему оценку пожарных рисков как основу для принятия управленческих решений. А. Ю. Хохловой [7–8] разработаны методы экспресс-оценки пожарных рисков, позволяющие оперативно оценивать соответствие объектов защиты требованиям пожарной безопасности. И. А. Лобаевым, В. В. Плешаковым, Д. А. Вечтомовым [9–10] предложены алгоритмы поддержки принятия решений при расследовании пожаров и оценке причинно-следственных связей между нарушениями требований пожарной безопасности и наступившими последствиями.

Вместе с тем анализ научной литературы показывает, что существующие исследования, посвященные информационной поддержке в области пожарной безопасности, сфокусированы преимущественно на двух аспектах: информационно-аналитическом обеспечении контрольно-надзорной деятельности органов государственного пожарного надзора

и поддержке руководителя тушения пожара при принятии решений в экстренной ситуации. При этом вне системного научного внимания остается ключевой субъект обеспечения пожарной безопасности на объекте защиты — руководитель организации, принимающий решения в штатном режиме повседневной деятельности. Отсутствует научно-обоснованный перечень компонентов информации, необходимых для эффективного управления пожарной безопасностью в специфических условиях учреждений социального обслуживания.

В статье представлены результаты исследования, целью которого являлось выявление, систематизация и функциональная организация компонентного состава информационной поддержки принятия управленческих решений при обеспечении пожарной безопасности людей в учреждениях социального обслуживания.

Методология исследования

Методологический аппарат исследования базируется на комплексном применении общенаучных и частных методов познания. Системный подход стал фундаментальной методологической основой, позволившей рассматривать информационную поддержку как целостную систему взаимосвязанных компонентов, функционирующих в контексте организационно-управленческой деятельности учреждения социального обслуживания.

В рамках общенаучных методов применялись: сравнительный анализ, использованный для сопоставления классической, административной и политической моделей управления в контексте их требований к информационному обеспечению; системный анализ, позволивший структурировать

компоненты информационной поддержки по функциональному признаку; метод обобщения результатов, обеспечивший синтез теоретических положений и эмпирических данных.

Из числа частных научных методов применялись: метод статистического анализа, использованный для обработки эмпирических данных о пожарах и их последствиях в учреждениях социального обслуживания за период с 2007 по 2023 гг.; метод экспертных оценок, реализованный через анкетирование руководителей и лиц, ответственных за пожарную безопасность учреждений социального обслуживания Омской области и Республики Марий Эл (объем выборки составил 18 экспертных заключений); метод теоретического моделирования, позволивший формализовать функциональную организацию информационной поддержки.

Выделение компонентов информационной поддержки осуществлялось на основе интегративного подхода, синтезирующего:

1) теоретический анализ классической и административной моделей управления, определяющих требования к информационному обеспечению на каждом этапе управленческого цикла;

2) анализ нормативно-правовых требований к системе обеспечения пожарной безопасности объектов защиты, закрепленных в действующем законодательстве о пожарной безопасности [11, 12];

3) ретроспективный анализ статистических данных о пожарах в учреждениях социального обслуживания, позволивший идентифицировать ключевые факторы риска;

4) результаты экспертного опроса руководителей учреждений социального обслуживания, выявившие дефицитные информационные потребности и проблемные зоны

в существующей практике управления пожарной безопасностью.

Теоретические основания исследования

В теоретическую основу исследования легли ключевые модели управления, разработанные в рамках классической, административной и политической школ управленческой науки.

Классическая модель, заложенная в трудах Ф. Тейлора, А. Файоля и М. Вебера [13–15], базируется на принципах рациональности, строгой иерархии, формализации процессов и максимизации эффективности, предполагает принятие решений на основе точных расчетов и объективных данных. Это предъявляет высокие требования к полноте и достоверности информационного обеспечения.

Административная модель, разработанная Г. Саймоном [16], акцентирует внимание на ограниченной рациональности лиц, принимающих решения, и использовании стратегии удовлетворения (satisficing) вместо поиска оптимального решения. Такой подход требует гибкой информационной поддержки, адаптированной к когнитивным ограничениям руководителя и условиям неопределенности.

В области пожарной безопасности эти модели реализуются через пять способов обеспечения соответствия объектов защиты требованиям пожарной безопасности, установленных ст. 6 Федерального закона № 123-ФЗ [11]:

1) выполнение требований нормативных документов по пожарной безопасности;

2) непревышение допустимого пожарного риска;

3) выполнение специальных технических условий;

4) выполнение требований стандарта организации;

5) подтверждение безопасности результатами исследований, расчетов и испытаний.

Анализ показывает, что традиционная практика управления пожарной безопасностью строится преимущественно на принципах классической модели, предусматривающей безусловное выполнение нормативных требований. Однако такой подход, как отмечается в работах В. И. Козлачкова [17], не позволяет учесть специфику конкретного объекта защиты и приводит к избыточности требований при одновременной неочевидности их влияния на безопасность людей. Переход к риск-ориентированной модели

управления требует иного информационного обеспечения, ориентированного на оценку фактических угроз и выбор адекватных мер защиты.

Результаты исследования

Компонентный состав информационной поддержки принятия управленческих решений

На основе проведенного многоуровневого анализа выделено семь базовых компонентов информационной поддержки, необходимых руководителю учреждения социального обслуживания для принятия обоснованных управленческих решений в области пожарной безопасности (рис. 1).



Рис. 1. Компоненты ИППУР при обеспечении пожарной безопасности для руководителей организаций

Fig. 1. Components of IPPUR in ensuring fire safety for organization managers

1. Нормативно-правовая база в области пожарной безопасности. Включает федеральные законы: № 123-ФЗ [11], № 69-ФЗ [12], № 384-ФЗ [18], национальные стандарты, своды правил, а также иные нормативные документы, содержащие требования пожарной безопасности. Его функциональное назначение состоит в обеспече-

нии легитимности принимаемых решений и предотвращении административных правонарушений. В условиях учреждений социального обслуживания особую значимость приобретает СП 59.13330.2020 «Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения» [19], регламентирующий создание безопасных условий эвакуации

для лиц с ограниченными возможностями передвижения.

2. Данные о состоянии объекта защиты. Этот компонент обеспечивает получение объективной картины текущего уровня безопасности и существующих уязвимостей. В его состав входят: проектная документация зданий и территорий с указанием эвакуационных путей, мест размещения средств пожаротушения и источников противопожарного водоснабжения; результаты проведенных обследований и проверок, включая акты контрольных (надзорных) мероприятий и предписания об устранении нарушений; инвентаризационные данные о системах противопожарной защиты, включающие информацию о наличии, состоянии и работоспособности автоматической пожарной сигнализации, систем оповещения и управления эвакуацией, дымоудаления, пожаротушения, а также средств огнезащиты и первичных средств пожаротушения; сведения о пожароопасных процессах и используемых материалах.

3. Анализ пожарных рисков. Необходим для определения приоритетных направлений вложения ресурсов и количественной оценки степени опасности. Включает результаты оценки пожарного риска, идентификацию потенциальных источников возгорания и путей распространения огня, расчет возможных последствий пожара (материальный ущерб, угроза жизни и здоровью людей), а также оценку достаточности существующих мер защиты. Согласно методологии, представленной в работах В. И. Козлачкова и А. Ю. Хохловой [5, 7], экспресс-оценка пожарных рисков позволяет существенно сократить трудоемкость расчетов при сохранении их корреляции с базовыми методами, что особенно актуально

для практического применения руководителями организаций.

4. Статистические данные и отчетность. Компонент служит для оценки эффективности текущих мер пожарной безопасности и проведения бенчмаркинга. Охватывает внутреннюю статистику происшествий, инцидентов и ложных срабатываний противопожарных систем, статистику пожаров и их последствий (уделяя особое внимание пожарам в однотипных учреждениях), отчеты о проведении инструктажей, тренировок и учений, а также отчетные документы о выполнении планов по устранению нарушений и планово-предупредительных работ по обслуживанию систем противопожарной защиты.

5. Данные о персонале. Этот компонент содержит сведения о сотрудниках, прошедших обязательное обучение мерам пожарной безопасности, результаты проверки знаний в области пожарной безопасности, данные о назначении и подготовке ответственных лиц (за пожарную безопасность в подразделениях, за проведение огневых работ и др.). Для учреждений социального обслуживания особое значение имеет информация о численности персонала, привлекаемого к эвакуации и спасению малоомобильных групп населения, а также об их квалификации и оснащенности средствами индивидуальной защиты.

6. Финансово-экономическая информация. Отвечает за обоснованность затрат на обеспечение пожарной безопасности и оптимизацию расходов. Включает бюджет, выделенный на обеспечение пожарной безопасности (текущий и плановый), фактические затраты на обслуживание противопожарных систем, закупку оборудования, обучение персонала и устранение

нарушений, а также оценку стоимости потенциального ущерба от пожара (прямого и косвенного). Учет финансово-экономических показателей позволяет руководителю выбирать экономически обоснованные решения, обеспечивающие баланс между уровнем безопасности и финансовыми возможностями учреждения.

7. Информация о внешней среде. Сведения о возможностях и услугах подрядных организаций в области монтажа и обслуживания систем противопожарной защиты, новых технологиях и оборудовании в области пожарной безопасности, опыте и лучших практиках других организаций (особенно в соци-

альной сфере), а также прогнозах МЧС России по пожароопасной обстановке (сезонность, погодные условия и т. д.). Его функциональное назначение заключается в обеспечении информированного выбора подрядчиков и внедрении перспективных решений.

Функциональная организация системы информационной поддержки

На основе идентифицированных компонентов разработана функциональная структура информационной поддержки, включающая три взаимосвязанных блока: предотвращение возникновения пожаров, минимизация негативных последствий и сквозные интегрирующие функции (рис 2).

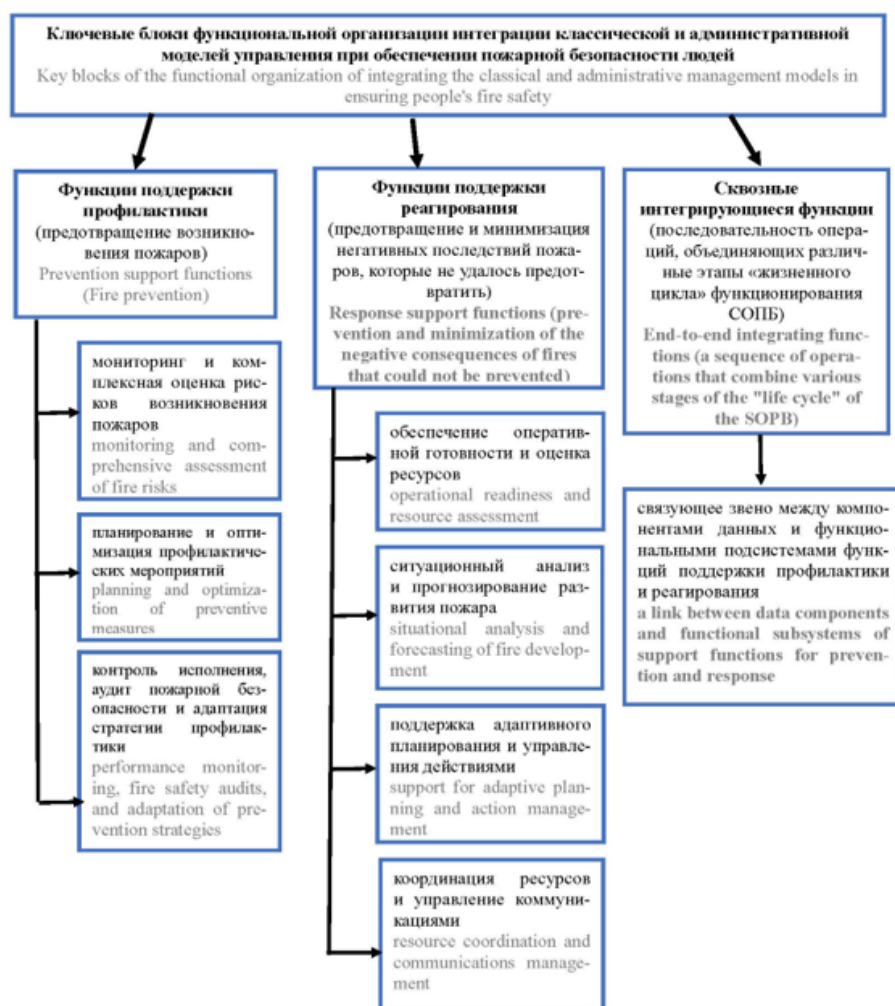


Рис. 2. Ключевые блоки функциональной организации интеграции классической и административной моделей управления при обеспечении пожарной безопасности людей

Fig. 2. Key blocks of the functional organization of the integration of the classical and administrative management models in ensuring people's fire safety

1. Предотвращение возникновения пожаров. Блок ориентирован на превентивное управление пожарными рисками и минимизацию вероятности возникновения пожара. Реализация обеспечивается тремя ключевыми функциями.

Функция мониторинга и комплексной оценки рисков возникновения пожаров направлена на выявление потенциальных угроз и непрерывное наблюдение за параметрами пожарного риска. Включает сбор и анализ формальных данных, выявление уязвимостей на основе ретроспективного анализа и прогнозного моделирования, прогнозирование вероятности возникновения пожара.

Функция планирования и оптимизации профилактических мероприятий отвечает за разработку научно обоснованного плана превентивных мер. Включает формирование рекомендаций по устранению нарушений и снижению уязвимостей, оптимизацию ресурсного обеспечения профилактики, моделирование эффективности и обоснование принимаемых решений.

Функция контроля исполнения, аудита и адаптации стратегии профилактики обеспечивает замкнутый контур управления, гарантируя выполнение планов и постоянное совершенствование системы профилактики. Реализуется через текущий и итоговый контроль выполнения запланированных мероприятий, проведение внутренних аудитов пожарной безопасности и корректировку стратегии на основе выявленных отклонений.

Анализ статистических данных и результатов экспертного опроса позволил выявить два критических фактора, определяющих эффективность реализации функций предотвращения в учреждениях социального обслуживания: уровень профессиональной компетентности руководителей и лиц, ответ-

ственных за пожарную безопасность, а также системность контроля за поведением получателей социальных услуг и персонала. Как показывают результаты анкетирования, в 39,2 % случаев произошедших пожаров виновное лицо не установлено, а в 21,8 % — виновным лицом является получатель социальных услуг [2]. Вышеперечисленные обстоятельства указывают на недостаточность превентивных мер информационно-разъяснительного характера и отсутствие должного контроля за соблюдением противопожарного режима.

2. Минимизация негативных последствий. Активируется при возникновении пожара, цель — обеспечить оперативное, эффективное и безопасное управление ресурсами для эвакуации и спасения людей, локализации пожара и снижения ущерба. Включает следующие функции.

Функция обеспечения оперативной готовности и оценки ресурсов реализуется через постоянную актуализацию информации о доступных силах и средствах для немедленного реагирования: численности и дислокации дежурного персонала, наличии и состоянии средств индивидуальной защиты органов дыхания, средств перемещения маломобильных граждан (носилки, каталки, кресел-колясок), средств пожаротушения.

Функция ситуационного анализа и прогнозирования развития пожара обеспечивает оперативное формирование адекватной картины происшествия и предсказание его динамики на основе поступающей информации от систем автоматической пожарной сигнализации, данных о горючей загрузке помещений, объемно-планировочных характеристик здания.

Функция поддержки адаптивного планирования и управления действиями отвечает

за генерацию и корректировку оптимальных сценариев реагирования в условиях меняющейся обстановки, включая принятие решений о приоритетности эвакуации различных групп получателей услуг, выборе эвакуационных маршрутов и способов спасения.

Функция координации ресурсов и управления коммуникациями нацелена на эффективное использование всех доступных сил и средств как руководителем организации, так и руководителем тушения пожара для обеспечения надежной связи и информирования участников ликвидации пожара, а также динамического управления ресурсами.

Особое значение для учреждений социального обслуживания имеет учет специфики контингента, находящегося в здании. Согласно данным анкетирования, основную долю получателей услуг составляют инвалиды и другие маломобильные граждане, использующие при передвижении кресла-коляски (94,4 % опрошенных), немобильные граждане, не имеющие возможности передвигаться самостоятельно (72,2 %), люди с психическими отклонениями (66,7 %) [2]. Для указанных категорий граждан стандартные модели эвакуации, ориентированные на самостоятельное передвижение, неприменимы, что требует разработки специальных организационно-технических решений и их информационного обеспечения.

3. Сквозные интегрирующие функции. Блок обеспечивает целостность и согласованность информационной поддержки, выступая связующим звеном между компонентами данных и функциональными подсистемами, и выполняет несколько функций.

Интеграция и управление данными включает сбор, очистку, структурирование и хранение информации из всех компонен-

тов информационной поддержки принятия управленческих решений, гарантируя ее актуальности и непротиворечивости.

Комплексный аналитический аппарат обеспечивает применение методов статистического анализа, математического моделирования, экспертных оценок и прогнозирования для преобразования данных в управленчески значимую информацию.

Формирование отчетности и визуализация предоставляет руководителю результаты анализа в наглядной форме (дашборды, диаграммы, карты рисков) для быстрого восприятия ключевых показателей и тенденций.

Поддержка принятия решений и управление знаниями. Руководителю предоставляется возможность сравнивать альтернативные варианты управленческих решений, оценивать их потенциальные последствия, затраты и эффективность. Кроме того, в рамках функции управления знаниями осуществляется накопление и актуализация сведений о лучших практиках и результатах ранее принятых решений, что создает базу для повышения обоснованности будущих управленческих воздействий.

Обсуждение результатов

Проведенное исследование позволяет сформулировать ряд научных и практических выводов.

Во-первых, выявленный компонентный состав информационной поддержки представляет собой системное решение проблемы информационного дефицита руководителей учреждений социального обслуживания в области пожарной безопасности. В отличие от существующих разработок, ориентированных на информационное обеспечение контрольно-надзорной деятельности органов

государственного пожарного надзора и оперативного управления пожаром, предложенный подход учитывает весь спектр управленческих задач, решаемых руководителем в повседневной деятельности — от планирования профилактических противопожарных мероприятий до принятия решений в условиях возникновения пожара.

Во-вторых, функциональная организация системы информационной поддержки, включающая блоки предотвращения, реагирования и сквозные интегрирующие функции, обеспечивает непрерывность и полноту управленческого цикла. Особое значение имеет блок минимизации негативных последствий, поскольку, как подтверждают статистические данные, полностью исключить вероятность возникновения пожара невозможно. В этой связи стратегический акцент смещается с исключительного предотвращения на снижение тяжести негативных последствий уже возникшего пожара. Эффективное реагирование становится главным инструментом обеспечения безопасности охраняемых законом ценностей — жизни и здоровья людей.

В-третьих, результаты исследования показывают, что информационная поддержка принятия управленческих решений в учреждениях социального обслуживания должна учитывать два специфических фактора: особенности контингента (маломобильные и немобильные группы населения, люди с когнитивными нарушениями) и ресурсные ограничения (недостаточная численность персонала для эвакуации, ограниченное финансирование). Наличие этих факторов требует разработки специализированных информационных продуктов — методических рекомендаций, стандартов организации, алгоритмов действий персонала, что является

перспективным направлением дальнейших исследований.

В-четвертых, результаты экспертного анкетирования подтверждают наличие существенных пробелов в информированности и компетентности руководителей учреждений социального обслуживания в вопросах пожарной безопасности. Так, 77,8 % опрошенных не имеют достоверных расчетных данных о необходимом времени эвакуации из возглавляемых ими учреждений, а 55,6 % не владеют информацией о наличии требований СП 59.13330 в проектной документации своих зданий. Эти факты свидетельствуют о том, что формируемая информационная поддержка должна включать не только предоставление данных, но и образовательные компоненты, направленные на повышение компетентности руководителей.

Заключение

В ходе проведенного исследования достигнута поставленная цель: выявлен и систематизирован компонентный состав информационной поддержки принятия управленческих решений при обеспечении пожарной безопасности людей в учреждениях социального обслуживания.

Научная новизна исследования заключается в том, что в отличие от существующих работ, ориентированных на информационное обеспечение контрольно-надзорной деятельности и оперативного управления пожаром, в настоящей работе впервые предложен научно обоснованный перечень из семи взаимосвязанных информационных компонентов и трех функциональных блоков, учитывающий специфику контингента, ресурсные ограничения и весь цикл управленческой деятельности руководителя учреждения

социального обслуживания — от профилактики до минимизации последствий.

Практическая значимость результатов состоит в возможности их использования для разработки методических рекомендаций по совершенствованию информационного обеспечения руководителей учреждений социального обслуживания, а также для создания внутренних нормативных документов (стандартов организаций), регламентирующих процессы управления пожарной безопасностью с учетом выявленных компонентов информационной поддержки.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: формализация количественных зависимостей между компонентами информационной поддержки и показателями эффективности управления пожарной безопасностью; разработка специализированного программного обеспечения для автоматизированной поддержки принятия решений; создание адаптированных обучающих программ для руководителей учреждений социального обслуживания, направленных на повышение их компетентности в области пожарной безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ответ на письмо № М-238-10-8-7 от 04.03.2024 «О предоставлении сведений статистического учета пожаров и их последствий в учреждениях социального обслуживания» : исх. от 21.03.2024 / ВНИИПО МЧС России.
2. Харченко М. В. Специальные компетенции руководителя учреждения социального обслуживания в области обеспечения пожарной безопасности людей // Технологии техносферной безопасности. 2025. № 2 (108). С. 62–83. DOI: 10.25257/TTS.2025.2.108.62-83. EDN: HIAOSA.
3. Байдарова М. А. Управленческое решение и его эффективность в деятельности правоохранительных органов // Основные тенденции развития науки в XXI веке. Актуальные проблемы мирового научного пространства : материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург — Владивосток, 23–30 марта 2022 года. Саратов : Центр профессионального менеджмента «Академия Бизнеса», 2022. С. 106–113. EDN: PLHUJA.
4. Козлачков В. И., Ягодка Е. А. Информационная поддержка оценки соответствия объектов защиты при реализации риск-ориентированной модели контрольно-надзорной деятельности // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 6 (76). С. 65–79. EDN: XUTMBN.
5. Козлачков В. И., Андреев А. О. Информационное обеспечение деятельности органов государственного пожарного надзора при определении угрозы людям в случае пожара // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2010. № 3. С. 51–53. EDN: NTYDLT.
6. Козлачков В. И. Типовая и риск-ориентированная модели надзорной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности. Сравнительный анализ : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. 328 с. EDN: WAWXQB.
7. Козлачков В. И., Хохлова А. Ю. Экспресс-оценка пожарных рисков при обследовании зданий и сооружений. М. : ВИНТИ РАН, 2001. 257 с.
8. Хохлова А. Ю. Экспресс-оценка пожарных рисков при осуществлении государственного пожарного надзора : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.10. М., 1998. 24 с. EDN: ZKFPVN.

9. Козлачков В. И., Лобаев И. А., Плешаков В. В. Корректировка методов принятия экспертных решений о причинной связи между невыполнением требований пожарной безопасности и последствиями пожара // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 5 (57). 6 с. EDN: TLPNBP.

10. Поддержка принятия управленческих решений при расследовании пожаров на основе экспресс-оценки параметров опасных факторов пожара / И. А. Лобаев [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2018. № 5 (81). С. 38–45. DOI: 10.25257/TTS.2018.5.81.38-45. EDN: YOWBRJ.

11. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 25.05.2026).

12. О пожарной безопасности : Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 25.05.2026).

13. Тейлор Ф. У. Принципы научного менеджмента / пер. с англ. А. И. Зак. М. : Контроллинг, 1991. 104 с.

14. Файоль А. Общее и промышленное управление. М. : Контроллинг, 1992. 111 с.

15. Кулыгин В. П. Классическая социология : монография. М. : Наука, 2000. 525 с.

16. Саймон Г. А. Науки об искусственном / пер. с англ. М. : Мир, 1972. 147 с.

17. Козлачков В. И. Техническое регулирование в области пожарной безопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. 205 с.

18. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 25.05.2026).

19. Об утверждении СП 59.13330.2020 «СНИП 35-01-2001 Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения» : приказ Минстроя России от 30.12.2020 № 904/пр. // Легалакт — законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации : информационная система. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minstroja-rossii-ot-30122020-n-904pr-ob-ut-verzhdenii/?ysclid=mt8mo09arw568860527> (дата обращения: 25.05.2026).

REFERENCES

1. Response to letter No. M-238-10-8-7 dated 04.03.2024 "On providing statistical data on fires and their consequences in social service institutions": ex. dated 21.03.2024 / VNIPO EMERCOM of Russia.

2. Kharchenko M. V. Special competencies of the head of a social service institution in ensuring fire safety for people // Technology of technosphere safety. 2025. No. 2 (108). P. 62–83. DOI: 10.25257/TTS.2025.2.108.62-83. EDN: HIAOSA.

3. Baydarova, M. A. Management Decision and Its Effectiveness in the Activities of Law Enforcement Agencies // Main Trends in the Development of Science in the 21st Century. Current Problems of the Global Scientific Space : Proceedings of the International Scientific and Practical

Conference, Saint Petersburg — Vladivostok, March 23–30, 2022. Saratov : Center for Professional Management "Academy of Business", 2022. P. 106–113. EDN: PLHUJA.

4. Kozlachkov V. I., Yagodka E. A. Information Support for Assessing the Compliance of Protection Objects in the Implementation of a Risk-Oriented Model of Control and Supervision Activities // Technology of technosphere safety. 2017. No. 6 (76). P. 65–79. EDN: XUTMBN.

5. Kozlachkov V. I., Andreev A. O. Information support for the activities of state fire supervision bodies in determining the threat to people in the event of a fire // Fires and emergencies: prevention, elimination. 2010. No. 3. P. 51–53. EDN: NTYDLT.

6. Kozlachkov V. I. A typical and risk-oriented model of supervisory activities in the field of fire safety. Comparative Analysis: monograph. Moscow: SFA of EMERCOM of Russia, 2016. 328 p. EDN: WAXXQB.

7. Kozlachkov V. I., Khokhlova A. Yu. Express Assessment of Fire Risks in the Examination of Buildings and Structures. Moscow: VINITI RAS, 2001. 257 p.

8. Khokhlova A. Yu. Express Assessment of Fire Risks in the Implementation of State Fire Supervision : Abstract of a Candidate of Technical Sciences dissertation. Moscow, 1998. 24 p. EDN: ZKFPVN.

9. Kozlachkov V. I., Lobayev I. A., Pleshakov V. V. Correction of expert decision-making methods on the causal relationship between non-compliance with fire safety requirements and the consequences of fire // Technosphere safety technologies. 2014. No. 5 (57). P. 6. EDN: TLPNBP.

10. Support for managerial decision-making in fire investigation based on express assessment of parameters of dangerous fire factors / I. A. Lobayev [et al.] // Technology of technosphere safety. 2018. No. 5 (81). P. 38–45. DOI: 10.25257/TTS.2018.5.81.38-45. EDN: YOWBRJ.

11. Technical Regulations on Fire Safety Requirements : Federal Law No. 123-FZ on 22.07.2022 // ConsultantPlus : legal reference system. URL: <http://www.consultant.ru> (accessed 25.07.2026).

12. On Fire Safety : Federal Law No. 69-FZ on 21.12.1994 // ConsultantPlus : legal reference system. URL: <http://www.consultant.ru> (accessed 25.05.2026).

13. Taylor F. W. Principles of Scientific Management / translated from English by A. I. Zak M. : Kontrolling, 1991. 104 p.

14. Fayol A. General and Industrial Management Moscow : Kontrolling, 1992. 111 p.

15. Classical Sociology / V.P. Kultigin. Moscow : Nauka, 2000. 525 p.

16. Simon, G. A. The Sciences of the Artificial / G.A. Simon; Translated from English. Moscow : Mir, 1972. 144 p.

17. Kozlachkov V. I. Technical Regulation in the Field of Fire Safety. Moscow : SFA of EMERCOM of Russia, 2012. 205 p.

18. Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures : Federal Law No. 384-FZ on 30.12.2009 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (accessed 25.05.2026).

19. On Approval of SP 59.13330.2020 "SNIP 35-01-2001 Accessibility of Buildings and Structures for People with Limited Mobility" : Order No. 904/pr of the Ministry of Construction of the Russian Federation on 30.12.2020 // Legalact — laws, codes, and regulatory legal acts of the Russian Federation : information system. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minstroja-rossii-ot-30122020-n-904pr-ob-utverzhenii/?ysclid=mt8mo09arw568860527> (accessed 25.05.2026).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харченко Милита Владимировна, научный сотрудник Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); SPIN-код: 5702-0578; ORCID: 0009-0008-8664-5411; e-mail: zainikaeva@mail.ru

Хохлова Алла Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры надзорной деятельности Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); SPIN-код: 6224-1876; ORCID: 0009-0009-1690-9028; e-mail: A.Hohlova@academygps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Milita V. Kharchenko, Researcher, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); SPIN-code: 5702-0578; ORCID: 0009-0008-8664-5411, e-mail: zainikaeva@mail.ru

Alla Yu. Khokhlova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Supervisory Activities, SFA of EMERCOM of Russia (4 Boris Galushkin St., Moscow, 129366, Russian Federation); SPIN code: 6224-1876; ORCID: 0009-0009-1690-9028; e-mail: A.Hohlova@academygps.ru

УДК 614.842.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТАКТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ РУКОВОДИТЕЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА НА ОСНОВЕ ХРОНОМЕТРАЖА ПОЖАРОВ

Мареев Михаил Александрович^{1,2}, Баканов Максим Олегович³, Гринченко Борис Борисович⁴

¹ Департамент спасательных формирований МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

² Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

⁴ Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново, Российская Федерация

Аннотация. Изложены результаты проверки коэффициента эффективности тактических решений руководителя тушения пожара, включенного в стохастическую модель распределения ресурсов, построенную на базе метода изоморфных потоковых моделей. На начальной стадии крупного пожара обстановка остается неясной, поэтому даже большой расход огнетушащих веществ не всегда приводит к уменьшению площади пожара. Причиной является неверный выбор решающего направления и поздняя перегруппировка сил и средств. В модели это явление описано сигмоидальной функцией, зависящей от объема сведений, накопленных руководителем тушения пожара. Для проверки модели выполнен хронометраж радиопереговоров с трех крупных пожаров в резервуарных парках. По каждому пожару рассчитано накопление информации по алгоритму количественной оценки осведомленности. Показано, что до достижения порогового объема информации коэффициент эффективности тактических решений остается низким и площадь пожара продолжает расти, несмотря на подачу огнетушащих веществ. После преодоления порога тот же расход обеспечивает локализацию. Сделан вывод о том, что пороговое значение зависит от того, сколько информации способен удержать и обработать руководитель тушения пожара, а не от типа горящего объекта. Поэтому полученный показатель можно использовать для настройки стохастической модели и для обоснования требований к автоматическим системам охлаждения резервуаров.

Ключевые слова: осведомленность РТП, сигмоидальная функция, стохастическое моделирование, изоморфные потоковые модели, хронометраж, распределение ресурсов, резервуарный парк, время отдачи команды, когнитивные ограничения

Для цитирования: Мареев М. А., Баканов М. О., Гринченко Б. Б. Экспериментальная верификация коэффициента эффективности тактических решений руководителя тушения пожара на основе хронометража пожаров // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 115–124.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE EFFICIENCY COEFFICIENT OF FIRE SUPPRESSION LEADER'S TACTICAL DECISIONS BASED ON FIRE CHRONOMETER DATA

Mikhail A. Mareev^{1,2}, Maxim O. Bakanov³, Boris B. Grinchenko⁴

¹ Department of Rescue Formations of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation

² SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

⁴ IFRA of SFS of EMERCOM of Russia, Ivanovo, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of testing the tactical efficiency coefficient of a firefighting manager (FSM) included in a stochastic resource allocation model constructed using the isomorphic flow model method. At the initial stage of a major fire, the situation remains unclear, so even a high consumption of fire extinguishing agents does not always lead to a reduction in the fire area. This is due to the incorrect choice of the decisive direction and the late redeployment of forces and resources. In the model, this phenomenon is described by a sigmoid function depending on the amount of information accumulated by the FSM. To test the model, the timing of radio communications from three major fires in tank farms was conducted. For each fire, the accumulation of information was calculated using an algorithm for quantitative assessment of awareness. It is shown that until the threshold amount of information is reached, the tactical efficiency coefficient remains low, and the fire area continues to grow despite the supply of fire extinguishing agents. After exceeding the threshold, the same consumption ensures localization. It is concluded that the threshold value depends on the amount of information the FSM can retain and process, and not on the type of burning object. Therefore, the obtained indicator can be used to adjust the stochastic model and to justify the requirements for automatic tank cooling systems.

Keywords: RTP awareness, sigmoid function, stochastic modeling, isomorphic flow models, timing, resource allocation, tank farm, command response time, cognitive limitations

For citation: Mareev M. A., Bakanov M. O., Grinchenko B. B. Experimental verification of the efficiency coefficient of fire suppression leader's tactical decisions based on fire chronometer data // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 115–124.

Введение

На результат тушения пожара влияет не только количество поданных приборов тушения пожара, огнетушащих веществ и численность личного состава, но и то, насколько полно руководитель тушения пожара (РТП) представляет себе обстановку на пожаре [1].

В первые минуты пожара сведений мало, они отрывочны и часто противоречивы. В таких условиях даже большой расход огнетушащих веществ может не дать ожидаемого результата, выбор решающего направления оказывается ошибочным, основные силы отвлекаются на второстепенные участки, а перегруппировка проводится с запозданием [2–4].

В рамках метода изоморфных потоковых моделей [5, 6] этот эффект учитывается через коэффициент эффективности тактических решений $\eta(I_{\text{РТП}})$. Он входит в уравнение изменения площади пожара:

$$\frac{dS_i}{dt} = P_i \cdot V_n - \eta(I_{\text{РТП}}) \cdot \sum_{kv, tt} EF_{kv, tt} \cdot \rho_{kv, t} \cdot q_{kv, tt, i}, \quad (1)$$

где:

S_i — площадь пожара, м²;

P_i — периметр фронта пожара, м;

V_n — линейная скорость распространения пламени, м/с;

$EF_{kv, tt}$ — эффективность тушения, м²/л;

$\rho_{kv, t}$ — доля времени работы личного состава;

$q_{kv, tt, i}$ — расход огнетушащего вещества, л/с.

Коэффициент $\eta(I_{\text{РТП}})$ задается сигмоидальной функцией:

$$\eta(I_{\text{РТП}}) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(I_{\text{РТП}} - I_{\text{пор}})}}, \quad (2)$$

где:

$\alpha = 0,01 \text{ бит}^{-1}$ — скорость насыщения;

$I_{\text{РТП}}$ — объем информации, накопленной руководителем тушения пожара, бит;

$I_{\text{пор}}$ — пороговый объем информации, бит.

Для резервуарных парков принято $I_{\text{пор}} = 40 \text{ бит}$ [5]. Однако проверка этой величины на реальных пожарах до настоящего времени не проводилась. Настоящая работа восполняет указанный пробел.

Материалы и методы

Рассмотрены три крупных пожара в резервуарных парках, произошедшие в период с 2022 по 2026 год. По условиям конфиденциальности сведений о режимных объектах

точные даты и места пожаров не приводятся. Все данные обезличены и представлены только в том объеме, который необходим для расчетов. Обработано 87 радиосообщений, в которых содержались доклады о площади пожара, количестве поданных стволов, ранге пожара и имеющихся угрозах. Общие сведения о пожарах даны в табл. 1.

Для каждого момента времени, которому соответствует радиосообщение, объем информации определялся по алгоритму количественной оценки осведомленности [5]:

$$I_i(t) = \alpha_i \cdot e^{-\lambda_{\text{уст}} \Delta t} \cdot (\log_2(1 + \frac{S_i}{S_0}) + \log_2(1 + \frac{v_i}{v_0}) + \log_2(1 + \frac{T_i}{T_0}) + U_i + R_i), \quad (3)$$

где:

$\alpha_i = 0,8$ — достоверность радиодоклада;

$\lambda_{\text{уст}} = 0,03 \text{ с}^{-1}$ — коэффициент устаревания информации;

Δt — время с момента получения данных, с;

S_i — площадь пожара, м²;

$S_0 = 1 \text{ м}^2$ — порог чувствительности по площади;

v_i — скорость распространения, м/с;

$v_0 = 0,001$ м/с — порог чувствительности по скорости;

T_i — температура стенки резервуара, °С;

$T_0 = 20$ °С — порог чувствительности по температуре;

U_i — признак угрозы людям (0 или 1);

R_i — признак состояния путей эвакуации (0 или 1).

Таблица 1
Характеристика проанализированных пожаров

Table 1
Characteristics of the analyzed fires

Пожар Fire	Ранг Rank	Тип объекта Object type	Площадь горения, м ² Burning area, м ²	Количество сообщений Number of messages
1	№ 4	PBC-5000 RVS-5000	408	29
2	№ 3	PBC-2000 RVS-2000	163	28
3	№ 4	PBC-10000 RVS-10000	785	30

Введен температурный параметр, потому что для резервуарных парков именно температура стенки служит главным признаком

угрозы разрушения конструкции [7]. Скорость распространения определялась по изменению площади между соседними докладами:

$$v_i = \frac{S(t_{k+1}) - S(t_k)}{t_{k+1} - t_k}. \quad (4)$$

Скорость тушения вычислялась как изменение площади во времени. Отрицательные значения соответствуют локализации.

Дополнительно для каждого пожара фиксировалось время от момента получения доклада с признаками угрозы (резкий рост температуры, изменение направления факела) до момента отдачи руководителем распоряжения об изменении тактики. Это время сопоставлялось с текущим значением $I_{\text{РТП}}$.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показано накопление информации $I_{\text{РТП}}(t)$ для трех пожаров.

Порог 40 бит достигается, для пожара 1 — через 18 минут, для пожара 2 — через 24 минуты, для пожара 3 — через 15 минут. До преодоления порога рост информации идет медленно, поскольку докладов мало и они несут ограниченные сведения.

На рис. 2 расчетный коэффициент $\eta(I_{\text{РТП}})$ совмещен с фактической динамикой площади пожара для пожара 1.

До достижения порога площадь пожара растет, несмотря на подачу огнетушащих веществ. После преодоления порога рост замедляется, начинается локализация.

На рис. 3 приведена зависимость фактической скорости тушения от объема информации $I_{\text{РТП}}$ для всех трех пожаров.

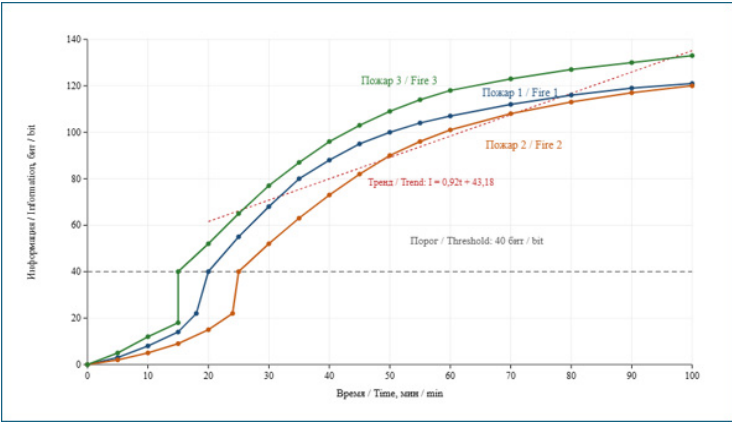


Рис. 1. Динамика накопления информации $I_{\text{РТП}}(t)$ для трех пожаров
Fig. 1. Dynamics of information accumulation $I_{\text{FIC}}(t)$ for three fires

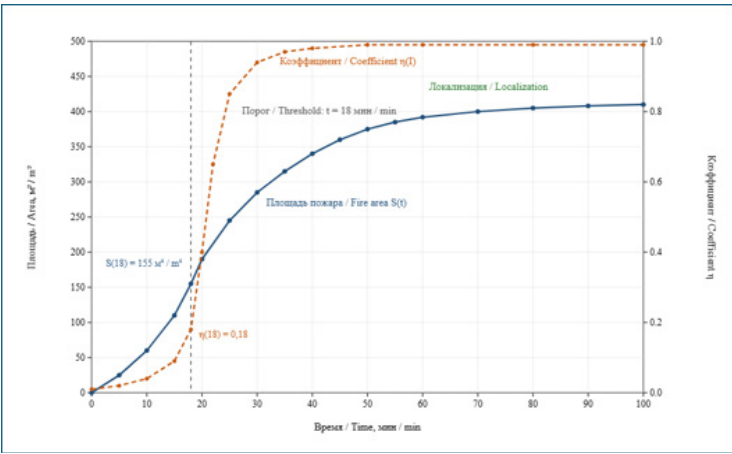


Рис. 2. Совмещение расчетного коэффициента $\eta(I_{\text{РТП}})$ с фактической динамикой площади пожара для пожара 1
Fig. 2. Superposition of the calculated coefficient $\eta(I_{\text{FIC}})$ with the actual fire area dynamics for Fire 1

Экспериментальные точки ложатся во-
круг сигмоидальной кривой. Коэффициент
корреляции составил $r = 0,89$ ($p < 0,01$).

Количественные результаты по каждому
пожару сведены в табл. 2. Для области $I_{\text{РТП}} > I_{\text{пор}}$
получена регрессионная зависимость:

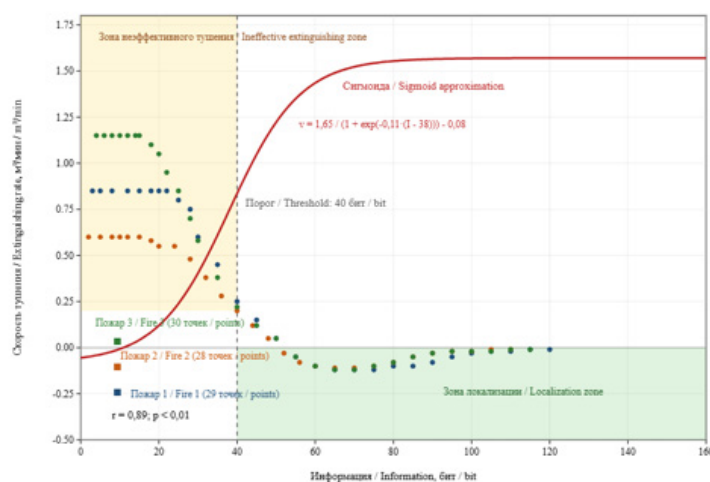
$$S_{\text{туш}} = 0,12 \cdot I_{\text{РТП}} - 1,8, \quad R^2 = 0,83, \quad (5)$$

где $S_{\text{туш}}$ — скорость тушения, $\text{м}^2/\text{мин}$.

Таблица 2
Сопоставление параметров до и после достижения порога

Table 2
Comparison of parameters before and after reaching the threshold

Пожар Fire	Время достижения порога, мин Threshold reaching time, min	Скорость роста площа- ди до порога, $\text{м}^2/\text{мин}$ Fire area growth rate before threshold, m^2/min	Скорость роста площади после порога, $\text{м}^2/\text{мин}$ Fire area growth rate after threshold, m^2/min	Кратность снижения Reduction ratio
1	18	0,85	0,23	3,7
2	24	0,60	0,20	3,0
3	15	1,15	0,46	2,5

Рис. 3. Зависимость фактической скорости тушения от объема информации $I_{\text{РТП}}$ Fig. 3. Dependence of the actual extinguishing rate on the amount of information I_{FIC}

В табл. 3 показано, как время отдачи команды зависит от объема информации. Коэффициент $\eta(I_{\text{РТП}})$ — не отвлеченная величина. Он показывает, какая часть поданных огнетушащих веществ дает полезный результат. При $\eta < 0,2$ подача ОТВ практически не сказывается на площади пожара. После преодоления порога тот же расход обеспечивает его локализацию.

Это объясняет известное в практике явление: РТП еще не накопил достаточно сведений для выбора решающего направления и расстановки сил и средств [8, 9].

Полученное пороговое значение 40 бит хорошо согласуется с известными данными о возможностях человеческой памяти. Из психологии известно, что в обычных условиях человек удерживает в оперативной памяти 7 ± 2 элемента, а в стрессовой обстановке — всего 3–4 элемента [10, 11].

В рассматриваемой задаче каждым таким элементом является резервуар, о котором РТП должен удерживать пять тактических параметров: площадь пожара, скорость распространения, температуру стенки, угрозу людям и состояние путей

эвакуации. Если каждый параметр имеет не более восьми различных градаций, то информация об одном участке составляет $\log_2(8^5) = 15$ бит, а с учетом двух бинарных признаков — до 17 бит.

Если РТП способен одновременно удерживать в памяти 3–4 таких элемента, то суммарный объем информации, которым он может оперировать, составляет 34–51 бит. Экспериментально полученное значение 40 бит находится внутри этого диапазона. Это подтверждает, что пороговое значение определяется ограниченными возможностями человека по обработке информации, а не свойствами горящего объекта. Из табл. 3 следует, что при $I_{\text{РТП}} < 20$ бит время отдачи команды составляет в среднем 95 с, а при $I_{\text{РТП}} > 40$ бит — 18 с. Иными словами, до преодоления порога РТП задерживает распоряжения примерно на полторы минуты. Для стенки резервуара, нагревающейся со скоростью $0,5^\circ\text{C}/\text{с}$ при тепловом потоке $50 \text{ кВт}/\text{м}^2$, за 95 с температура возрастает на 47°C . Такая задержка может привести к достижению критической температуры стенки до начала активного охлаждения [7].

Для резервуарных парков это означает, что в первые 15–24 мин после прибытия

первых подразделений эффективность тушения остается низкой.

Таблица 3
Время отдачи команды в зависимости от объема информации

Table 3

Command time depending on the amount of information

Диапазон $I_{\text{РТП}}$, бит I_{FC} range, bit	Среднее время отдачи команды, с Average command time, s	Доля команд с задержкой более 60 с, % Share of commands with a delay of more than 60 s, %
<20	95	67
20–40	45	28
>40	18	6

Закключение

По результатам хронометража 87 радиосообщений с трех крупных пожаров в резервуарных парках подтверждено пороговое значение $I_{\text{пор}} = 40$ бит.

При $\eta < 0,2$ расход огнетушащих веществ не обеспечивает уменьшения площади пожара. После преодоления порога тот же расход приводит к локализации. Кратность снижения скорости роста площади составляет 2,5–3,7.

Время отдачи команды сокращается с 95 с при $I_{\text{РТП}} < 20$ бит до 18 с при $I_{\text{РТП}} > 40$ бит. В первые минуты пожара такая задержка способна привести к нагреву стенки ре-

зервуара на 40–50 °С до начала активного охлаждения.

Пороговое значение определяется когнитивными возможностями руководителя тушения пожара, а не типом объекта. Это развивает научные основы тактики тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ, впервые формируя количественный критерий, отделяющий фазу неэффективного распределения сил и средств от фазы устойчивой локализации пожара. На этом обосновываются требования к автоматическим системам охлаждения резервуаров, срабатывающим в первые минуты пожара без участия РТП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Генезис развития, современные реалии научно-методического и нормативного правового обоснования понятий «крупный пожар», «сложный (затяжной) пожар» / А. Н. Денисов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2025. Т. 34, № 2. С. 5–19. EDN: XVYUPE.
2. Денисов А. Н., Тай Н. Т. Формализация граничных условий для моделей и алгоритмов задачи идентификации ситуаций, складывающихся на месте пожара // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2023. № 1–2. С. 26–30. EDN: ETADMQ.
3. Баканов М. О. Влияние теплового стресса на когнитивные функции пожарных: анализ эмпирических данных / М. О. Баканов, Б. Б. Гринченко, Д. Ю. Захаров // Современные аспекты

пожарной безопасности : материалы научно-практической конференции. Балашиха, 2026. С. 274–278. EDN: SVUYSC.

4. Копылов Н. П., Карпов А. В., Федоткин Д. В. Аэродинамические и температурные характеристики пожаров в резервуарах с нефтепродуктами // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2018. № 1. С. 31–34. EDN: QHOYKX.

5. Мареев М. А. Нормативно-параметрическая модель динамики боевых действий во время пожара на основе метода электрогидравлических аналогий // Современные проблемы гражданской защиты. 2026. № 2 (59). С. 45–58.

6. Мареев М. А. Экспериментальное определение потерь напора в магистральных рукавных линиях и их аппроксимация для обоснования тактики тушения пожаров // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2026. № 2 (41). С. 368–380.

7. Математическая модель охлаждения борта резервуара после тушения пожара нефтепродуктов / Н. П. Копылов [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXVIII Международной научно-практической конференции. 2016. С. 273–282. EDN: YGQEDV.

8. Endsley M. R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems // Human Factors. 1995. Vol. 37. No. 1. P. 32–64.

9. Клайн Г. Источники силы: как люди принимают решения. М., 2020. 480 с. EDN: XGFFNX.

10. Miller G. A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information // Psychological Review. 1956. Vol. 63. No. 2. P. 81–97.

11. Wickens C. D. Situation awareness: Review of Mica Endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement // Human Factors. 2008. Vol. 50. No. 3. P. 397–403.

REFERENCES

1. Genesis of Development, Modern Realities of Scientific, Methodological and Normative Legal Substantiation of the Concepts of "Major Fire", "Complex (Protracted) Fire" / A. N. Denisov [et al.] // Fire and Explosion Safety. 2025. Vol. 34. No. 2. P. 5–19. EDN: XUYUPE.

2. Denisov A. N., Tai N. T. Formalization of Boundary Conditions for Models and Algorithms for Identifying Situations Developing at the Fire Site // Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. 2023. No. 1-2. P. 26–30. EDN: ETADMQ.

3. Bakanov M. O., Grinchenko B. B., Zakharov D. Yu. The Impact of Heat Stress on the Cognitive Functions of Firefighters: An Analysis of Empirical Data // Modern Aspects of Fire Safety : Proceedings of the Scientific and Practical Conference. Balashikha, 2026. P. 274–278. EDN: SVUYSC.

4. Kopylov N. P., Karpov A. V., Fedotkin D. V. Aerodynamic and Temperature Characteristics of Fires in Oil Tanks // Environmental Protection in the Oil and Gas Complex. 2018. No. 1. P. 31–34. EDN: QHOYKX.

5. Mareev M. A. Normative-parametric model of the dynamics of combat operations during a fire based on the method of electrohydraulic analogies // Modern Problems of Civil Defense. 2026. No. 2 (59). P. 45–58.

6. Mareev M. A. Experimental Determination of Pressure Losses in Main Hose Lines and Their Approximation to Substantiate Fire Extinguishing Tactics // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2026. No. 2 (41). P. 368–380.

7. Mathematical Model of Tank Side Cooling after Extinguishing an Oil Product Fire / N. P. Kopylov [et al.] // Actual Problems of Fire Safety : Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference. 2016. P. 273–282. EDN: YGQEDV.
8. Endsley M. R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems // Human Factors. 1995. Vol. 37. No. 1. P. 32–64.
9. Kline G. Sources of Power: How People Make Decisions. Moscow, 2020. 480 p. EDN: XGFFNX.
10. Miller G. A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information // Psychological Review. 1956. Vol. 63. No. 2. P. 81–97.
11. Wickens C. D. Situation awareness: Review of Mica Endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement // Human Factors. 2008. Vol. 50. No. 3. P. 397–403.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мареев Михаил Александрович, заместитель начальника отдела Департамента спасательных формирований МЧС России (121357, Российская Федерация, г. Москва, ул. Ватутина, д. 1), преподаватель кафедры пожарной тактики и службы Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); SPIN-код: 2799-9425; Author ID: 1232680; ORCID: 0009-0007-6084-2321; e-mail: mareev.mikhail@mail.ru

Баканов Максим Олегович, д-р техн. наук, доцент, советник РААСН, профессор кафедры информатики и прикладной математики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское ш., д. 26); SPIN-код: 3185-5193; Author ID: 802943; ORCID: 0000-0002-5427-8767; e-mail: mask-13@mail.ru

Гринченко Борис Борисович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарно-строевой, физической подготовки и газодымозащитной службы Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (153040, Российская Федерация, г. Иваново, просп. Строителей, д. 33); SPIN-код: 6329-2575; Author ID: 864204; ORCID: 0000-0003-1759-2308; e-mail: grinchenko.borya@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail A. Mareev, Deputy Head of Department of Rescue Teams, Ministry of Emergency Situations of Russia (1 Vatutina St., Moscow, 121357, Russian Federation), Lecturer of Department of Fire Tactics and Service, SFA of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); SPIN-code: 2799-9425; Author ID: 1232680; ORCID: 0009-0007-6084-2321; e-mail: mareev.mikhail@mail.ru

Maxim O. Bakanov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor of Department of Computer Science and Applied Mathematics, National Research Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation); SPIN-code: 3185-5193; Author ID: 802943; ORCID: 0000-0002-5427-8767; e-mail: mask-13@mail.ru

Boris B. Grinchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Fire-Fighting, Physical Training, and Gas and Smoke Protection Service, IFRA of SFS of EMERCOM

of Russia (40 Stroiteley Avenue, Ivanovo, 331530, Russian Federation); SPIN-code: 6329-2575;
Author ID: 864204; ORCID: 0000-0003-1759-2308; e-mail: grinchenko.borya@mail.ru

УДК 614.8+004.8

АЛГОРИТМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЕДЕНИЯ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ

Логинов Валерий Викторович, Терентьев Виталий Викторович, Зубарев Игорь Александрович
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В статье предложен алгоритм работы искусственного интеллекта при информационной поддержке принятия решений в условиях воздействия опасностей, возникающих при военных конфликтах или вследствие этих конфликтов. Актуальность статьи обусловлена необходимостью интеграции имеющихся информационных систем, используемых для решения вопросов защиты населения и территорий, с алгоритмом, оценивающим способность имеющихся сил выполнить задачи восстановления объектов в максимально короткие сроки. При анализе применения алгоритма искусственного интеллекта были использованы метод линейной оптимизации и вероятностно-статистические методы. Предложен общий алгоритм оценки значимости объектов в системе защитных мероприятий. Также предложено использовать базу данных о ходе ликвидации последствий воздействия негативных факторов для определения времени восстановления объектов на основе коэффициента, характеризующего способность подразделений проводить восстановительные работы. Использование искусственного интеллекта при анализе таких баз данных позволит рассчитать соответствующий коэффициент возможности проведения работ имеющимся подразделением с определением времени проведения. Предложенный подход позволит лицам, принимающим решения на ликвидацию негативных последствий, учитывать как фактор значимости пораженного объекта, так и временной фактор ведения работ по восстановлению. Сделан вывод о возможности использования алгоритма в практической деятельности органов управления.

Ключевые слова: искусственный интеллект, принятие решений, линейная оптимизация, база данных, восстановление функционирования

Для цитирования: Логинов В. В., Терентьев В. В., Зубарев И. А. Алгоритм использования искусственного интеллекта при информационной поддержке принятия решений в условиях ведения гражданской обороны // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 125–133.

ALGORITHM FOR USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INFORMATION SUPPORT FOR DECISION-MAKING IN CIVIL DEFENSE

Valery V. Loginov, Vitaly V. Terentyev, Igor A. Zubarev
UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The article proposes an algorithm for using artificial intelligence to support decision-making in the face of the dangers that arise during or as a result of military conflicts. The relevance of the article is due to the need to integrate existing information systems used to address issues related to the protection of the population and territories with an algorithm that evaluates the ability of available forces to perform the tasks of restoring facilities as quickly as possible. When analyzing the application of the artificial intelligence algorithm, the linear optimization method and probabilistic-statistical methods were used. A general algorithm for assessing the significance of objects in the system of protective measures is proposed. It is also offered to use a database on the progress of eliminating the consequences of negative factors to determine the time required to restore facilities, based on a coefficient that characterizes the ability of units to carry out restoration work. The application of artificial intelligence in the analysis of such databases will allow the calculation of the corresponding coefficient of the possibility of carrying out work by the existing unit, with the determination of the time of carrying out the work. This approach will let decision-makers take into account both the significance of the affected facility and the time factor when carrying out restoration work. The conclusion is made about the possibility of using the algorithm in the practical activities of management bodies.

Keywords: artificial intelligence, decision-making, linear optimization, database, restoration of functionality

For citation: Loginov V. V., Terentyev V. V., Zubarev I. A. Algorithm for using artificial intelligence in information support for decision-making in civil defense // *Technosphere safety*. 2026. No. 3 (52). P. 125–133.

Введение

В современных условиях вопросы эффективного применения сил и средств (СиС) для защиты населения и территорий от опасностей, возникающих при военных конфликтах или вследствие их, являются актуальными и требуют тщательного рассмотрения. В общем такое применение организуется заблаговременно и отражается в планах ведения гражданской обороны (ГО). Главным отличием чрезвычайных ситуаций (ЧС) при ведении ГО от ЧС, предполагаемых в единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), является их во многом не прогнозируемый и множественный

характер: когда на одной территории могут возникнуть множественные повреждения объектов. Каждый из этих объектов в определенной степени и направлении обеспечивает систему безопасного функционирования объектов территории и проживания на ней населения.

Обычно при оценке последствий поражающих факторов на объекты используют теоретико-вероятностные методы оценки обстановки [1] и на их основе разрабатывают планы применения СиС и соответствующие им алгоритмы принятия решений на ликвидацию последствий. Такой подход полностью оправдывает себя в условиях, когда нет непосредственной угрозы действия опасного фактора, в этом случае при оценке

обстановки присутствует фактор неопределенности, который не позволяет сделать конкретную оценку [2]. В условиях воздействия средств поражения фактор неопределенности снимается почти полностью, руководители ГО или РСЧС могут получить по докладам с мест и результатам объективного контроля, в течение достаточно небольшого периода времени, вполне реальные данные.

Информационная поддержка принятия решений в этом случае должна быть доступной и быстрой, с использованием информационных систем, использующих алгоритмы работы искусственного интеллекта (ИИ).

Работа ИИ должна опираться на математическую модель реальной системы защитных мероприятий, причем свойства этой модели должны описываться доста-

точно простым математическим аппаратом, согласующимся с интуитивной интерпретацией свойств этой модели [3]. В общем случае система мероприятий будет опираться на объекты, различных свойств и параметров, каждый из которых будет иметь назначение и вес (значимость) в системе. Учитывая, что система защиты будет охватывать определенную территорию, объекты системы должны иметь привязку к геоинформационной системе.

Постановка задачи

Систему функционирования защиты населения и территории для последующего построения алгоритма для ее анализа ИИ можно представить как [4]:

$$S = (I, J, N, V, T), \quad (1)$$

где:

I — мероприятия защиты;

J — обеспечение мероприятий защиты;

N — объекты, обеспечивающие функционирование системы;

V — СИС обеспечения работы объектов;

T — время полного восстановления функционирования системы после воздействия поражающих факторов.

Мероприятия защиты $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ соответствуют общим задачам системы защиты населения (РСЧС или ГО), а также плану, разработанному органами управления для данной территории. Например, I_1 — оповещение и информирование населения, I_2 — эвакуация и т. п.

Обеспечение мероприятий защиты $J_m = \{J_{m1}, J_{m2}, \dots, J_{mh}\}$ тесно увязывается с мероприятием защиты и определяет обеспечение (обслуживание) или получение ресурса для проведения мероприятия защиты. Так, для функционирования системы оповещения

и информирования, создаваемой на основе системы связи, необходимы центр управления оповещения, линии связи с оконечными устройствами, электроэнергия для их работы. Важно отметить, что обеспечение разных мероприятий предполагается проводить одними источниками ресурсов (допустим, электроэнергией) и одними обеспечивающими силами (медицинское обеспечение).

Объекты, обеспечивающие функционирование мероприятий $N_{mh} = \{N_{mh1}, N_{mh2}, \dots, N_{mhw}\}$, имеют привязку к местности в геоинформационной системе, используемой

органами управления для принятия решений. Они четко идентифицируются по признаку обеспечения мероприятия защиты, номера объекта в системе мероприятий w и закреплении ответственности за его функционирование. Один объект в системе может проводить обеспечение мероприятий h различных направлений защиты t или обеспечивать поставку ресурсов и средств. При этом его номер w в системе может быть разным, в зависимости от номера группы обеспечения мероприятий h . Алгоритм работы ИИ должен четко идентифицировать объект, определяя его положение на местности.

T — время полного восстановления функционирования системы после воздействия поражающих факторов. $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ будет складываться из времени, которое необходимо для восстановления способности системы проводить с соответствующей

эффективностью комплекс мероприятий защиты t . При этом время восстановления способности проведения мероприятий будет определяться временем восстановления пораженного объекта t_N .

Время t_N зависит от способности СИС обеспечения работы объектов V выполнить аварийно-спасательные и другие неотложные работы (АСДНР). Эту способность можно охарактеризовать показателем y_N , равному максимальному объему работ, который может быть выполнен отдельным подразделением V в единицу времени (в течение одной смены). $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ состоят в системе ведения ГО различного уровня, подчиняются соответствующему руководителю, включаются в планы ведения ГО и имеют подготовку для действий по предназначению.

В системе защиты S каждый объект N_{mh_w} должен характеризоваться коэффициентом значимости, определяемым:

$$K_{N_{mh_w}} = k_{\text{нас}} \cdot k_{\text{знач}}, \quad (2)$$

где:

$k_{\text{нас}}$ — коэффициент, учитывающий часть населения территории, обслуживаемого объектом;

$k_{\text{знач}}$ — коэффициент, учитывающий значимость объекта в системе защиты.

Оценку значимости мероприятий защиты в системе функционирования в математической форме представим в виде:

$$F = |K_{mN}|. \quad (3)$$

Условная эффективность мероприятия защиты t :

$$F_m = \sum_1^n K_{N_{mh_w}}. \quad (4)$$

Алгоритм решения

При ведении ГО из функционирования системы может быть исключены (поражены) несколько объектов и может сложиться ситуация неопределенности

эффективного использования СИС для восстановления функционирования. В этом случае для принятия решения на их использование необходимы будут анализ ситуации и предложения по использованию СИС [5]. Систему ИИ в этом случае

можно использовать для информационной поддержки принимаемого решения по следующему алгоритму:

$$X = |c_{IN}|. \quad (5)$$

где c — показатель состояния объекта, принимающий значение «1» при его рабочем состоянии и «0» — при противоположном таковому;

$$F_{m\text{пор}} = |K_{mN}| \cdot |c_{IN}|. \quad (6)$$

По значениям K_{Nmh_w} пораженных объектов в системе защиты следует подобрать соот-

— после докладов об обстановке в зоне поражения составляется матрица пораженных объектов:

— проводя умножение матриц (3) и (5), можно определить показатели эффективности мероприятий защиты m в условиях поражения объектов, их обеспечивающих:

ветствующие значения c , при которых эффективности F_m будут наибольшими:

$$F_{\text{вост}} = \max \{f(K_{Nmh_w}; c)\}. \quad (7)$$

При выборе варианта принятия решения необходим будет в том числе учет возможностей СиС, имеющих в распоряжении, по ведению АСДНР. Выше было сказано, что возможности можно охарактеризовать показателем u_m . Вычисление этого показателя в алгоритме работы ИИ предлагается определять вероятностно-статистическим методом, используя обновляемую базу данных, содержащую формализованные отчетные сведения о действиях типовых формирований при ведении АСДНР. Формализованный отчет, в дальнейшем анализируемый ИИ, должен содержать следующие сведения:

— наименование и назначение объекта, его основные размеры, параметры поставляемых ресурсов или описание ценности функционирования;

— степень разрушения объекта, объем строительного мусора, подлежащего расчистке;

— степень повреждения оборудования, обслуживающих коммуникаций, поражения персонала объекта;

— состав аварийно-ремонтных подразделений, привлекаемых к ведению восста-

новительных работ, их численность, техническое оснащение и уровень подготовки;

— время ведения восстановительных работ по вводу в действие поврежденного оборудования и обслуживающих коммуникаций;

— время доставки требуемого оборудования и материалов, условия и маршрут доставки;

— объем работ, выполненных типовыми звеньями подразделений за одну смену, их техническое оснащение;

— условия ведения работ, прежде всего погодные;

— привлечение обеспечивающих восстановительные работы подразделений, их состав, распределенные функции, средства обеспечения.

Общая методика анализа конкретной ситуации заключается в сопоставимости параметров разрушений объекта параметрам разрушений аналогичных (или примерно аналогичных) объектов, содержащихся в структурированной базе данных. На основе анализа можно будет с рассчитанной вероятностью провести моделирование

сложившейся обстановки для принятия адекватного ей решения.

Важной частью предлагаемой методики является связывание объектов системы защиты N_{mh_w} в едином информационном пространстве [6]. Учитывая их территориальное размещение на местности, такое связывание выполняется в геоинформационных системах как отображение слоя, включающего объекты,

задействованные в мероприятиях защиты I_m .

При этом система анализа получает возможность оценивать расстояния по проложенным маршрутам (дорогам) между объектами и расстояния воздействия опасных факторов.

Предполагаемые действия при оценке ситуации, фактически ответы ИИ, как пункты, предлагаемые в решение на ликвидацию последствий, приведены в таблице.

Таблица

Предлагаемая информация в решение на ликвидацию последствий воздействия опасных факторов

Table

Proposed information in the decision to eliminate the consequences of exposure to hazardous factors

Показатель воздействия Impact indicator	Величина Value	Предлагаемая информация и предложения в решение Suggested information and suggestions in the solution
Количество пострадавших по категориям Number of victims by category	Человек Person	Количество бригад скорой медицинской помощи для их доставки в лечебные учреждения. Их наличие на данный момент. Расположение нештатных формирований гражданской обороны (НФГО), имеющих средства медицинской защиты. Расположение ближайших пунктов временного размещения (ПВР), их вместимость и готовность к приему. Расположение объекта, предоставляющего автотранспорт для обеспечения перевозки, время его прибытия. Определение мест оказания первой помощи. Определение мест посадки на автотранспорт, направляемый в ПВР The number of ambulance crews for transporting patients to medical facilities. Their availability at the moment. Location of non-staffed civil defense units (hereinafter referred to as NSBU) that have medical protection equipment. Location of the nearest temporary accommodation facilities (TAF), their capacity, and readiness for reception. Location of the facility providing transport for transportation, and the time of its arrival. Identification of first aid sites. Determining the locations of vehicles to be sent to the TAF
Объем разрушений (завалов) Volume of destruction (blockages)	Кубические метры Cubic meters	Подразделение $V_m = \{Q_{\text{тех}}; Q_{\text{люди}}\}$, способное выполнить задачу, т. е. имеющее в своем составе соответствующую технику и подготовленных операторов и рабочих. Примерное время выполнения работ на основе показателя y_N: $t_{\text{раб}} = \frac{\text{Объем}_{\text{разр}}}{\text{Объем}_{\text{разр}}}$ A $V_m = \{Q_{\text{тех}}; Q_{\text{люди}}\}$ unit capable of performing the task, i. e., having the appropriate equipment and trained operators and workers. Estimated completion time based on the indicator y_N: $t_{\text{раб}} = \frac{\text{Объем}_{\text{разр}}}{\text{Объем}_{\text{разр}}}$

Окончание таблицы

Показатель воздействия Impact indicator	Величина Value	Предлагаемая информация и предложения в решение Suggested information and suggestions in the solution
Поврежденное оборудование Damaged equipment	Единица оборудования Unit of equipment	Ближайший склад с требуемым оборудованием. Время доставки оборудования. Примерное время выполнения работ на основе показателя y_N The nearest warehouse with the required equipment. Equipment delivery time. Estimated completion time based on the indicator y_N
Обеспечение выполнения работ Damaged equipment	Мероприятие Event	Основывается на системе обеспечения мероприятий защиты $J_m = \{Jm_1, Jm_2, \dots, Jm_h\}$; в том числе оборудование места расположения СиС, обеспечение топливом техники, питание членов НФГО и др. It is based on a system of providing protection measures $J_m = \{Jm_1, Jm_2, \dots, Jm_h\}$. This includes equipping the location of the forces and resources, providing fuel for the equipment, feeding the members of the NSBU, and more

Выводы

В настоящее время органы управления РСЧС и ГО имеют доступ к информационным системам, позволяющим проводить прогнозирование возможной обстановки и ее оценку при воздействии неблагоприятных факторов. При этом данные системы не в полной мере связываются с планами применения СиС по назначению, их базы данных не имеют адаптации к оценке возможностей сил, предназначенных для ликвидации ЧС и минимизации воздействия последствий опасных факторов. Вместе с тем в системе РСЧС в последнее время имеется многочисленный опыт ликвидации последствий инцидентов, причины которых — применение современных средств поражения. Есть

объективные предпосылки формирования базы данных ликвидации их последствий, с анализом действий подразделений и формирований, привлекаемых для ликвидации. Приведенный выше алгоритм работы ИИ можно также отработать при проведении совместных учений и тренировок органов управления и СиС различных объектов.

Внедрение алгоритмов анализа баз данных для оценки возможностей, имеющихся СиС ликвидации последствий, в сравнении с применявшимися в аналогичных ситуациях позволит максимально адекватно оценивать время восстановления системы защиты и иметь потребность для информационной поддержки принятия решения при восстановлении функционирования пораженных объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Богданова Е. М., Матвеев А. В. Классификация методов прогнозирования чрезвычайных ситуаций // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2018. № 4. С. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2018-4-61-70>.
2. Обоснование оптимального варианта принятия решений при управлении силами и средствами, действующих в условиях неопределенности / А. Б. Власов [и др.] // Современные

проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. URL: <https://clck.ru/kXUxS> (дата обращения: 03.08.2026).

3. Месарович Д., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. М., 1978. 312 с.
4. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М., 2010. 192 с.
5. Березин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем. М., 1974. 304 с.
6. Гилек С. А., Ничепорчук В. В. Связывание наборов данных в задачах информационной поддержки управления лесопожарными рисками // Проблемы анализа риска. 2022. Т. 19, № 5. С. 28–39. DOI: 10.32686/1812-5220-2022-19-5-28-39. EDN: RGXTAZ.

REFERENCES

1. Bogdanova E. M., Matveyev A. V. Classification of Methods for Forecasting Emergency Situations // National Security and Strategic Planning. 2018. No. 4. P. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2018-4-61-70>.
2. Justification of the optimal decision-making option in the management of forces and means operating under conditions of uncertainty / A. B. Vlasov [et al.] // Modern problems of science and education. 2015. No. 2-1. URL: <https://clck.ru/kXUxS> (accessed 03.08.2026).
3. Mesarovic D., Takahara Y. General Theory of Systems: Mathematical Foundations. Moscow, 1978. 312 p.
4. Ventzel E. S. Operations Research. Tasks, Principles, and Methodology. Moscow, 2010. 192 p.
5. Berezin E. A. Optimal Resource Allocation and Elements of System Synthesis. Moscow, 1974. 304 p.
6. Gilok S. A., Nicheporchuk V. V. Linking Data Sets in Information Support Tasks for Forest Fire Risk Management // Risk Analysis Issues. 2022. Vol. 19. No. 5. P. 28–39. DOI: 10.32686/1812-5220-2022-19-5-28-39. EDN: RGXTAZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Логинов Валерий Викторович, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры безопасности в чрезвычайных ситуациях Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 1103066; SPIN-код: 4225-9686; e-mail: bazalt@mail.ru

Терентьев Виталий Викторович, канд. с.-х. наук, доцент, начальник кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 449847; SPIN-код: 7500-1113; e-mail: Terentevv@rambler.ru

Зубарев Игорь Александрович, канд. пед. наук, доцент, начальник УНК пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 836075; SPIN-код: 9480-9462; e-mail: zubrigal@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery V. Loginov, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Emergency Safety, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 1103066; SPIN-code: 4225-9686; e-mail: bazalt@mail.ru

Vitaly V. Terentyev, Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor, Head of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment, and Specialized Technical Equipment, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 449847; SPIN-code: 7500-1113; e-mail: Terentevv@rambler.ru

Igor A. Zubarev, Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor, Head of the Educational and Scientific Complex for Firefighting and Emergency Rescue Operations, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 836075; SPIN-code: 9480-9462; e-mail: zubrigal@mail.ru

УДК 614.8:338.24

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ И СОЦИАЛЬНО ПРИЕМЛЕМЫХ УРОВНЕЙ РИСКА

Калганова Наталья Валерьевна, Ильясов Олег Рашитович

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу теории и методологии управления риском чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации с акцентом на обоснование критериев и социально приемлемых уровней риска. Целью работы является развитие научных представлений о риск-ориентированном подходе в сфере обеспечения безопасности и выработка методологических оснований для согласования количественной оценки риска с социальными и управленческими критериями его допустимости. В качестве методов исследования использованы системный и структурно-функциональный анализ, сравнительно-правовой и формально-логический методы, анализ статистических данных о чрезвычайных ситуациях, а также обобщение отечественной и зарубежной научной литературы. В ходе исследования раскрыта эволюция подходов к управлению риском от реагирования к предупреждению, описана роль показателей индивидуального, коллективного и территориального риска в практике государственного управления, выявлены ограничения применения универсальных пороговых значений риска в условиях территориальной и социальной неоднородности Российской Федерации. Сделан вывод о том, что научная новизна исследования состоит в интеграции инженерно-вероятностной оценки риска с социально-экономическими и институциональными критериями его допустимости, что позволяет повысить обоснованность и прозрачность управленческих решений в сфере предупреждения чрезвычайных ситуаций. Полученные результаты могут быть использованы при разработке программ территориальной безопасности, паспортов риска и методик риск-ориентированного планирования.

Ключевые слова: нормирование риска, риск-ориентированный подход, экспертные оценки, многокритериальное ранжирование, критичность инфраструктуры

Для цитирования: Калганова Н. В., Ильясов О. Р. Теория и методология управления риском чрезвычайных ситуаций, обоснование критериев и социально приемлемых уровней риска // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 134–143.

THEORY AND METHODOLOGY OF EMERGENCY RISK MANAGEMENT, JUSTIFICATION OF CRITERIA AND SOCIALLY ACCEPTABLE RISK LEVELS

Natalya V. Kalganova, Oleg R. Ilyasov

Ural State University of Railway Engineering, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This article provides a comprehensive analysis of the theory and methodology of emergency risk management in the Russian Federation, with an emphasis on substantiating criteria and socially acceptable risk levels. The aim of the study is to advance scientific understanding of a risk-based approach to safety and security and to develop methodological foundations for aligning quantitative risk assessment with social and managerial criteria for its acceptability. The research methods utilized include systemic and structural-functional analysis, comparative legal and formal-logical methods, analysis of statistical data on emergency situations, and a summary of domestic and international scientific literature. The study explores the evolution of risk management approaches from response to prevention, describes the role of individual, collective, and territorial risk indicators in public administration practices, and identifies the limitations of applying universal risk thresholds given the territorial and social heterogeneity of the Russian Federation. It concludes that the scientific novelty of this study lies in the integration of engineering-based probabilistic risk assessment with socioeconomic and institutional criteria for risk acceptability, which improves the validity and transparency of management decisions in emergency prevention. The results obtained can be used in the development of territorial security programs, risk passports, and risk-based planning methods.

Keywords: risk normalization, risk-oriented approach, expert assessments, multi-criteria ranking, and infrastructure criticality

For citation: Kalganova N. V., Ilyasov O. R. Theory and methodology of emergency risk management, justification of criteria and socially acceptable risk levels // *Technosphere safety*. 2026. No. 3 (52). P. 134–143.

Введение

Актуальность исследования теории и методологии управления риском чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации обусловлена тем, что современная система обеспечения безопасности сталкивается с одновременным действием разнотипных угроз: природных, техногенных и социально обусловленных, а также с ростом сложности инфраструктур и взаимозависимости территорий. В этих условиях управление риском становится не вспомогательным, а базовым принципом публичного управления: государство и хозяйствующие субъекты вынуждены принимать решения в ситуации неполной определенности, сопоставляя ожидаемые

потери, стоимость превентивных мер и социальную чувствительность к последствиям. Переход от логики реагирования к логике предупреждения требует методологически выверенного нормирования риска, поскольку идея абсолютной безопасности практически недостижима, а реальные управленческие решения неизбежно фиксируют некоторую границу допустимости опасности для общества. В отечественной нормативно-методической базе риск чрезвычайной ситуации трактуется как мера опасности, объединяющая вероятность и последствия, а также вводятся количественные показатели индивидуального и коллективного риска и понятие допустимого риска как риска, обоснованного для социально-экономического развития территории.

Цель исследования состоит в теоретико-методологическом обосновании управления риском чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации и в раскрытии подходов к формированию критериев и социально приемлемых уровней риска как основания для принятия решений в области предупреждения, готовности и реагирования.

Для достижения цели решаются задачи: раскрыть эволюцию риск-ориентированной парадигмы безопасности и место управления риском в публичном управлении; систематизировать методологические элементы управления риском (идентификация опасностей, сценарное моделирование, оценка вероятностей и последствий, ранжирование и выбор мер воздействия на риск); определить роль показателей индивидуального, коллективного и территориального риска в обосновании допустимости; описать механизмы согласования социальной приемлемости риска с экономическими и технологическими возможностями; выявить ограничения отечественной практики нормирования риска и направления ее развития с учетом межведомственных задач и территориальной неоднородности.

Теоретическая значимость исследования определяется тем, что управление риском чрезвычайных ситуаций объединяет несколько научных традиций: теорию надежности и безопасности сложных систем, экономику риска и публичных благ, социологию восприятия опасностей и теорию принятия решений. В рамках этой междисциплинарности формируется понятийный аппарат, позволяющий различать неприемлемый риск, допустимый риск и приемлемый риск, а также выделять промежуточные зоны, где риск может быть условно приемлемым при наличии контроля и программ снижения.

Практическая значимость заключается в применимости риск-ориентированных критериев при территориальном планировании, проектировании и эксплуатации потенциально опасных объектов, формировании паспортов безопасности и планов предупреждения, распределении ресурсов на превентивные мероприятия, а также в выстраивании приоритетов контроля.

Практика показывает, что государственные механизмы все чаще используют категоризацию и ранжирование рисков как управленческий инструмент, когда режим надзора и требования соотносятся с оценкой ожидаемого вреда и негативных последствий. Такой подход закрепляется в подзаконном регулировании отдельных сфер, где критерии отнесения к категориям риска прямо связываются с оценкой ущерба охраняемым законом ценностям и социальным последствиям, что иллюстрирует институционализацию риск-ориентированного управления в государственном контроле.

Степень разработанности темы в Российской Федерации можно охарактеризовать как устойчиво сформированную в части понятийного аппарата, показателей риска и процедур оценки, но продолжающую развиваться в части социального нормирования и межсекторной гармонизации критериев. Имеется корпус работ, где рассматриваются критерии допустимого социального риска при авариях и подходы к нормированию социального риска в контексте чрезвычайных ситуаций и промышленной безопасности. Развивается направление, анализирующее единые критерии допустимого риска на опасных производственных объектах и сопоставляющее российские и зарубежные подходы к нормированию индивидуального и социального риска.

Одновременно сохраняется методологический вызов: обеспечить сопоставимость оценок между территориями и ведомствами, корректно учитывать уязвимость населения и инфраструктуры, избегая формального «галочного» применения показателей без последующего управленческого цикла мер, контроля и переоценки риска.

Материалы и методы

В рамках исследования теории и методологии управления риском чрезвычайных ситуаций и обоснования критериев социально приемлемых уровней риска применим комплекс взаимодополняющих методов, позволяющий связать нормативно-правовую основу, научные подходы и практику управления. Базовым выступает метод системного анализа, поскольку объект исследования представляет собой сложную социально-техническую систему, где риски формируются на стыке природных процессов, технологических режимов, состояния инфраструктуры, организационных решений и поведения населения; системный подход позволяет выделять элементы риск-цикла (предупреждение, готовность, реагирование, восстановление), устанавливать причинно-следственные связи и описывать обратные связи, через которые управленческие меры изменяют параметры риска. Для уточнения понятийного аппарата и построения логически непротиворечивой модели используются методы теоретического обобщения, научной абстракции и классификации, обеспечивающие разграничение категорий опасности, уязвимости, экспозиции, индивидуального и коллективного риска, допустимости и приемлемости риска, а также формирование типологии угроз и сценариев

чрезвычайных ситуаций. Количественная сторона оценки риска обеспечивается методами статистического анализа и вероятностного моделирования: используются описательная статистика, анализ динамики и вариации показателей, оценка частот событий, расчет доверительных интервалов для редких явлений, а также методы корреляционного и регрессионного анализа для проверки гипотез о влиянии факторов уязвимости и защищенности на уровень последствий. Для работы с неполнотой и неоднородностью исходной информации применимы экспертные методы и процедуры многокритериального выбора, включая построение шкал приоритетности мер, ранжирование рисков по сочетанию вероятности и тяжести последствий, формирование матриц риска и оценку чувствительности результатов к изменению исходных предпосылок. В задачах прогнозирования и оценки последствий используются сценарный метод и имитационное моделирование, позволяющие конструировать альтернативные варианты развития чрезвычайной ситуации, оценивать распределение потерь во времени и пространстве и проверять эффективность комплекса мер снижения риска при разных сценариях внешних условий [1].

Результаты исследования и их обсуждение

Теория и методология управления риском чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации в последние годы приобретают статус не частного раздела безопасности, а основы государственно-управленческого мышления о развитии территорий и инфраструктур. Это связано с тем, что характер угроз становится более «системным»: природные опасности проявляются в форме

каскадных эффектов (паводок нарушает транспорт и энергоснабжение, затем ухудшает санитарно-эпидемиологические условия и повышает социальную уязвимость), техногенные риски усиливаются старением фондов и высокой связностью критически важных объектов, а социальные последствия (переселение, утрата имущества, перерывы в занятости, рост тревожности) формируют длительный «хвост» ущерба, который не исчерпывается фазой ликвидации. В этой логике риск рассматривается как интегральная категория, связывающая вероятность и тяжесть последствий, причем управляемой становится не сама опасность (она во многом экзогенна), а уязвимость и экспозиция: кто и что попадает под воздействие, насколько устойчивы системы жизнеобеспечения, какова готовность населения и служб и как устроены контуры предупреждения.

Российская практика демонстрирует, что масштаб задач именно риск-ориентированного управления определяется не отдельными «редкими» катастрофами, а совокупной статистикой чрезвычайных ситуаций, их социальными потерями и территориальной распространенностью. По данным, приводимым в материалах МЧС России [2], число чрезвычайных ситуаций в 2024 г. составило порядка 272 (в 2023 г. — 305), а число погибших — 494 человека, что позволяет фиксировать, с одной стороны, снижение частоты, а с другой — устойчивую социальную значимость последствий даже при «небольшом» количестве событий. В государственном докладе за 2023 г. отдельно отмечалось, что число пострадавших в результате чрезвычайных ситуаций составило 287 595 человек [3], то есть социальная нагрузка определяется не только смертностью,

но и массовостью затрагивания населения, включая утрату жилья, вынужденную эвакуацию и ущерб здоровью. Эти величины методологически важны: они подчеркивают, что критерии допустимости риска в публичном управлении нельзя сводить к «нулевой терпимости» (недостижимо) или к узкому показателю летальности (недостаточно), требуется комплексная система метрик, отражающая и вероятность, и разнообразие последствий [4].

Нормативно-методологическая основа риск-ориентированного подхода в Российской Федерации закрепляется через стандартизацию терминов и процедур оценки риска. В ГОСТ Р 22.2.06—2016 управление риском чрезвычайной ситуации увязывается с разработкой паспортов безопасности критически важных и потенциально опасных объектов, а в качестве рекомендуемых основных показателей выделяются индивидуальный риск, коллективный риск и потенциальный территориальный риск. Существенно, что стандарт закрепляет и категорию допустимого риска чрезвычайной ситуации как риска, который допустим и обоснован для социально-экономического развития рассматриваемой территории, тем самым вводя в рамку оценки не только инженерную, но и социально-экономическую рациональность. В теоретическом плане это означает переход от «абсолютного запрета опасности» к управляемому компромиссу, где безопасность мыслится как результат цикла: идентификация опасностей — оценка риска — выбор мер воздействия — контроль эффективности — переоценка риска.

Для природных угроз (паводки, пожары, опасные метеорологические явления) ключевым является сценарный подход, ко-

торый учитывает сезонность, гидрологические и метеорологические предикторы, пространственную неоднородность и уязвимость застройки. Принципиально важно не ограничиваться «исторической частотой», поскольку изменчивость климата и землепользования смещает вероятностные оценки: Росгидромет в докладе по климату за 2024 г. [5] фиксирует аномалии климатических переменных и описывает опасные гидрометеорологические явления года и тенденции современных изменений климата, что методологически поддерживает необходимость обновления баз сценариев и карт опасностей. Для техногенных рисков сценарии строятся вокруг отказов оборудования, нарушений технологических режимов, человеческого фактора, а также внешних воздействий (например, природный фактор как триггер аварий на сетях или гидротехнических сооружениях). На этом этапе качество сценариев критично: ошибка в сценарной базе приводит к формальному нормированию, когда показатели риска «красиво рассчитаны», но не соответствуют реальным траекториям развития событий [6].

Первый блок — количественная и качественная оценка риска. Количественная оценка включает расчет индивидуального риска (вероятность гибели или ущерба здоровью для индивида в заданных условиях), коллективного риска (ожидаемое число пораженных/пострадавших в популяции) и территориального риска (пространственная характеристика распределения риска). Однако в публичном управлении неизбежно используется и качественная оценка, когда данных недостаточно или неопределенность слишком велика: применяются матрицы риска, экспертные оценки, мно-

гокритериальное ранжирование (тяжесть последствий, управляемость, скорость развития, социальная чувствительность, критичность инфраструктуры). Научная дискуссия в российской литературе подчеркивает, что поиск единых критериев допустимого риска осложнен межотраслевыми различиями и исторически сформировавшимися подходами, поэтому задача смещается от «одной универсальной цифры» к сопоставимым правилам принятия решений и прозрачным порогам, закрепленным в методиках и практике надзора.

Второй блок — воздействие на риск, то есть выбор и реализация мер управления. Классическая «четверка» инструментов (избежание риска, снижение риска, перенос риска, принятие риска) в сфере чрезвычайных ситуаций получает специфическое содержание. Избежание чаще всего реализуется через ограничения землепользования и градостроительные решения в зонах затопления или пожароопасных ландшафтах; снижение — через инженерную защиту, модернизацию сетей, системы мониторинга и раннего оповещения, подготовку населения и служб; перенос — через страхование и механизмы компенсаций, но с учетом морального риска и необходимости стимулировать превентивные меры; принятие — через установление допустимых уровней при условии контроля и планов снижения. Здесь ключевой методологический вопрос: какие уровни риска общество считает приемлемыми и как это «социальное решение» формализуется в критериях [7].

Обоснование критериев и социально приемлемых уровней риска в Российской Федерации является центральной, наиболее сложной частью методологии. Социальная

приемлемость — это не психологическое «привыкание» к опасности, а институционально оформленный баланс между ценностью предотвращения потерь, ресурсными ограничениями и справедливостью распределения риска. В российском контексте социальная приемлемость особенно чувствительна к двум обстоятельствам. Первое — высокая территориальная неоднородность: один и тот же формальный уровень индивидуального риска может восприниматься по-разному в мегаполисе с развитой инфраструктурой и в малом населенном пункте, где один отказ системы жизнеобеспечения приводит к диспропорциональному ущербу. Второе — «наследуемая уязвимость» инфраструктуры и жилья: значительная часть риска формируется не текущими решениями граждан, а исторически сложившейся застройкой и износом фондов, что делает вопросы приемлемости риска этически и политически более сложными [8].

Данные государственного доклада 2024 г. дает конкретные иллюстрации, почему критерии приемлемости нельзя строить только на абстрактных порогах. Масштабные паводки затронули 69 регионов Российской Федерации, где было подтоплено свыше полутора тысяч населенных пунктов, что само по себе указывает на системный характер гидрологических рисков и необходимость территориально дифференцированных мер. В Оренбурге на определенную дату апреля 2024 г. фиксировались тысячи подтопленных домовладений и приусадебных участков (например, 2 326 домовладений и 3 968 участков по данным городских оперативных сообщений), что отражает масштаб экспозиции именно жилой застройки. Дополнительная

конкретика из федеральной повестки показывает, что к концу апреля 2024 г. в Оренбургской области оставались подтопленными 8 865 жилых домов и 14 545 приусадебных участков, то есть последствия сохранялись длительно и требовали значительных ресурсов на восстановление [2]. На уровне управленческой методологии это означает следующее: приемлемость риска должна оцениваться не только по пику события, но и по длительности нарушения нормальной жизнедеятельности, по способности систем восстановления (компенсации, временное размещение, восстановление коммунальной инфраструктуры) работать без потери качества и справедливости [9].

Аналогично, риски природных пожаров иллюстрируют различие между частотой и масштабом последствий. В 2024 г. фиксировалось более 10 тысяч очагов природных пожаров, при этом отдельно подчеркивалось, что не был допущен переход огня на 29 населенных пунктов с населением свыше 56 тысяч человек [2], то есть результат управления риском выражается не только в статистике пожаров, но и в предотвращении перехода угрозы в фазу массового поражения населения. При этом обсуждалось, что при снижении числа пожаров площадь могла возрасти, что характерно для условий высокой пожарной опасности и ограничений доступа к очагам и требует иных критериев эффективности, чем «число пожаров»: важны показатели скорости обнаружения, времени локализации, устойчивости защитных полос, готовности населенных пунктов. Из этого следует важный методологический вывод: социально приемлемый уровень риска должен задаваться не одной метрикой,

а пакетом критериев, который описывает и вероятность, и уязвимость, и управляемость, и ожидаемую длительность социальных последствий [10].

В научной литературе, посвященной управлению рисками и региональной безопасности, последовательно подчеркивается, что критерии приемлемости формируются через принципы и механизмы управления безопасностью, где значение имеют и социальные ожидания, и распределение ответственности между государством, бизнесом и гражданами. Работы о допустимых уровнях социального риска при авариях и о единых критериях допустимого риска на опасных производственных объектах демонстрируют, что перенос зарубежных порогов «в чистом виде» методологически некорректен: необходимо учитывать структуру расселения, состояние инфраструктуры, доступность медицинской помощи, различия в надзорных режимах и доверии к институтам. В этом смысле социальная приемлемость риска в российской практике должна мыслиться как «процедурная» категория: важны не только числовые пороги, но и прозрачность того, как они получены, как пересматриваются, кто участвует в обсуждении, как обеспечивается учет интересов уязвимых групп.

Если переводить это в практико-ориентированную схему, то обоснование критериев и социально приемлемых уровней риска целесообразно строить по многоуровневой модели. На базовом уровне формируются «красные линии» неприемлемого риска, где любая деятельность должна быть запрещена или радикально изменена (например, размещение социальной инфраструктуры в зоне систематического затопления без инженерной защиты и маршрутов эвакуации).

На промежуточном уровне задается условно приемлемый риск: деятельность допустима при наличии обязательных мер снижения, мониторинга, планов реагирования и публичной отчетности по снижению риска; здесь особенно востребованы паспорта безопасности и риск-ориентированные планы мероприятий, поскольку они связывают расчет с управленческой ответственностью. Наконец, на верхнем уровне фиксируется приемлемый риск: риск считается оправданным с социальной, экономической и экологической точки зрения при текущем уровне защищенности и при функционирующей системе контроля. В этой модели «социальная приемлемость» перестает быть лозунгом и становится операционализируемой: любой уровень риска связан с набором управленческих действий, метрик мониторинга и правил пересмотра.

Заключение

Таким образом, российская теория и методология управления риском чрезвычайных ситуаций сегодня развиваются в направлении интеграции инженерной оценки риска, территориального управления и социальной рациональности. Практика 2024 г. с масштабными паводками и напряженной лесопожарной обстановкой показывает, что главная научная и управленческая проблема заключается не в отсутствии данных как таковых, а в необходимости «сшить» данные, сценарии, стандартизированные показатели и социальные критерии в единый управленческий цикл, где риск измеряется сопоставимо, меры выбираются обоснованно, а приемлемость риска объяснима обществу и подтверждаема результатами мониторинга.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кипря А. В., Приходько П. П. Мировой опыт государственного управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2021. № 3 (10). С. 196–199. EDN: VJXFKM.
2. Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2024 году // МЧС России : официальный сайт. URL: <https://clck.ru/eahFx> (дата обращения: 21.02.2026).
3. Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2023 году // МЧС России : официальный сайт. URL: <https://clck.ru/PuKUW> (дата обращения: 21.02.2026).
4. Александров А. А., Ларионов В. И., Суцев С. П. Единая методология анализа риска чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки». 2015. № 1 (58). С. 113–132. EDN: TINHCV.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год / НИУ Росгидромета. М., 2025. 104 с.
6. Жуков И. С., Лисанов М. В., Самусева Е. А. Критерии допустимого социального риска при авариях на опасных производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 5. С. 79–86. EDN: XAEGPE.
7. Цховребов Э. С. О подходах к прогнозированию чрезвычайных ситуаций с экологическими последствиями // Столыпинский вестник. 2024. Т. 6, № 1. EDN: CVIJRZ.
8. Глушков А. П. Алгоритмизация поддержки принятия управленческих решений для обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера на основе данных MODIS // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 100–108. EDN: DAEXBK.
9. Гарелина С. А., Любкин Р. Н. Формирование логики риск-ориентированного планирования поверки средств измерений в МЧС России // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 183–193. EDN: VJVWAZ.
10. Инновационные меры противодействия чрезвычайным ситуациям на предприятиях / Л. М. Пичугин [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 109–120. EDN: RMZYQQ.

REFERENCES

1. Kiprya A. V., Prikhodko P. P. Global experience of state management of the risk of emergencies of technogenic and natural nature // Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement. 2021. No. 3 (10). P. 196–199. EDN: VJXFKM.
2. State report on the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2024 // Ministry of Emergency Situations of Russia : website. URL: <https://clck.ru/eahFx> (accessed 21.02.2026).
3. State report on the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2023 // Ministry of Emergency Situations of Russia : website. URL: <https://clck.ru/PuKUW> (accessed 21.02.2026).

4. Aleksandrov A. A., Larionov V. I., Sushchev S. P. Unified Methodology for Risk Analysis of Man-Made and Natural Emergencies // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences. 2015. No. 1 (58). P. 113–132. EDN: TIHHCV.
5. A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2024 / National Research University of Roshydromet. Moscow, 2025. 104 p.
6. Zhukov I. S., Lisanov M. V., Samuseva E. A. Criteria for Acceptable Social Risk in Accidents at Dangerous Production Facilities // Occupational Safety in Industry. 2020. No. 5. P. 79–86. EDN: XAEGPE.
7. Tskhovrebov E. S. On Approaches to Forecasting Emergencies with Environmental Consequences // Stolypin Bulletin. 2024. Vol. 6. No. 1. EDN: CVIJRZ.
8. Glushkov A. P. Algorithmization of Decision Support for Ensuring Safety in Natural and Man-Made Emergencies Based on MODIS Data // Technosphere Safety. 2026. No. 1 (50). P. 100–108. EDN: DAEXBK.
9. Garelina S. A., Lyubkin R. N. Formation of the Risk-Oriented Planning Logic of Verification of Measuring Instruments in the Russian Ministry of Emergency Situations // Technosphere Safety. 2025. No. 4 (49). P. 183–193. EDN: VJWVAZ.
10. Innovative measures to counter emergency situations at enterprises / L. M. Pichugin [et al.] // Technosphere Safety. 2026. No. 1 (50). P. 109–120. EDN: RMZYQQ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Калганова Наталья Валерьевна, канд. пед. наук, доцент кафедры техносферной безопасности Уральского государственного университета путей сообщения (620034, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66); РИНЦ ID: 890178; ORCID: 0000-0001-9057-0768; SPIN-код: 8652-9962; e-mail: kalganova.natalia@yandex.ru

Ильясов Олег Рашитович, д-р биол. наук, доцент, профессор техносферной безопасности Уральского государственного университета путей сообщения (620034, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66); РИНЦ ID: 331592; ORCID: 0000-0002-8246-9261; SPIN-код: 6029-0574; e-mail: Olyasov@usurt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalya V. Kalganova, Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, Ural State University of Railway Engineering, (66 Kolmogorova St., Ekaterinburg, 620034, Russian Federation); ID RSCI: 890178; ORCID: 0000-0001-9057-0768; SPIN-code: 8652-9962; e-mail: kalganova.natalia@yandex.ru

Oleg R. Ilyasov, Dr. Sci. (Biol.), Associate Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety, Ural State University of Railway Engineering, (66 Kolmogorova St., Ekaterinburg, 620034, Russian Federation); ID RSCI: 331592; ORCID: 0000-0002-8246-9261; SPIN-code: 6029-0574; e-mail: Olyasov@usurt.ru

УДК 629.1

КОНЦЕПЦИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С СОЛНЕЧНЫМ ПИТАНИЕМ ДЛЯ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В ЗОНУ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

Ткаченко Юлия Анатольевна

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

Аннотация. В статье рассматривается концепция автономного робототехнического транспортного средства на батарее солнечных фотогальванических элементов (далее — солнечная панель), предназначенного для доставки полезной нагрузки в зону чрезвычайной ситуации по заранее определенному маршруту. Актуальность работы обусловлена тем, что частота возникновения природных и техногенных катастроф остается на статистически высоком уровне, что предъявляет повышенные требования к эффективности и безопасности логистических операций. Применение подобных роботизированных технологий позволяет минимизировать риски для жизни спасателей и пострадавших, обеспечивая доставку необходимой полезной нагрузки в отдаленные или опасные районы. Формулируются ключевые требования к платформе: обеспечение длительной энергоавтономности, способность преодолевать пересеченную местность и точное следование заданной траектории. Представлена детальная модульная архитектура робототехнического транспортного средства, включающая энергетическую, приводно-двигательную, навигационно-управляющую, грузовую и коммуникационную подсистемы, с акцентом на интеграцию солнечных панелей и аккумуляторной батареи, образующих гибридную энергосистему. В рамках исследования предложена математическая модель системы управления энергией, динамически распределяющей генерируемую солнечной панелью мощность между тяговыми электроприводами, бортовой электроникой и зарядом батареи. На основе этой модели сформулирована задача оптимального управления, целью которой является минимизация совокупных энергозатрат на выполнение задачи при соблюдении строгих ограничений по минимально-допустимому уровню заряда батареи, что гарантирует безотказную работу в условиях переменной солнечной инсоляции. Решение этой задачи направлено на максимизацию операционной деятельности и надежности робототехнического транспортного средства.

Ключевые слова: робототехническое транспортное средство, солнечные элементы, чрезвычайные ситуации, система управления энергией, доставка полезной нагрузки

Для цитирования: Ткаченко Ю. А. Концепция робототехнического транспортного средства с солнечным питанием для доставки грузов в зону чрезвычайной ситуации // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 144–154.

THE CONCEPT OF A SOLAR-POWERED ROBOTIC VEHICLE FOR DELIVERING GOODS TO AN EMERGENCY AREA

Yuliya A. Tkachenko

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article discusses the concept of an autonomous robotic vehicle powered by solar cells, designed to deliver a payload to an emergency zone along a predetermined route. The relevance of the work is due to the growing frequency of natural and man-made disasters, which places increased demands on the efficiency and safety of logistics operations. The use of such robotic technologies makes it possible to minimize the risks to the lives of rescuers and victims, ensuring the delivery of the necessary payload to remote or dangerous areas. The key requirements for the platform are formulated: ensuring long-term energy autonomy, the ability to overcome rough terrain and accurately following a given trajectory. A detailed modular architecture of a robotic vehicle is presented, including energy, drive-propulsion, navigation-control, cargo and communication subsystems, with an emphasis on the integration of solar panels and a battery pack forming a hybrid energy system. As part of the study, a mathematical model of an energy management system is proposed that dynamically distributes the power generated by photovoltaic modules between traction electric drives, on-board electronics and battery charge. Based on this model, the optimal control task is formulated, the purpose of which is to minimize the total energy consumption for the task while observing strict limits on the minimum allowable battery charge level, which guarantees trouble-free operation in conditions of variable solar insolation. The solution to this problem is aimed at maximizing the operational performance and reliability of the robotic vehicle.

Keywords: robotic vehicle, solar cells, emergency situations, energy management system, payload delivery

For citation: Tkachenko Yu. A. The concept of a solar-powered robotic vehicle for delivering goods to an emergency area // *Technosphere safety*. 2026. No. 3 (52). P. 144–154.

Введение

Частота возникновения природных и техногенных катастроф остается на статистически высоком уровне [1], предъявляя повышенные требования к обеспечению эффективности и безопасности транспортно-логистических операций в зоне чрезвычайных ситуаций (ЧС). Применение роботизированных технологий дает возможность минимизировать угрозы здоровью и жизни

не только спасателей, но и пострадавшего населения, обеспечивая своевременную доставку необходимого оборудования, строительных материалов и предметов первой необходимости (далее — полезная нагрузка) в отдаленные и небезопасные районы. Параллельно повышаются ожидания относительно автономности таких устройств, ведь традиционные энергосети часто оказываются поврежденными или уничтоженными в результате чрезвычайной ситуации [2–4].

Перспективным решением становится использование солнечной энергии в качестве основы питания мобильных роботов. Эта технология способствует созданию экологичных и самодостаточных систем, способных длительное время функционировать в отдаленных районах при ограниченном доступе к внешним источникам энергии. Таким образом, возникает задача разработки мобильного роботизированного устройства на базе солнечной панели для транспортировки полезной нагрузки по маршрутам в зоны бедствия.

Целью данного исследования является разработка концептуальной модели роботизированного транспортного средства (РТС), оснащенного солнечной панелью, которое способно самостоятельно доставлять полезную нагрузку в зону ЧС. Важнейшим аспектом в таком случае является изучение технических характеристик и условий эксплуатации, необходимых для функционирования энергетической, навигационной и транспортной подсистем устройства.

Основная часть

Современная практика развития робототехники направлена на повышение мобильности грузовых платформ, используемых в различных ситуациях. Уже созданы специализированные полуавтономные робототехнические устройства, обеспечивающие перевозку тяжелого оборудования (массой до 1 500 кг) по сложной местности, включая участки развалин, мягкую почву и труднопроходимые территории [5, 6]. В таблице приведены характеристики некоторых робототехнических систем, которые могут применяться для доставки полезной нагрузки в условиях ЧС.

Одновременно прогрессирует область робототехники с использованием солнечной энергии. Международные исследования демонстрируют возможности длительного функционирования автономных платформ благодаря применению солнечных панелей и накопителей электроэнергии. Ранее проведенные исследования подтверждают их эффективность для увеличения продолжительности автономной работы и снижения потребности в стационарных источниках питания [7–10].

Однако в существующих решениях для работы РТС в условиях ЧС основное внимание уделяется либо пожаротушению и мониторингу, либо логистике, тогда как задачи доставки полезной нагрузки практически не рассматриваются, что обуславливает потребность в разработке специализированного РТС, объединяющего характеристики мобильной грузовой платформы и систему автономного электроснабжения на основе солнечных панелей. Создаваемое РТС должно обеспечивать эффективную доставку полезной нагрузки в зону ЧС согласно предварительно определенному маршруту. В таком случае основные требования [11] к подобному РТС можно сформулировать следующим образом:

- способен автономно работать продолжительное время за счет комбинации аккумуляторов и солнечных панелей;
- имеет возможность передвижения по сильно пересеченным участкам, включая труднопроходимые грунтовые покрытия, размытый грунт;
- точно следует заданному маршруту посредством спутниковых систем позиционирования, инерциальных навигационных приборов и сенсоров обнаружения препятствий.

Таблица
Характеристики некоторых РТС
Table
Characteristics of some RTAs

Модель/прототип Model/prototype	Применение Application	Грузоподъемность, кг Load capacity, kg	Источник энергии Energy source	Автономия, ч Autonomy, h	Навигация Navigation
Робот для ликвидации последствий стихийных бедствий ROMATRIS (Германия) Robotfor disaster relief ROMATRIS (Germany)	Доставка грузов Cargo delivery	До 150 Up to	Li-ion аккумуляторы Li-ion batteries	4–6	SNSS, LiDAR, следование за оператором following the operator
Автономная мобильная платформа KUKA AMR KMP 1500 (Германия) Autonomous mobile platform KUKA AMR KMP 1500 (Germany)	Перемещение грузов Cargo movement	До 1 500 Up to	Li-ion аккумуляторы Li-ion batteries	8	SLAM, LiDAR, QR-коды QR codes
Автономный мобильный робот Robotize GoPal (Дания) Autonomous mobile robot Robotize GoPal (Denmark)	Перемещение грузов Cargo movement	До 1 200 Up to	LiFePO4 аккумуляторы LiFePO4 batteries	До 8 Up to	LiDAR, камеры cameras
Грузовой робот AgileX Bunker (Китай) Cargo robot AgileX Bunker (China)	Транспортировка грузов Cargo movement	До 70 Up to	Li-ion аккумуляторы Li-ion batteries	До 6 Up to	LiDAR, камеры cameras

Предлагаемая архитектура РТС включает в себя следующие основные подсистемы: энергетическую, приводно-двигательную, навигационную, управляющую, грузовую и коммуникационную.

Энергетическая подсистема сочетает солнечные панели, размещенные на откидных секциях, с аккумуляторной батареей, выполняющей роль накопителя энергии и обеспечивающей работу в ночное время и при низкой освещенности. Для оптимизации баланса мощности применяется система управления энергией, распределяющая потоки между тяговыми электроприводами, бортовой электроникой и зарядкой аккумуляторов в зависимости от текущей освещенности и профиля движения.

Система управления энергией (СУЭ) предназначена для оптимизации распределения мощности солнечных панелей $P_s(t)$ между тяговыми электроприводами, бортовой электроникой и зарядкой аккумуляторов в зависимости от текущей освещенности $I(t)$, профиля движения и состояния аккумулятора $SOC(t)$. Мощность солнечных панелей $P_s(t)$ рассматривается как функция времени, так как в ходе выполнения задач изменяются условия освещенности, а также ориентация и положение РТС относительно источника излучения.

Общая мощность солнечных панелей распределяется по направлениям (1):

$$P_s(t) = P_d(t) + P_e(t) + P_3(t) + P_l(t), \quad (1)$$

где:

$P_d(t)$ — мощность тяговых приводов, Вт;

$P_e(t)$ — мощность бортовой электроники, Вт;

$P_3(t)$ — мощность зарядки аккумуляторов, Вт;

$P_l(t)$ — потери в преобразователях (5–10 %), Вт.

Выработка мощности солнечных панелей зависит от освещенности и угла наклона (2):

$$P_s(t) = \eta_p A I(t) \eta_s \cos(\theta(t)), \quad (2)$$

где:

η_p — КПД панели (0,18–0,25);

A — площадь панелей, м²;

$I(t)$ — освещенность (0–1 000 Вт/м²);

η_s — КПД системы (0,85–0,95);

$\theta(t)$ — угол падения солнечных лучей, угловые градусы.

Мощность тяговых приводов зависит от профиля движения и грузоподъемности (3):

$$P_d(t) = \frac{F_{\Sigma}(t) \cdot v(SOC(t))}{\eta_s} = \frac{(m_r + m_c)g(f + \sin \alpha(t))v(SOC(t))}{\eta_s}, \quad (3)$$

где:

$F_{\Sigma}(t)$ — суммарная сила сопротивления движению, Н;

$v(SOC(t))$ — скорость (адаптируется по состоянию аккумулятора $SOC(t)$), м/с;

$SOC(t)$ — доля заряда аккумулятора, безразмерная величина;

m_r — масса РТС, кг;

m_c — масса полезной нагрузки, кг;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

f — коэффициент сцепления движителя с опорной поверхностью;

$\alpha(t)$ — продольный угол наклона опорной поверхности, угловые градусы.

Адаптацию скорости по энергорезерву можно представить в виде простого «регулятора экономии» скорости в зависимости от заряда аккумуляторной батареи (4):

$$v(SOC(t)) = v_{nom} \min\left(1, \frac{SOC(t) - SOC_{min}}{SOC_{nom} - SOC_{min}}\right), \quad (4)$$

где:

v_{nom} — номинальная максимальная скорость движения (при достаточном заряде батареи SOC_{nom});

SOC_{min} — доля минимально допустимого заряда аккумуляторной батареи;

SOC_{nom} — доля достаточного уровня заряда, при котором РТС способно выполнять заданные функции (доля полного заряда).

Алгоритм приоритизации выработанной энергии солнечными панелями можно разбить на несколько шагов:

1. Обеспечение энергией жизненно важной электроники (контроллер, датчики, связь) $P_e^{\min}$.

2. Проверка достаточности мощности. На этом шаге оценивается текущая мощность, которую вырабатывают солнечные панели $P_s(t)$, если она больше, чем потребность электроники $P_e(t)$, то излишек ($P_r = P_s(t) - P_e(t)$) идет на дальнейшее распределение (заряд аккумуляторной батареи и движение). При $P_s(t) \leq P_e(t)$ вся мощность, выработанная солнечными панелями, направляется на электронику, движение осуществляется за счет заряда аккумуляторной батареи.

3. Оценка заряда аккумуляторной батареи. Если текущий заряд ниже целевого уровня ($SOC(t) < SOC_{цв}$), то часть оставшейся мощности направляется на заряд батареи $P_3(t) = \min(P_r, P_3^{\max})$. Целевой уровень заряда — это заданное проектировщиком пороговое значение уровня заряда аккумулятора (доля от 0 до 1), ниже которого СУЭ рассма-

тривает аккумулятор как «недозаряженный» и стремится увеличить $SOC(t)$ за счет перераспределения мощности солнечных панелей. Причем на заряд направляется оставшаяся мощность P_r , но не более, чем максимальная допустимая мощность заряда батареи $P_3^{\max}$. После этого определяется, сколько мощности можно направить на движение РТС из остатка $P_r = P_r - P_3(t)$. Если батарея заряжена до необходимого уровня, ($SOC(t) < SOC_{цв}$), то выработанная солнечными панелями энергия не расходуется на заряд ($P_3(t) = 0$) и направляется на движение.

4. Оценка энергии, необходимой на движение. На этом шаге определяется мощность, направляемая на движение $P_d(t) = \min(P_r, P_d^r(t))$. Для этого определяется требуемая мощность на движение $P_d^r(t)$ (по массе, уклону, необходимой скорости и т. п.). Причем на привод подается не больше, чем позволяет остаток P_r . Если остаток меньше, чем необходимо, РТС вынуждено снижать скорость (тягу) или добирать недостающее из аккумуляторной батареи.

Формализованная схема распределения мощности может быть представлена следующими отношениями (5):

$$\begin{cases} P_e(t) = \min(0, P_s(t) - P_e(t)) \\ P_3(t) = \begin{cases} \min(P_r, P_3^{\max}), & SOC(t) < SOC_{цв} \\ 0, & SOC(t) \geq SOC_{цв} \end{cases} \\ P_d(t) = \min(P_r, P_d^r(t)). \end{cases} \quad (5)$$

Динамика аккумулятора, показывающая изменение уровня заряда, зависит от времени, и если представить баланс энергии батареи в следующем виде (6):

$$\frac{dE_{\text{АКБ}}(t)}{dt} = P_{3/p}(t), \quad (6)$$

где:

$E_{\text{АКБ}}(t)$ — запас энергии в аккумуляторной батарее;

$P_{3/p}(t)$ — результирующая мощность, идущая в батарею (если положительна) или из нее (если отрицательна) (7)

$$P_{3/p}(t) = P_s(t) - P_n(t), \quad (7)$$

где $P_n(t)$ — общая мощность потребителей в данный момент времени (8)

$$P_n(t) = P_d(t) + P_e(t) + P_l(t), \quad (8)$$

то можно определить состояние аккумуляторной батареи в следующем виде (9):

$$SOC(t) = \frac{E_{AKB}(t)}{C_{AKB}}, \quad (9)$$

где C_{AKB} — номинальная емкость батареи, Ач, тогда (10):

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{1}{C_{AKB}} \cdot \frac{dE_{AKB}(t)}{dt} = \frac{P_s(t)}{C_{AKB}} = \frac{P_s(t) - (P_e(t) + P_d(t) + P_l(t))}{C_{AKB}}. \quad (10)$$

Если рассматривать текущее состояние аккумуляторной батареи в процентном соотношении к номинальной емкости, то получим (11):

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{100}{C_{AKB}} \cdot (P_s(t) - P_e(t) - P_d(t) - P_l(t)). \quad (11)$$

Рассмотрев динамику перераспределения энергии, выработанной солнечными панелями, целесообразно определить оптимальное распределение энергозатрат на выполнение задачи, что потребует найти

такие скорость движения РТС по маршруту $v(SOC(t))$ и мощность заряда батареи от солнечных панелей $P_3(t)$, рассматриваемые как функции управления, при которых минимизируется целевой функционал вида (12):

$$J = \int_0^T [\omega_1 P_n + \omega_2 (T - t_{\text{факт}}) + \omega_3 (1 - SOC(t))] dt, \quad (12)$$

где:

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — весовые коэффициенты;

T — требуемое время для выполнения задачи;

$t_{\text{факт}}$ — фактическое время прибытия РТС в конечную точку маршрута при ограничениях (13):

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{100}{C_{AKB}} \cdot (P_s(t) - P_e(t) - P_d(t) - P_l(t)), & t \in [0, T] \\ P_n(t) = P_e(t) + P_d(t) + P_l(t), \\ SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max}(t), & \forall t \in [0, T] \\ P_d(t) = \frac{(m_r + m_c)g(f + \sin \alpha(t))v(SOC(t))}{\eta_s} \\ 0 \leq v(t) \leq v_{\text{ном}} \min \left(1, \frac{SOC(t) - SOC_{\min}}{SOC_{\text{ном}} - SOC_{\min}} \right), & \forall t \in [0, T] \\ \frac{ds(t)}{dt} = v(t), & s(0) = 0, s(T) = L \\ SOC(0) = SOC_{\text{цп}}, \end{array} \right. \quad (13)$$

где L — длина маршрута (м).

Система уравнений (13) описывает совокупную динамику уровня заряда аккумуля

тора и движения РТС вдоль маршрута. Первое уравнение задает изменение уровня заряда аккумулятора в соответствии

с балансом мощности между солнечными панелями, потребителями, потерями и емкостью аккумулятора. Второе соотношение определяет суммарную потребляемую мощность. Третье выражение задает допустимый диапазон значений уровня заряда аккумулятора. Четвертое уравнение описывает тяговую мощность как функцию в зависимости от массы РТС и груза, уклона пути и текущей скорости. Далее задаются ограничения на скорость движения, учитывающие энергетическое состояние аккумулятора, кинематическое уравнение движения вдоль маршрута и начальное условие уровня заряда аккумулятора.

Уравнения (1)–(3), (5)–(8) основаны на типовых моделях баланса мощности и тяговой динамики мобильных электрических транспортных средств и автономных роботов [7–10].

Заключение

Таким образом, модель обеспечивает оптимальное распределение ограниченной мощности солнечных панелей, продлевая автономию РТС и адаптируя режимы движения к текущим энергетическим условиям.

Приводно-двигательная система может быть реализована в гусеничном или колесном исполнении с независимыми электрическими мотор-колесами или мотор-редукторами, обеспечивающими достаточную тягу для преодоления уклонов и препятствий при сохранении энергоэффективности. Навигационно-управляющая подсистема включает модуль спутниковой навигации, инерциальные датчики, одометрию, а также лазерные или ультразвуковые дальнометры для обнаружения препятствий и коррекции маршрута. Коммуникационная

подсистема обеспечивает обмен данными с пунктом управления и возможность переключения режимов работы (автономный, полуавтономный, телеуправление).

Использование солнечных элементов в составе энергетической подсистемы РТС позволяет уменьшить зависимость от стационарных зарядных станций и транспортируемого топлива, что особенно актуально в условиях разрушенной инфраструктуры [12]. С учетом изложенных ограничений целесообразно рассматривать солнечные панели на свободных поверхностях РТС не столько как основной источник тяговой мощности, сколько как автономную подсистему питания маломощных, но критически важных потребителей. В частности, солнечная подсистема может быть выделена в независимую ветвь электроснабжения, обеспечивающую работу резервного канала связи, подсистемы передачи телеметрии и координат, а также аварийного сигнала SOS в случае потери подвижности РТС (глубокий разряд аккумулятора, забуксовывание, механическое повреждение и т. п.). При таком подходе даже при полном отказе штатной энергетической системы солнечные панели сохраняют свою функциональную ценность, обеспечивая возможность обнаружения и эвакуации РТС, а также мониторинга в зоне ЧС.

Таким образом, на современном этапе развития фотоэлектрических технологий использование солнечных панелей в составе РТС для полноценного обеспечения тяговой потребности в условиях умеренных и северных широт следует считать перспективным направлением, реализуемость которого ограничена действующим уровнем КПД и удельной мощностью панелей. В ближайшей перспективе более практичным представляется использование солнечной подсистемы как

вспомогательного, в том числе аварийного, источника питания бортовых систем связи и мониторинга. При дальнейшем росте эф-

фективности солнечных панелей и снижения их массы доля солнечной энергии в балансе РТС может быть существенно увеличена.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Статистический анализ чрезвычайных ситуаций природного характера в мире и на территории Российской Федерации / Д. С. Королев [и др.] // Техносферная безопасность. 2023. № 3 (40). С. 131–138. EDN: LYFQBM.
2. Винтер М. С., Волов И. А., Махонькин Е. Д. Роботы-спасатели в современном мире // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики, в 3 т. Красноярск, 2023. Т. 2. С. 779–781. EDN: PJTMUF.
3. Галимова К. Р. Роботизированные решения для экстренных ситуаций // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 108-10. С. 24–27. DOI: 10.18411/trnio-04-2024-529. EDN: PNSRYV.
4. Дмитриев С. А. Алгоритм координатного управления робототехническими комплексами в чрезвычайных ситуациях с использованием математической модели // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 23–33. EDN: WPXLBM.
5. Mathis Godard. Bunker Pro mobile robot: an efficient transport system to carry heavy loads // Génération Robots : blog. URL: <https://clck.su/shzVz> (дата обращения: 01.02.2026).
6. Inспенet. Semi-Autonomous Robot with AI Improves Logistics in Disaster Areas // Inспенet. Electronic data. United States, 2023. URL: <https://clck.su/MEfby> (дата обращения: 01.02.2026).
7. Solar-Powered Robotic Transport System for Emergency Operations in Natural Calamities / V. Chandra [et al.] // International Journal of Electrical Engineering and Technology. 2024. No. 11 (3). P. 555–564. URL: <https://clck.su/GnbMv> (дата обращения: 01.02.2026).
8. Smart Cities Concepts and Applications: A Review on Urban Sustainability / M. S. Mahdavejad [et al.] // International Journal of Energy Electronics and Systems. 2021. No. 10 (1). P. 1–18. URL: <https://clck.su/yfxPj> (дата обращения: 01.02.2026).
9. Smart Renewable Robotics: Development and Testing of a Solar-Powered Rover / V. Sibiraj [et al.] // Journal of Science Technology and Research (JSTAR). 2015. Vol. 6. Iss. 1. P. 1–14. URL: <https://clck.su/OMvxD> (дата обращения: 01.02.2026).
10. Design and Fabrication of Solar Car for Students Project / V. B. Shinde [et al.] // International Journal of Mechanical Research and Solution Engineering Technology. 2021. No. 1 (3). P. 1–6. URL: <https://clck.su/ukjBM> (дата обращения: 01.02.2026).
11. Логинов В. В., Вишняков А. В., Зубарев И. А. Оценка образцов робототехнических комплексов пожаротушения методом анализа иерархий // Техносферная безопасность. 2023. № 2 (39). С. 90–100. EDN: PQCQBC.
12. Кирпичникова И. М., Махсумов И. Б. Выбор электрооборудования автономной фотоэлектрической системы с использованием программного обеспечения PVsyst // Вестник

ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2020. № 2. URL: <https://clck.ru/Tefwp> (дата обращения: 01.02.2026).

REFERENCES

1. Statistical Analysis of Natural Emergencies in the World and in the Russian Federation / D. S. Korolev [et al.] // *Technosphere Safety*. 2023. No. 3(40). P. 131–138.
2. Winter M. S., Volov I. A., Makhonkin E. D. Rescue Robots in the Modern World // *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics : Collection of Materials of the IX International Scientific and Practical Conference Dedicated to Cosmonautics Day*. In 3 volumes. Krasnoyarsk, 2023. Vol. 2. P. 779–781.
3. Galimova K. R. Robotic Solutions for Emergency Situations // *Trends in Science and Education Development*. 2024. No. 108-10. P. 24–27. DOI: 10.18411/trnio-04-2024-529.
4. Dmitriev S. A. Algorithm for Coordinate Control of Robotic Systems in Emergency Situations Using a Mathematical Model // *Technosphere Safety*. 2024. No. 4 (45). P. 23–33.
5. Mathis Godard. Bunker Pro mobile robot: an efficient transport system to carry heavy loads // *Génération Robots : blog*. URL: <https://clck.ru/shzVz> (accessed 01.02.2026).
6. Inспенet. Semi-Autonomous Robot with AI Improves Logistics in Disaster Areas // *Inспенet. Electronic data*. United States, 2023. URL: <https://clck.ru/MEfby> (accessed 01.02.2026).
7. Solar-Powered Robotic Transport System for Emergency Operations in Natural Calamities / V. Chandra [et al.] // *International Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2024. No. 11 (3). P. 555–564. URL: <https://clck.ru/GnbMv> (accessed 01.02.2026).
8. Smart Cities Concepts and Applications: A Review on Urban Sustainability / M. S. Mahdavinnejad [et al.] // *International Journal of Energy Electronics and Systems*. 2021. No. 10 (1). P. 1–18. URL: <https://clck.ru/yfxPj> (accessed 01.02.2026).
9. Smart Renewable Robotics: Development and Testing of a Solar-Powered Rover / V. Sibiraj [et al.] // *Journal of Science Technology and Research (JSTAR)*. 2015. Vol. 6. Iss. 1. P. 1–14. URL: <https://clck.ru/OMvxD> (accessed 01.02.2026).
10. Design and Fabrication of Solar Car for Students Project / V. B. Shinde [et al.] // *International Journal of Mechanical Research and Solution Engineering Technology*. 2021. No. 1 (3). P. 1–6. URL: <https://clck.ru/ukjBM> (accessed 01.02.2026).
11. Loginov V. V., Vishnyakov A. V., Zubarev I. A. Evaluation of Samples of Robotic Fire-Fighting Complexes by the Hierarchy Analysis Method // *Technosphere Safety*. 2023. No. 2 (39). P. 90–100.
12. Kirpichnikova I. M., Makhsumov I. B. Selection of Electrical Equipment for an Autonomous Photovoltaic System Using the PVsyst Software // *Bulletin of the South Ural State University. Series Energy*. 2020. No. 2. URL: <https://clck.ru/Tefwp> (accessed 01.02.2026).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ткаченко Юлия Анатольевна, канд. техн. наук, доцент кафедры спасательных робототехнических систем Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация,

г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); РИНЦ ID: 1100141, ORCID: 0009-0003-2559-3391;
e-mail: yu.tkachenko@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuliya A. Tkachenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department Rescue Robotic Systems, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); ID RSCI: 1100141; ORCID: 0009-0003-2559-3391; e-mail: yu.tkachenko@agz.50.mchs.gov.ru

УДК 37:614.8:632.126

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ ПОДГОТОВКИ НАСЕЛЕНИЯ К ДЕЙСТВИЯМ ПРИ УГРОЗЕ И ВОЗНИКНОВЕНИИ СЕЙСМОСОБЫТИЙ

Сергеев Иван Юрьевич, Батуро Алексей Николаевич, Жернаков Дмитрий Владимирович,
Николаев Глеб Александрович, Амерханов Тимур Русланович

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Российская Федерация

Аннотация. В статье проведен анализ проблемной ситуации, связанной с отсутствием в настоящее время унифицированных требований и рекомендаций для субъектов Российской Федерации и организаций по обучению населения, методическому сопровождению работодателями действий своих сотрудников, разработке порядка и алгоритма действий персонала объектов инфраструктуры при угрозе и возникновении сейсмособытий. Результаты анализа нормативно-правовых актов, организационных и планирующих документов подтвердили наличие обозначенной проблемной ситуации. Для ее разрешения предлагается структура нового проекта методических рекомендаций, состоящая из трех разделов, а также приводится аннотация каждого раздела. По результатам проведенной работы на основе рассмотренного примера сделан вывод, что деструктивные факторы, связанные с особенностями развития чрезвычайных ситуаций с учетом их вида и вторичных рисков, являются существенными и должны учитываться при организации подготовки населения. В связи с этим разработка унифицированных методических требований и рекомендаций по подготовке населения к действиям в условиях определенных видов и рисков чрезвычайных ситуаций, в том числе при угрозе и возникновении сейсмособытий, с учетом обозначенных факторов представляет собой новое направление научных и прикладных исследований, обладающее высокой актуальностью и требующее дальнейшего совершенствования существующих научно-методических подходов.

Ключевые слова: землетрясение, цунами, сейсмособытие, обучение населения, подготовка населения, методические рекомендации

Для цитирования: Анализ проблемной ситуации организации подготовки населения к действиям при угрозе и возникновении сейсмособытий / И. Ю. Сергеев [и др.] // Техноферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 155–165.

ANALYSIS OF THE PROBLEMATIC SITUATION OF ORGANIZING THE PREPARATION OF THE POPULATION FOR ACTIONS IN THE EVENT OF A THREAT AND OCCURRENCE OF SEISMIC EVENTS

Ivan Yu. Sergeev, Alexey N. Baturo, Dmitry V. Zhernakov, Gleb A. Nikolaev, Timur R. Amerkhanov
Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation

Abstract. The article analyzes the problematic situation associated with the current lack of unified requirements and recommendations for the subjects of the Russian Federation and organizations for public education, methodological support by employers for the actions of their employees, and the development of an order and algorithm for the actions of infrastructure personnel in the event of a threat and occurrence of seismic events. The results of the analysis of regulatory legal acts, organizational and planning documents confirmed the existence of the identified problematic situation. To resolve it, the structure of a new draft of methodological recommendations is proposed, consisting of three sections, and an abstract of each section is provided. Based on the results of the work carried out, based on the considered example, it was concluded that the destructive factors associated with the peculiarities of the development of emergency situations, taking into account their type and secondary risks, are significant and should be taken into account when organizing public training. In this regard, the development of unified methodological requirements and recommendations for preparing the population for actions in certain types and risks of emergency situations, including the threat and occurrence of seismic events, taking into account these factors, is a new area of scientific and applied research that is highly relevant and requires further improvement of existing scientific and methodological approaches.

Keywords: earthquake, tsunami, seismic event, public education, public training, methodological recommendations

For citation: Analysis of the problematic situation of organizing the preparation of the population for actions in the event of a threat and occurrence of seismic events / I. Yu. Sergeev [et al.] // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 155–165.

Введение

На заседании Правительственной комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности (12.11.2025) заместителем Председателя Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации И. А. Яровой были обозначены следующие проблемные вопросы [1]:

- отсутствие комплексной федеральной целевой программы жизнедеятельности сейсмоопасных территорий Российской Федерации;

- необходимость совершенствования эффективности координации мероприятий по сейсмобезопасности;

- отсутствие унифицированных методических требований по подготовке населения к действиям при угрозе и возникновении сейсмособытий;

- отсутствие федеральных унифицированных правил, требований и рекомендаций, направленных на предупреждение и минимизацию последствий сейсмособытий;

- необходимость разработки и внедрения региональных образовательных программ по вопросам реагирования при угрозе и возникновении землетрясений.

Таким образом, актуальность темы статьи обусловлена необходимостью реализации соответствующих задач, поставленных МЧС России по результатам заседания [1], одной из которых является разработка и утверждение

унифицированных методических требований и рекомендаций для субъектов Российской Федерации и организаций по обучению населения и работников действиям при угрозе и возникновении сейсмособытий.

В целях реализации поручения Правительственной комиссии в настоящее время в ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» во взаимодействии с Департаментом гражданской обороны и защиты населения МЧС России проводится соответствующая совместная научно-практическая работа.

Результаты и их обсуждение

По результатам проведенного анализа нормативно-правовых актов, организационных и планирующих документов подтверждается наличие обозначенной проблемной ситуации, обусловленной отсутствием в настоящее время в Российской Федерации унифицированных методических требований и рекомендаций.

Предлагаемая структура нового проекта методических рекомендаций включает в себя три раздела (рис. 1) и приложения.



Рис. 1. Структура проекта методических рекомендаций

Fig. 1. The structure of the draft guidelines

В первом разделе сформулированы рекомендации органам власти и организациям по использованию различных форм и методов обучения населения.

В подразделе 1.1 органам власти и организациям рекомендуется:

- использовать три формы обучения действиям при угрозе и возникновении сейсмособытий: индивидуальную форму обучения (самостоятельная подготовка, изучение инструкций, методических руководств, использование цифровых ресурсов и т. д.); групповую форму обучения (уроки, инструктажи, беседы, учения, тренировки и т. д.); массовую форму обучения (всероссийские

открытые уроки, средства массовой информации, социальные сети, конкурсы, викторины и т. д.);

- использовать следующие методы обучения населения действиям при угрозе и возникновении сейсмособытий: словесные методы, наглядные методы, практические методы, интерактивные методы, метод проблемного обучения, заключающийся в постановке задач, направленных на самостоятельный поиск решений;

- разрабатывать и внедрять новые формы, программы и методы подготовки к действиям при угрозе и возникновении сейсмособытий с использованием современных

технических средств обучения, информационных технологий и тренажеров [2].

В подразделе 1.2 органам власти и организациям рекомендуется осуществлять обучение в рамках существующей в Российской Федерации единой системы подготовки населения в области гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций на основе существующих организационно-методических указаний МЧС России, в частности [2].

В подразделе 1.3 органам власти и организациям рекомендуется проводить анализ и оценку результатов обучения населения действиям при угрозе и возникновении сейсмособытий по итогам завершения очередного периода обучения.

Целевым показателем результатов обучения целесообразно выбирать охват населения и работников любыми формами и методами с учетом оценки их эффективности. Для количественной оценки результатов обучения предложена соответствующая методика на основе экспертного подхода.

Второй раздел включает четыре подраздела.

В подразделе 2.1 приведены рекомендации по разработке сценариев возникновения сейсмособытий на территории, находящейся в зоне ответственности организации.

Существующие методики [3] на основе оперативной оценки интенсивности землетрясения позволяют прогнозировать: возможные людские потери, разрушения зданий и инфраструктуры в зависимости от исходных данных, характеризующих устойчивость объектов с учетом особенностей строительства, наличия антисейсмической защиты и ряда других факторов.

В подразделе 2.2 разработаны рекомендации по организации и проведению

инструктажей. Руководителям организаций рекомендуется:

- включать соответствующие вопросы по практическим действиям работников с учетом различных сценариев развития обстановки на территории в зоне ответственности, возможных вариантов местоположения работников в момент воздействия и других связанных с этим деструктивных факторов;
- использовать наиболее эффективные формы обучения исходя из характерных особенностей деятельности организации;
- устанавливать регулярную периодичность проведения инструктажей.

В подразделе 2.3 разработаны рекомендации по созданию и подготовке нештатных формирований из числа сотрудников организации.

Органам власти и организациям предлагается включать соответствующие вопросы в программу курсового обучения личного состава нештатных формирований (спасательных служб [4], НАСФ [5], НФГО [6]), а также других реализуемых форм привлечения общественных, добровольческих и волонтерских объединений.

В подразделе 2.4 разработаны рекомендации по проведению оперативной подготовки сотрудников организации.

Практическую подготовку в организациях целесообразно проводить в форме учений и тренировок с проверкой технических систем оповещения и управления эвакуацией, а также с целью отработки алгоритмов доведения речевой информации в случае отказа действующих технических систем.

В *третьем разделе* описаны рекомендации по разработке порядка и алгоритмов действий персонала объектов транспортной, производственной, социально значимой,

энергетической и жилищно-коммунальной инфраструктуры.

Руководителям объектов инфраструктуры рекомендуется организовать разработку и утверждение соответствующих локальных распорядительных документов с учетом

характерных особенностей деятельности организации.

Для этого может быть использована типовая структура, дополняемая с учетом характерных технических, производственных и других особенностей (рис. 2).

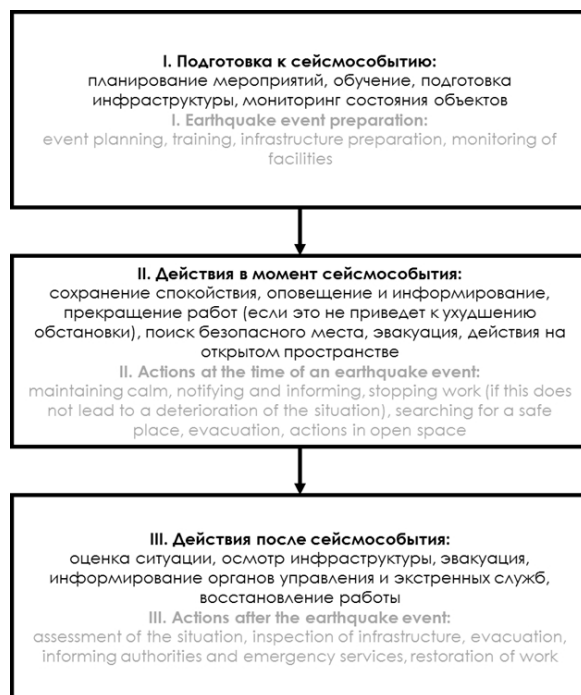


Рис. 2. Типовой порядок действий персонала объектов инфраструктуры

Fig. 2. Standard procedure for the personnel of infrastructure facilities

При этом необходимо учитывать факторы, связанные с особенностями возможного психологического состояния и поведения персонала в условиях воздействия землетрясений.

В подразделе 3.1 приведены рекомендации по разработке порядка и алгоритма действий персонала объектов производственной инфраструктуры.

Руководителям объектов производственной инфраструктуры рекомендуется организовать разработку и утверждение порядка и алгоритма действий персонала при угрозе и возникновении сейсмособытий с учетом характерных особенностей деятельности организации.

Подраздел 3.2 содержит рекомендации по разработке порядка и алгоритма действий персонала объектов социально значимой инфраструктуры.

Руководителям объектов социально значимой инфраструктуры рекомендуется организовать разработку и утверждение порядка и алгоритма действий персонала при угрозе и возникновении сейсмособытий с учетом характерных особенностей деятельности организации.

В подразделе 3.3 приведены рекомендации по разработке порядка и алгоритма действий персонала объектов энергетической и жилищно-коммунальной инфраструктуры.

Руководителям объектов энергетической и жилищно-коммунальной инфраструктуры рекомендуется организовать разработку и утверждение порядка и алгоритма действий персонала при угрозе и возникновении сейсмособытий с учетом характерных особенностей деятельности организации.

В подразделе 3.4 приведены рекомендации по разработке порядка и алгоритма действий персонала объектов транспортной инфраструктуры.

Руководителям объектов транспортной инфраструктуры рекомендуется организовать разработку и утверждение порядка и алгоритма действий персонала при угрозе и возникновении сейсмособытий с учетом характерных особенностей деятельности организации.

Проект методических рекомендаций также содержит четыре приложения.

В Приложении А.1 систематизирован и показан положительный практический опыт по обучению населения действиям при угрозе и возникновении сейсмособытий в субъектах Российской Федерации.

В целях сбора и обобщения накопленного положительного опыта были направлены соответствующие письма с запросом в территориальные органы МЧС России, образовательные и научные организации, организована работа во взаимодействии с региональными учебно-методическими центрами, муниципальными учебно-консультационными пунктами, потенциально опасными объектами, социально значимыми объектами, объектами транспортной инфраструктуры, медицинскими и другими учреждениями.

В Приложении А.2 систематизирован и показан положительный практический

опыт по организации методического сопровождения организациями (работодателями) действий своих сотрудников при угрозе и возникновении сейсмособытий в субъектах Российской Федерации.

В Приложении А.3 систематизирован и показан положительный практический опыт по разработке порядка и алгоритма действий персонала объектов инфраструктуры при угрозе и возникновении сейсмособытий в субъектах Российской Федерации.

В Приложении А.4 на основе письма МЧС России от 19.03.2026 № 43-1511-11 разработан типовой порядок действий персонала объектов инфраструктуры, дополняемый с учетом характерных технических, производственных и других особенностей.

По результатам проведенного анализа известных научно-методических подходов по подготовке населения к действиям при сейсмособытиях сделаны следующие выводы.

При организации подготовки населения и работников необходимо учитывать, что землетрясения являются наиболее опасным видом чрезвычайных ситуаций с наибольшим количеством вторичных рисков, практически не поддающихся краткосрочному и среднесрочному прогнозированию. В XX–XXI вв. последствия землетрясений и цунами стали причиной гибели более 2 млн человек. На территории Российской Федерации к сейсмоопасным регионам относятся: Дальний Восток, Юг Сибири, Кавказ и другие территории [7].

Стоит отметить, что проблеме организации обучения населения и работников действиям при угрозе и возникновении сейсмособытий посвящено значительное количество научных трудов, в т. ч. [8–19].

Заслуживает особого внимания и детального изучения опыт Японии и других стран, который описан в ряде источников, например, [8–10]. Начиная с 2011 г. учреждения Японии проводят сейсмические тренировки как минимум дважды в год. В ходе тренировок с населением отрабатывается алгоритм:

- открыть входную дверь (чтобы ее не заклинило);
- отключить газ, воду, электричество;
- защитить голову, спрятаться под стол или кровать;
- дожждаться окончания толчков;
- эвакуироваться, не пользуясь лифтом.

При этом согласно рекомендациям японских специалистов, если есть возможность лучше прятаться рядом с диваном или большой кроватью, чтобы при разрушении здания вероятнее образовалась «зона жизни», чем в случае если тяжелые перекрытия раздавят стол.

В Японии организованы специализированные интерактивные центры, где можно испытать симуляцию землетрясения интенсивностью более 7 баллов и научиться безопасно передвигаться в усложненных условиях.

Вызывают интерес исследования, например, [11–13], которые посвящены изучению особенностей психологического состояния и поведения человека в условиях землетрясений.

Ряд статей, например, [14, 15], посвящены анализу существующих инструкций по практическим действиям населения в условиях угрозы и возникновения землетрясений. В связи с этим вызывают интерес статьи А. В. Масляева [15–17], в частности в статье [15] проводится анализ существующих требований МЧС России и других органов

власти по подготовке населения на основе их реального практического применения.

На развитие оперативной обстановки при землетрясениях влияет значительное количество различных факторов, в частности в статье [17] рассматривается влияние на сейсмостойкость здания фактора, связанного с повторяющимися сильными афтершоками, в статье [18] рассматривается фактор влияния формы здания на его сейсмичность.

В связи с этим предлагается использовать методики, позволяющие на основе анализа возможных разрушений здания оценивать время эвакуации при различных вариантах перекрытия эвакуационных путей.

В статье [19] описаны современные подходы к моделированию последствий землетрясений, что может успешно использоваться при разработке сценариев развития обстановки на конкретной территории с присущими ей особенностями и факторами.

В настоящее время в информационной системе МЧС России «Атлас опасностей и рисков» реализованы инструменты для моделирования последствий землетрясений, цунами и других чрезвычайных ситуаций.

Выводы

Таким образом, для разрешения обозначенной проблемной ситуации предложен проект методических рекомендаций, показана его примерная структура, состоящая из трех разделов и приложений.

По результатам проведенной работы сделан вывод, что факторы, характеризующие особенности развития чрезвычайных ситуаций в зависимости от их вида и риска, оказывают существенное влияние на организацию

процесса обучения населения, сотрудников организаций и персонала объектов инфраструктуры.

В связи с этим дальнейшая разработка унифицированных методических требований и рекомендаций по обучению населе-

ния действиям в условиях различных чрезвычайных ситуаций с учетом обозначенных факторов представляет собой новое направление исследований, обладающее высокой прикладной актуальностью и практической значимостью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Протокол заседания Правительственной комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности от 12.11.2025 № 10 // МЧС России : официальный сайт. URL: <https://clck.su/WqtRD> (дата обращения: 31.07.2026).
2. Организационно-методические указания МЧС России от 25.11.2024 по подготовке всех групп населения в области гражданской обороны в 2025–2029 гг. // МЧС России : официальный сайт. URL: <https://clck.su/hFVad> (дата обращения: 31.07.2026).
3. Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС. Книга 1. Методика оценки последствий землетрясений / МЧС России. М., 1994. 34 с.
4. Примерная программа курсового обучения личного состава спасательных служб от 20.11.2020 № 2-4-71-25-11 // МЧС России : официальный сайт. URL: <https://clck.su/yiwLF> (дата обращения: 31.07.2026).
5. Примерная программа курсового обучения личного состава НАСФ от 20.11.2020 № 2-4-71-28-11 // МЧС России : официальный сайт. URL: <https://clck.su/BSIsH> (дата обращения: 31.07.2026).
6. Примерная программа курсового обучения личного состава НФГО от 20.11.2020 № 2-4-71-26-11 // МЧС России : официальный сайт. URL: <https://clck.su/EmKPj> (дата обращения: 31.07.2026).
7. Аварийно-спасательные и другие неотложные работы при землетрясениях : учебное пособие / И. Ю. Сергеев [и др.]. Железногорск, 2025. 298 с.
8. Suci F. R. Z., Teuku Y. W. M. I., Cipta E. Coastal Geomorphological Dynamics and Tsunami Hazard Zones (5–12 m ASL) in Padang City, West Sumatra, Indonesia // Комплексное использование минерального сырья. 2026. № 3 (338). С. 59–71.
9. Уроки цунамигенного землетрясения в Японии / Л. Н. Дода [и др.] // Модели и методы аэродинамики : материалы XI Международной школы-семинара. М., 2011. С. 70–71.
10. Левин Б. В., Родкин М. В., Тихонов И. Н. Великое Японское землетрясение // Природа. 2011. № 10 (1154). С. 14–22.
11. Закс Т. В. Воздействие землетрясения на психологическое состояние человека // Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе : труды III Кавказской международной школы-семинара молодых ученых. Владикавказ, 2009. С. 457–460.
12. Лещенко Л. В. Влияние землетрясения слабой интенсивности на психическое здоровье городского населения : автореферат дисс. ... канд. мед. наук. Томск, 2009. 25 с.

13. Реакция на землетрясение населения города, расположенного в равнинной, считавшейся несейсмоопасной зоне / Б. Н. Пивень [и др.] // Российский психиатрический журнал. 2005. № 1. С. 52–57.
14. Махаммадиев Д. Дж. Вопросы тактики и правильных действий населения при землетрясении // Вестник экстренной медицины. 2024. Т. 17, № 1. С. 34–38.
15. Масляев А. В. Действия населения России в сейсмостойких зданиях // Жилищное строительство. 2014. № 11. С. 44–47.
16. Масляев А. В. Предельно допустимая степень повреждения в зданиях и сооружениях повышенной ответственности в процессе эксплуатации до землетрясения // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. 2012. № 29 (48). С. 80–85.
17. Масляев А. В. Сейсмостойкость зданий с учетом повторных сильных толчков при землетрясении // Жилищное строительство. 2007. № 10. С. 20–21.
18. Оверченко С. С., Гапонова В. А. Влияние формы здания на его сейсмичность // Молодежь и XXI век — 2026 : сборник научных статей 15-й Международной молодежной научной конференции в 4 т. Курск, 2026. Т. 4. С. 94–96.
19. Иванов Е. В., Ешау В. А., Павленко В. С. О применении инструментов моделирования в ходе проведения командно-штабных и штабных тренировок в МЧС России // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны в 5 ч. М., 2026. Ч. II. С. 219–223.

REFERENCES

1. Minutes of the meeting of the Government Commission for the Prevention and Elimination of Emergency Situations and Fire Safety dated 12.11.2025 No. 10 // Ministry of Emergency Situations of Russia : website. URL: <https://clck.su/WqtRD> (accessed 31.07.2026).
2. Organizational and methodological guidelines of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 11/25/2024 for the training of all population groups in the field of civil defense in 2025-2029 // Ministry of Emergency Situations of Russia : website. URL: <https://clck.su/hFVad> (accessed 31.07.2026).
3. Collection of methods for predicting possible accidents, disasters, natural disasters in the emergency situations. Book 1. Methodology for assessing the effects of earthquakes / Ministry of Emergency Situations of Russia. Moscow, 1994. 34 p.
4. Sample course training program for rescue personnel dated 11/20/2020 № 2-4-71-25-11 // Ministry of Emergency Situations of Russia : website. URL: <https://clck.su/yiwLF> (accessed 31.07.2026).
5. Approximate program of course training for NASF personnel dated 11/20/2020 № 2-4-71-28-11 // Ministry of Emergency Situations of Russia : website. URL: <https://clck.su/BSIsH> (accessed 31.07.2026).
6. Approximate program of course training for NSF personnel dated 11/20/2020 № 2-4-71-26-11 // Ministry of Emergency Situations of Russia : website. URL: <https://clck.su/EmKPj> (accessed 31.07.2026).
7. Emergency rescue and other urgent work in case of earthquakes : a textbook / I. Yu. Sergeev [et al.]. Zheleznogorsk, 2025. 298 p.

8. Suci F. R. Z., Teuku Y. W. M. I., Cipta E. Coastal Geomorphological Dynamics and Tsunami Hazard Zones (5–12 m ASL) in Padang City, West Sumatra, Indonesia // Integrated use of mineral raw materials. 2026. No. 3 (338). P. 59–71.
9. Lessons of the tsunamigenic earthquake in Japan / L. N. Doda [et al.] // Models and methods of aerodynamics : materials of the Eleventh International School Seminar. Moscow, 2011. P. 70–71.
10. Levin B. V., Rodkin M. V., Tikhonov I. N. The Great Japanese Earthquake // Nature. 2011. № 10 (1154). P. 14–22.
11. Zaks T. V. The impact of an earthquake on a person's psychological state // Seismic hazard and seismic risk management in the Caucasus : proceedings of the III Caucasian International School-seminar for Young Scientists. Vladikavkaz, 2009. P. 457–460.
12. Leshchenko L. V. The impact of a low-intensity earthquake on the mental health of the urban population : abstract of the dissertation for the degree of candidate of medical sciences. Tomsk, 2009. 25 p.
13. Reaction to the earthquake of the population of a city located in a flat, considered non-seismic zone / B. N. Piven et al. // Russian Psychiatric Journal. 2005. No. 1. P. 52–57.
14. Makhammadiev D. J. Issues of tactics and proper actions of the population in case of an earthquake // Bulletin of Emergency Medicine. 2024. Vol. 17. No. 1. P. 34–38.
15. Maslyaev A. V. Actions of the Russian population in earthquake-resistant buildings // Housing construction. 2014. No. 11. P. 44–47.
16. Maslyaev A. V. Maximum permissible degree of damage in buildings and structures of increased responsibility during operation before the earthquake // Bulletin of the Volga State University. Construction and architecture. 2012. No. 29 (48). P. 80–85.
17. Maslyaev A. V. Earthquake resistance of buildings, taking into account repeated strong tremors during an earthquake // Housing construction. 2007. No. 10. P. 20–21.
18. Overchenko S. S., Gaponova V. A. The influence of the shape of a building on its seismicity // Youth and the XXI century – 2026 : collection of scientific articles of the 15th International Youth Scientific Conference. In 4 volumes. Kursk, 2026. Vol. 4. P. 94–96.
19. Ivanov E. V., Eshau V. A., Pavlenko V. S. On the use of modeling tools during command and staff training in the Ministry of Emergency Situations of Russia // Civil Defense on the guard of peace and security : materials X International Scientific and Practical conference dedicated to the World Civil Defense Day. In 5 parts. Moscow, 2026. Part II. P. 219–223.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергеев Иван Юрьевич, канд. техн. наук, начальник Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, д. 1); РИНЦ ID: 999249.

Батуто Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника (по научной работе) — начальник научно-технического центра Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, д. 1); РИНЦ ID: 814934.

Жернаков Дмитрий Владимирович, канд. пед. наук, доцент, начальник кафедры пожарной и аварийно-спасательной техники Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, д. 1); РИНЦ ID: 833112.

Николаев Глеб Александрович, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры пожарной и аварийно-спасательной техники Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, д. 1); РИНЦ ID: 1056159; e-mail: 89082194153@mail.ru

Амерханов Тимур Русланович, командир отделения факультета инженеров пожарной безопасности Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, д. 1); РИНЦ ID: 1338269.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan Yu. Sergeev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia (1 Severnaya St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation); ID RSCI: 999249.

Alexey N. Baturo, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Academy for Scientific Work — Head of the Scientific and Technical, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia (1 Severnaya St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation); ID RSCI: 814934.

Dmitry V. Zhernakov, Cand. Sci. (Pedag.), Associate Professor, Head of the Department of Fire and Rescue Equipment, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia (1 Severnaya St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation); ID RSCI: 833112.

Gleb A. Nikolaev, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Department of Fire and Rescue Equipment, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia (1 Severnaya St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation); ID RSCI: 1056159; e-mail: 89082194153@mail.ru

Timur R. Amerkhanov, Department commander of the faculty of fire safety engineers, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia (1 Severnaya St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation); ID RSCI: 1338269.

УДК 614.8

МЕТОДИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТА ЭКОНОМИКИ

Гарелина Светлана Александровна, Скрынников Алексей Юрьевич
Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. Методика, описанная в статье, предназначена для расчета и обоснования мест размещения мобильных средств локализации разливов на объектах, где происходит обращение с нефтью и нефтепродуктами. В основе методики лежит деление территории объекта экономики на участки различной значимости, которая характеризуется интегральным уровнем опасности каждого участка. При этом учитывается комплекс факторов, характеризующих возможность возникновения разливов нефти и нефтепродуктов на различных участках территории объекта экономики и их последствия. Рассмотрены различные варианты размещения мобильных средств локализации разливов, рассчитанные на основании средневзвешенного, по показателю уровня опасности, времени реагирования на разливы. Кроме того, методика предусматривает реальную схему доставки мобильных средств локализации разливов по территории объекта экономики.

Отличием предлагаемой методики являются различные скорости передвижения сил ликвидации аварий и чрезвычайных ситуаций по территории объекта экономики: при выдвигении от места дислокации до места размещения мобильных средств локализации разливов, при доставке мобильных средств локализации разливов к месту их развертывания на рубеже локализации разлива нефти и нефтепродуктов. Это обосновывает удаление места размещения мобильных средств локализации разливов от места дислокации сил ликвидации аварий и чрезвычайных ситуаций.

Предлагаемая методика предполагает дальнейшее развитие в направлении распределенного размещения мобильных средств локализации разливов на основании возможности размещения различного количества средств локализации на нескольких участках территории объекта экономики.

Ключевые слова: объект экономики, разлив нефти и нефтепродуктов, мобильные средства локализации разливов, уровень комплексной опасности участка, время реагирования на разлив, спасательное формирование

Для цитирования: Гарелина С. А., Скрынников А. Ю. Методика для определения рационального размещения мобильных средств локализации разливов нефти и нефтепродуктов на территории объекта экономики // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 166–177.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE RATIONAL PLACEMENT OF MOBILE MEANS OF LOCALIZATION OF OIL AND PETROLEUM PRODUCTS SPILLS ON THE TERRITORY OF AN ECONOMIC FACILITY

Svetlana A. Garelina, Alexey Yu. Skrynnikov

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article proposes a methodology that makes it possible to determine the places of rational placement of mobile spill containment facilities on the territory of an economic facility with the turnover of oil and petroleum products. The methodology is based on the division of the territory of an economic facility into sections, taking into account their different significance, characterized by the integral level of danger of each site. At the same time, a set of factors characterizing the possibility of oil and oil product spills occurring in different areas of the territory of an economic facility and their consequences are taken into account. Various options for the placement of mobile spill containment facilities are considered, taking into account the weighted average response time to spills. In addition, the methodology takes into account the real scheme of delivery of mobile spill containment facilities on the territory of an economic facility. The difference of the proposed methodology is that it takes into account the different speeds of movement of accident and emergency response forces on the territory of an economic facility: when moving from the location to the location of mobile spill containment facilities, and when delivering mobile spill containment equipment to the place of their deployment at the line of oil and oil products spill localization. This justifies the removal of the location of mobile spill containment facilities from the location of the emergency response forces. The proposed methodology involves further development in the direction of distributed placement of mobile spill containment facilities, taking into account the possibility of placing a different number of containment facilities in several areas of the territory of an economic facility.

Keywords: economic facility, oil and petroleum products spill, mobile spill containment facilities, site complex hazard level, spill response time, rescue team

For citation: Garelina S. A., Skrynnikov A. Yu. Methodology for determining the rational placement of mobile means of localization of oil and petroleum products spills on the territory of an economic facility // *Technosphere safety*. 2026. No. 3 (52). P. 166–177.

Введение

Мероприятия по локализации разливов нефти и нефтепродуктов (ННП) на объектах экономики, связанных с их оборотом, имеют важное значение в части предупреждения чрезвычайных ситуаций. Их проводят с применением заградительных и сорбирующих

технических средств, имеющих ограниченную мобильность или являющихся стационарными инженерными сооружениями [1, 2].

На объектах экономики России зафиксированы разливы ННП, суммарный объем утечек при которых достигал нескольких тысяч тонн, а несвоевременное развертывание средств локализации и их нерациональное

размещение приводило к существенному росту ущерба и серьезным последствиям [3].

Уменьшение ущерба вследствие разливов ННП может быть обеспечено путем сокращения времени их локализации за счет применения технических средств локализации с высокой мобильностью. В работах [4, 5] предложена конструкция мобильного средства локализации (МСЛ) разливов ННП, проведено математическое моделирование ее параметров, а также экспериментальное исследование на сдвиг и опрокидывание конструкции МСЛ в различных условиях.

Основу конструкции МСЛ составляют складные многосекционные модули из металлической решетки с шарнирными соединениями, что обеспечивает максимальную степень прилегания к поверхности без дополнительных крепежных устройств. МСЛ можно складывать гармошкой, что позволяет перевозить и оперативно устанавливать его путем растягивания (вытягивания) из буксируемого контейнера или с транспортного прицепа со скоростью передвижения транспортного средства. Конструкция обработана полимерным покрытием, что делает заграждение изолирующим (рис. 1).

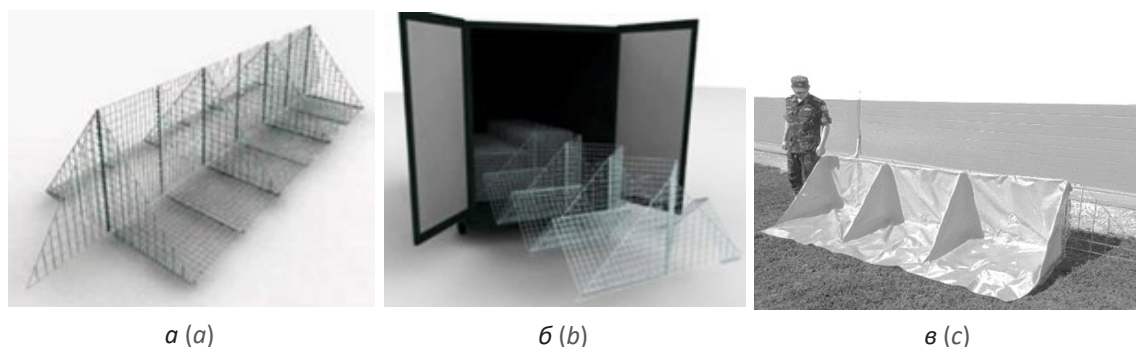


Рис. 1. Конструкция МСЛ:

а — в развернутом состоянии без покрытия; б — в процессе развертывания из буксируемого контейнера; в — с покрытием

Fig. 1. MSL design:

a — unfolded without coating; b — in the process of unfolding from a towed container; c — coated

Однако для реализации всех преимуществ МСЛ необходимо разработать мероприятия по его применению и рациональному размещению на территории объекта экономики (далее — объект), и этому посвящена предлагаемая методика.

Материалы и методы

1. Постановка задачи. Необходимо определить место размещения комплектов МСЛ, которое учитывает: средневзвешенное, по показателю уровня опасности, время реагирования $T_{\text{ср}}$ и коэффициент K_j .

$T_{\text{ср}}$ характеризует продолжительность реагирования на возможные разливы ННП на территории объекта, при этом принимается в расчет различная значимость участков, определяемая их интегральным уровнем опасности.

Для реализации методики схему (план) территории объекта (добычи, транспортировки, переработки, хранения ННП) предлагается вписать в прямоугольный контур, который в дальнейшем разделить на девять равных участков.

Примем общую площадь территории объекта за 100 %, тогда площадь одного

участка будет равна 11 % территории, что позволяет определить место возможного размещения комплектов МСЛ с точностью, достаточной для планирования мероприятий, как представлено на рис. 2.

Для выполнения расчетов по методике предлагаем использовать прямоугольную декартову систему координат.

Ось x направлена вдоль стороны территории объекта протяженностью 6 000 м, ось y — вдоль стороны протяженностью 5 000 м.

2. Допущения, принятые в методике:

- Расстояние определяется по прямой между расчетными точками.
- Место дислокации аварийного персонала (спасательного формирования), (далее — бригада) B фиксировано (как правило в административном здании в одном из угловых участков территории), для расчета по настоящей методике принимаем

левый нижний на схеме объекта участок 7. При этом начало координат совмещено с местом дислокации бригады, которому соответствует точка $B [0; 0]$.

- Время разворачивания комплекта МСЛ одинаково, поэтому в дальнейших расчетах его не учитываем.

- Скорость движения бригады до начала транспортировки комплектов МСЛ V_0 выше скорости движения при транспортировке комплектов МСЛ V_1 , т. е. $V_0 > V_1$, при этом скорость для определенности принимаем $V_0 = 10$ км/ч, $V_1 = 25$ км/ч.

- Разлив ННП (для расчета) может возникнуть на любом из девяти участков территории объекта.

Маршрут реагирования на разлив ННП имеет вид: место дислокации бригады $B \rightarrow$ место размещения (хранения) комплектов МСЛ $\rightarrow$ участок территории, где произошел разлив ННП.

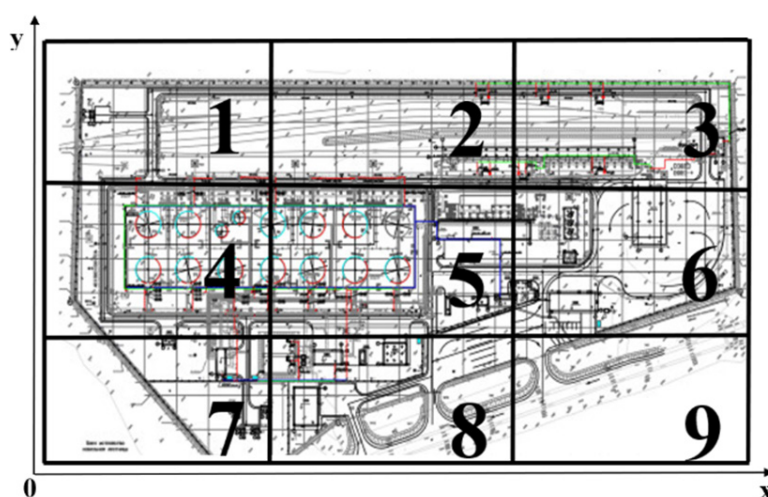


Рис. 2. Деление территории объекта экономики на участки

Fig. 2. Division of the territory of an economic object into plots

3. Определение показателя интегральной опасности участков объекта. Опасность каждого участка территории объекта оцениваем по совокупности m факторов. Весомость факторов определяем

методом анализа иерархий. Для i -го фактора устанавливаем вес w_i . При этом $w_1 + w_2 + \dots + w_m = 1$.

Выраженность каждого фактора на каждом участке территории объекта оцениваем

по трехбалльной шкале, где 1 балл — низкая выраженность фактора, 2 балла — средняя, 3 балла — высокая.

где $b_{i,j}$ — балльная оценка i -го фактора на j -м участке. Чем больше O_j , тем выше уровень комплексной опасности участка территории объекта.

4. Ранжирование участков территории объекта с присвоением коэффициентов значимости. Проводим ранжирование участков территории объекта в соответствии с результатами расчета значений O_j . Участку с максимальным значением O_j присваиваем ранг 1,

где $O_{\text{сум}} = O_1 + \dots + O_9$, при этом $K_1 + K_2 + \dots + K_9 = 1$.

5. Определение расстояния и скорости движения. Координаты центра j -го участка P_j обозначаем $[x_j; y_j]$, координаты места дислокации бригады B — $[x_B; y_B]$.

где T измеряется в минутах.

При размещении комплектов МСЛ непосредственно в точке B , первое слагаемое $L_{B,k} / V_0 = 0$, следовательно, весь маршрут до места разлива ННП будет пройден со скоростью V_1 .

6. Расчет средневзвешенного времени реагирования на разлив ННП. Последовательно рассчитываем варианты размещения комплектов МСЛ на территории объекта. Для каждого места размещения k

Интегральный показатель опасности j -го участка O_j определяем как взвешенную сумму балльных оценок

$$O_j = w_1 b_{1,j} + w_2 b_{2,j} + \dots + w_m b_{m,j}, \quad (1)$$

с минимальным — ранг 9. Номер ранга непосредственно в расчете времени не участвует.

Также для обеспечения возможности работы с относительными значениями вводим K_j — нормированный коэффициент значимости участка территории объекта по уровню опасности, обеспечивающий больший вклад времени доставки МСЛ к более опасным участкам территории объекта в итоговый критерий их размещения

$$K_j = O_j / O_{\text{сум}}, \quad (2)$$

Расстояние между двумя расчетными точками определяем по прямой $L_{A,D} = [(x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2]^{0.5}$.

Если комплекты МСЛ размещаем в точке k , а разлив ННП произошел на j -м участке, то время реагирования составит

$$T_{k,j} = 60[L_{B,k} / V_0 + L_{k,j} / V_1], \quad (3)$$

рассчитываем время реагирования на разлив ННП на каждом из участков территории объекта.

После этого определяем средневзвешенное по показателю уровня опасности время реагирования $T_{\text{ср}}$ с учетом коэффициентов K_j . Оно характеризует продолжительность реагирования на возможные разливы ННП на территории объекта с учетом различной значимости участков, определяемой их интегральным уровнем опасности

$$T_{\text{ср},k} = K_1 T_{k,1} + K_2 T_{k,2} + \dots + K_9 T_{k,9}. \quad (4)$$

С учетом двух скоростей формула (4) примет компактный вид

$$T_{\text{ср},k} = 60 \{L_{B,k} / V_0 + [K_1 L_{k,1} + \dots + K_9 L_{k,9}] / V_1\}. \quad (5)$$

7. Варианты размещения комплектов МСЛ. Далее в работе будут рассмотрены четыре варианта размещения комплектов МСЛ на территории объекта с определением точки размещения. Расчеты для каждого варианта ведутся с применением двухскоростной формулы средневзвешенного времени (5).

$$T_{\text{рац}} = \min [T_{\text{ср}, 1}; \dots; T_{\text{ср}, 9}]. \quad (6)$$

Вариант 2: с размещением в центре тяжести треугольника трех наиболее опасных участков территории объекта. Место размещения комплектов МСЛ определяем в центре тяжести G треугольника, углы которого расположены в центрах участков с высшими рангами опасности. Для этого определяем три участка с рангами опасности 1, 2, 3, если координаты их центров равны $[x_1; y_1]$, $[x_2; y_2]$, $[x_3; y_3]$.

$$T_{\text{ср}, B} = 60 [K_1 L_{B, 1} + \dots + K_9 L_{B, 9}] / V_1. \quad (7)$$

8. Результаты оценки средневзвешенного времени реагирования на разлив ННП для четырех вариантов размещения комплектов МСЛ. Сформируем исходные данные:

- промышленная площадка размером 6 000 × 5 000 м;
- место дислокации бригады B фиксировано $[0; 0]$.

Вариант 1: с учетом минимального времени реагирования на разлив ННП. Для девяти возможных мест размещения комплектов МСЛ (согласно делению территории объекта на участки) определяем $T_{\text{ср}, 1}, \dots, T_{\text{ср}, 9}$.

Рациональным является вариант, соответствующий минимальному значению времени реагирования $T_{\text{рац}}$:

Вариант 3: с размещением в геометрическом центре территории объекта. Комплекты МСЛ размещаем в геометрическом центре территории объекта C .

Вариант 4: с размещением в месте дислокации бригады. Комплекты МСЛ размещаются непосредственно в точке B . Бригада не тратит время на первое плечо маршрута, однако весь путь к месту аварии проходит с комплектом МСЛ в прицепе со скоростью V_1 :

В табл. 1 представлена совокупность из пяти факторов, характерных для объекта с оборотом ННП и весовые коэффициенты этих факторов, а в табл. 2 отображены: значение выраженности фактора на участке по трехбалльной шкале, интегральный показатель опасности участка, значение ранга опасности участка, нормированный коэффициент значимости участка по уровню опасности.

Таблица 1
Весовые коэффициенты факторов, определяющих степень опасности
участков территории объекта

Table 1
Weights of hazard factors plots of the territory of the object

Номер фактора Factor number	Наименование фактора Name of the factor	Весовой коэффициент фактора Factor weighting
F_1	Количество нефти/нефтепродукта, участвующего в аварии с разливом Вероятность разгерметизации технологического оборудования	0,30

Окончание таблицы 1

Номер фактора Factor number	Наименование фактора Name of the factor	Весовой коэффициент фактора Factor weighting
F_2	Вероятность разгерметизации технологического оборудования Probability of depressurization of technological equipment	0,25
F_3	Возможность распространения зеркала разлива нефти/нефтепродукта Possibility of spreading the oil/oil spill mirror	0,20
F_4	Пожаро- и взрывоопасность разлива нефти/нефтепродукта Fire and explosion hazard of an oil/oil product spill	0,15
F_5	Тяжесть воздействия факторов аварии на окружающие объекты The severity of the impact of accident factors on surrounding objects	0,10

Таблица 2
Весовые коэффициенты факторов, определяющих степень опасности
участков территории объекта

Table 2

Weights of hazard factors plots of the territory of the object

Номер участка Plot number	Значение выраженности фактора на участке по трехбалльной шкале The value of the severity of the factor in the area on a three-point scale					Интегральный показатель опасности участка, O_j Integral Indicator of the hazard of the site, O_j	Значение ранга опасности участка The value of the hazard rank of the site	Нормированный коэффициент значимости участка по уровню опасности, K_j Normalized coefficient of significance of the site by hazard level, K_j
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5			
1	1	1	1	1	1	1,00	9	0,062
2	1	1	1	2	2	1,25	6	0,077
3	1	1	1	1	3	1,20	7	0,074
4	1	1	1	2	3	1,35	5	0,083
5	1	1	1	1	2	1,10	8	0,068
6	3	3	3	2	3	2,85	2	0,175
7	2	2	3	3	3	2,15	4	0,132
8	2	2	3	3	2	2,35	3	0,145
9	3	3	3	3	3	3,00	1	0,185

Участок 9 имеет ранг 1, участок 6 — ранг 2, участок 8 — ранг 3. Следовательно, наиболее опасные участки расположены на удалении от места дислокации бригады В [0; 0].

В табл. 3 представлены результаты расчета средневзвешенного времени реагирования на разлив ННП при размещении комплектов МСЛ по варианту 1.

Таблица 3
Результаты расчета средневзвешенного времени реагирования на разлив ННП
при размещении комплектов МСЛ по варианту 1

Table 3

Results of calculation of the weighted average response time to a TIU spill when placing MSL kits according to option 1

Номер участка (места размещения комплекта МСЛ) Plot number (location of MSL kits)	Расстояние от места дислокации бригады В до места размещения комплекта МСЛ, км Distance from the location of brigade В to the location of MSL kits, km	Взвешенный путь после начала буксировки ком- плекта МСЛ, км Weighted distance after the start of towing of MSL kits, km	Время до начала буксировки комплекта МСЛ, мин Time to start towing of MSL kits, min	Взвешенное время после начала буксировки комплекта МСЛ, мин The value of the hazard rank of the site	Средневзвешенное время реагирования, T_{cp} , мин Average response time, min
1	4,285	3,488	10,28	20,93	31,21
2	5,134	2,771	12,32	16,62	28,95
3	6,509	3,095	15,62	18,57	34,19
4	2,693	2,857	6,46	17,14	23,60
5	3,905	2,064	9,37	12,38	21,75
6	5,590	2,315	13,42	13,89	27,31
7	1,302	2,991	3,12	17,95	20,07
8	3,144	2,202	7,47	12,21	20,69
9	5,069	2,513	12,17	15,08	27,24

Минимальное значение времени реагирования получено при размещении комплектов МСЛ на участке 8: $T_{рац} = 20,69$ мин.

Участок 8 принимаем рациональным местом размещения комплектов МСЛ.

В таблице 4 представлены результаты расчета средневзвешенного времени реагирования на разлив ННП и места размещения комплектов МСЛ по вариантам 1–4.

Таблица 4
Результаты расчета средневзвешенного времени реагирования
на разлив ННП и места размещения комплектов МСЛ по вариантам 1–4

Table 4

The results of calculating the weighted average response time to a TIU spill and the location of MSL kits according to options 1–4

Вариант расчета Calculation option	Место размещения комплектов МСЛ Location of MSL kits	Средневзвешенное время реагирования, T_{cp} , мин Average response time, min	Сокращение времени по предлагаемому варианту расчета, % Reduction of time according to the proposed calculation option
1. С учетом минимального времени реагирования на разлив ННП 1. Taking into account the minimum response time to a TIU spill	Участок 8 Plot 8	20,69	—

Окончание таблицы 4

Вариант расчета Calculation option	Место размещения комплектов МСЛ Location of MSL kits	Средневзвешенное время реагирования, T_{cp} , мин Average response time, min	Сокращение времени по предлагаемому варианту расчета, % Reduction of time according to the proposed calculation option
2. С размещением в центре тяжести треугольника трех наиболее опасных участков территории объекта G, м 2. With the placement of the three most dangerous areas G of the facility territory in the center of gravity of the triangle	[4333; 1389]	23,93	13,5
3. С размещением в геометрическом центре территории объекта C, м 3. With placement in the geometric center of the object territory C, m	[3000; 2500]	21,75	4,9
4. С размещением в месте дислокации бригады B, м 4. With the deployment of the brigade at the place of deployment B, m	[0; 0]	25,00	17,2

Места размещения комплектов МСЛ согласно вариантам 1–4 графически представлены на рис. 3.

9. Последовательность этапов реализации методики:

1. Провести разделение территории объекта на девять участков и определить координаты их центров.

2. Сформировать перечень факторов, определяющих степень опасности участков,

и определить их весовые коэффициенты методом анализа иерархий.

В таблице 5 приведен перечень основных факторов, характерных для объектов с оборотом ННП.

Методика является универсальной и может быть применена, в т. ч. на объектах химической промышленности после соответствующей корректировки перечня факторов.

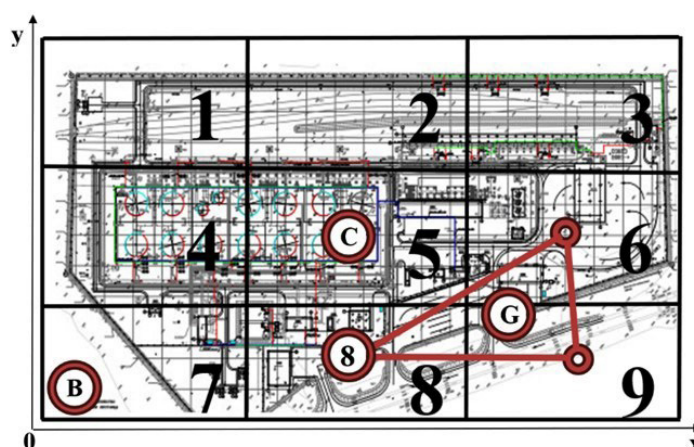


Рис. 3. Места размещения комплектов МСЛ согласно вариантам 1–4

Fig. 3. Locations of MSL kits according to options 1–4

Таблица 5
Перечень основных факторов, определяющих степень опасности участков
и их весовых коэффициентов, характерных для объектов с оборотом ННП

Table 5

List of the main factors that determine the degree of danger of sites
and their weight coefficients typical for objects with a turnover of TIR

Определение фактора Determining the factor		Весовой коэффициент фактора Factor weighting		
Φ_1	Количество персонала на участке, чел. Number of personnel at the site, people	Малое Small 1–5	Среднее Average 5–20	Большое Large 20–50
Φ_2	Вероятность прогрессирующего развития аварии с разливом ННП Probability of progressive development of an accident with an IUU spill	Низкая Low	Средняя Medium	Высокая High
Φ_3	Прогнозируемый объем разлива ННП Projected volume of oil spill	Малый Small	Средний Medium	Большой Large
Φ_4	Прогнозируемый объем собранного (возвращенного) ННП Projected amount of VATs collected (returned)	Малый Small	Средний Medium	Большой Large
Φ_5	Наличие жилой (промышленной) застройки вблизи участка Availability of residential (industrial) development near the site	Низкая плотность Low density	Средняя плотность Medium density	Высокая плотность High Density
Φ_6	Доступность участка при аварии с разливом ННП (проходимость проездов, наличие завалов) Accessibility of the site in the event of an accident with an NNP spill (passability of driveways, presence of debris)	Малая Small	Частичная Partial	Полная Complete
Φ_7	Тип разлившихся ННП Type of spilled TIRs	Безопасный Secure	Пожаро-опасный Fire hazard	Взрывопожароопасный Explosive and flammable

3. Оценить выраженность каждого фактора на каждом участке по трехбалльной шкале.

4. Рассчитать интегральный показатель опасности O_j для каждого участка и присвоить участкам ранг опасности от 1 до 9.

5. Рассчитать суммарный интегральный показатель опасности $O_{\text{сум}}$ и нормированные коэффициенты K_j .

6. Задать фиксированные координаты места дислокации бригады B .

7. Установить расчетные скорости V_0 и V_1 , с учетом $V_0 > V_1$.

8. Для каждого из девяти центров участков территории объекта определить:

- расстояние от места дислокации бригады B до места размещения комплектов МСЛ;
- расстояние от места размещения комплектов МСЛ до центров всех девяти участков.

9. Для каждого варианта размещения комплектов МСЛ рассчитать $T_{\text{ср}}(k)$ по двухскоростной формуле.

10. Выбрать минимальное значение времени реагирования $T_{\text{рац}}$ и соответствующий участок территории объекта.

Выводы

Предлагаемая методика связывает результаты ранжирования участков территории объекта экономики по уровню комплексной опасности с реальной схемой доставки средств локализации разлива ННП (комплектов МСЛ).

Критерием выбора места размещения комплектов МСЛ на территории объекта является расчетное средневзвешенное время реагирования на разлив ННП.

Принципиальным уточнением является введение в расчеты двухскоростного подхода к движению по территории объекта: движение бригады (спасательного формирования, аварийной бригады) без средств локализации (комплектов МСЛ) от места дислокации бригады до места их размещения комплектов МСЛ с максимально разрешенной скоростью и движение с более низкой скоростью после начала буксировки прицепа с комплектом МСЛ. Это обосновывает удаление места размещения комплектов МСЛ от места дислокации бригады. Благодаря такому подходу сокращается часть

маршрута движения к наиболее опасным участкам, где предусматривается буксировка прицепа с комплектом МСЛ.

В примере проведения расчетов по предлагаемой методике рациональным местом размещения комплектов МСЛ является участок 8.

По сравнению с местом размещения в центре тяжести трех наиболее опасных участков, время уменьшается на 13,5 %, с геометрическим центром территории объекта — на 4,9 %, а с размещением комплектов МСЛ непосредственно в месте дислокации бригады — на 17,2 %.

Дальнейшее развитие предлагаемой методики предполагается в двух направлениях.

Первое — в дополнение к рассмотренному варианту централизованного размещения комплектов МСЛ разливов ННП, расчет возможности их распределенного размещения в двух местах на территории объекта.

Второе — оптимизация распределения комплектов МСЛ между двумя местами хранения, для оценки эффекта их параллельной доставки и развертывания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рекомендации по применению технических средств при ликвидации последствий разлива нефтепродуктов / ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). М., 2020. 33 с.
2. Сакович Н. Е. Методы и средства ликвидации последствий разливов нефти и нефтепродуктов : монография. Брянск, 2012. 198 с.
3. Хронология крупнейших случаев разлива нефти и нефтепродуктов в России // ИА ТАСС : сайт. URL: <https://clck.ru/cnQhh> (дата обращения: 11.02.2025). Дата публикации: 03.06.2020.
4. Скрынников А. Ю. Математическое моделирование конструкции мобильного ограждающего средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов на суше // Техносферная безопасность. 2025. № 3. С. 151–163.

5. Скрынников А. Ю., Треушков И. В. Результаты испытаний опытного образца мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов // Техносферная безопасность. 2025. № 4. С. 138–149.

REFERENCES

1. Recommendations for the use of technical means in the liquidation of the consequences of an oil spill / VNII GOChS (FC). Moscow, 2020. 33 p.
2. Sakovich N. E. Methods and means of eliminating the consequences of oil and oil product spills : monograph. Bryansk, 2012. 198 p.
3. Chronology of the largest cases of oil and oil products spills in Russia // TASS Russian News Agency : website. URL: <https://clck.ru/cnQhh> (accessed 11.02.2025). Date of publication: 03.06.2020.
4. Skrynnikov A. Yu. Mathematical modeling of the design of a mobile means of localization of oil and petroleum products spills on land // Technosphere safety. 2025. No. 3. P. 151–163.
5. Skrynnikov A. Yu., Treushkov I. V. Results of testing of a prototype of a mobile means of localization of oil and oil product spills // Technosphere safety. 2025. No. 4. P. 138–149.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарелина Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 8591-0495; Author ID: 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Скрынников Алексей Юрьевич, старший преподаватель учебно-методического отдела Института развития МЧС России Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 7465-2434; Author ID: 865332; e-mail: skrynnikov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana A. Garelina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 8591-0495; Author ID 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Alexey Yu. Skrynnikov, Senior Lecturer of the Educational and Methodological Department of the Institute of Development, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 7465-2434; Author ID: 865332; e-mail: skrynnikov@yandex.ru

УДК 614.8.084

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАЗБОРА ЗАВАЛОВ В УСЛОВИЯХ МАССОВЫХ РАЗРУШЕНИЙ

Чумак Сергей Петрович, Балин Дмитрий Николаевич, Онищенко Юрий Анатольевич, Кузнецова Таисия Дмитриевна
ВНИИ ГОЧС (ФЦ), г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье обоснована необходимость создания и серийного производства малоразмерных инженерных технических средств, отличающихся небольшой массой, имеющих незначительные габариты, обладающих мобильностью (маневренностью, поворотливостью, проходимостью), позволяющей спасателям их оперативно перемещать и эффективно применять на ограниченном пространстве рабочих мест (площадок), на которых организуется типовой технологический процесс аварийно-спасательных работ в зоне разрушений зданий и сооружений. Отмечается, что целесообразность использования указанной техники обусловлена необходимостью применять более совершенные, щадящие способы обеспечения доступа и высвобождения (деблокирования) пострадавших, основанные не на сплошной грубой разборке завала, а на более аккуратной, филигранной работе. Описаны преимущества применения различных типов малогабаритной техники при проведении работ по разбору завалов в целях обеспечения доступа и деблокирования, извлечения пострадавших с учетом выполнения операций по перемещению (подъему), сдвигу (смещению) и разрушению (резке, расчленению, дроблению) обломков разрушенных зданий и сооружений. Применение указанных технических средств может быть особенно эффективным при их использовании совместно с ленточными конвейерами и транспортерами, предназначенными для механизации перемещения мелких обломков строительных конструкций.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, аварийно-спасательные работы, аварийно-спасательные средства, малогабаритная техника, завал, обломки, строительные конструкции

Для цитирования: О целесообразности создания и применения малоразмерных инженерных технических средств для разбора завалов в условиях массовых разрушений / С. П. Чумак [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 178–187.

ABOUT THE EXPEDIENCY OF CREATING AND USING SMALL-SIZED ENGINEERING EQUIPMENT FOR DEBRIS REMOVAL IN CONDITIONS OF MASS DESTRUCTION

Sergey P. Chumak, Dmitry N. Balin, Yuri A. Onishchenko, Taisiya D. Kuznetsova
VNII GOChS (FC), Moscow, Russian Federation

Abstract. The article justifies the need to develop and mass-produce small-sized engineering technical equipment that is characterized by low weight, small dimensions, and mobility (maneuverability, agility, and cross-country capability), which enables rescuers to quickly move and effectively use it in confined spaces (worksites) where a standard technological process for emergency and rescue operations in the area of building and structure destruction is organized. It is noted that the feasibility of using this equipment is обусловлен by the need to apply more advanced, gentle methods of ensuring access and freeing (unblocking) the victims, based not on the wholesale rough dismantling of the debris, but on more careful, precise work. The advantages of using various types of small-scale equipment when carrying out debris clearance work to ensure access and unblocking, and to extract the victims, taking into account the performance of operations involving the movement (lifting), shifting (displacement), and destruction (cutting, dismembering, crushing) of the debris of destroyed buildings and structures, are described. The use of these technical means can be particularly effective when they are used in conjunction with belt conveyors and transporters designed to mechanize the movement of small fragments of construction structures.

Keywords: emergency situations, rescue operations, emergency rescue equipment, small-sized machinery, machinery, blockage, debris, building structures

For citation: About the expediency of creating and using small-sized engineering equipment for debris removal in conditions of mass destruction/ S. P. Chumak [et al.] // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 178–187.

Введение

Ликвидация чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушениями зданий и сооружений, представляет собой сложную проблему, имеющую многочисленные научные и практические аспекты. В частности, к таким аспектам относится планирование, подготовка аварийно-спасательных работ (АСР), которые проводятся в крайне неблагоприятных внешних условиях, в сжатые сроки с высокой интенсивностью и привлечением значительных сил и средств [1, 2].

До настоящего времени планирование и организация выполнения АСР осуществлялись с учетом того обстоятельства, что основные усилия должны направляться на расчистку больших объемов обломков

строительных конструкций, разборку завала с использованием тяжелой инженерной техники и, частично средств малой механизации, применяемых при строительстве зданий (сооружений) [3].

При этом руководящим составом и должностными лицами, принимающими решения при планировании и проведении АСР, должны были учитываться специфика ликвидации крупномасштабных ЧС, особенности выполнения поисково-спасательных работ в зонах массовых разрушений и при ведении военных действий: наличие большого количества пострадавших в завалах строительных конструкций и их местоположение под завалами, в полуразрушенных (поврежденных) зданиях, сооружениях подземного пространства городов [1, 2].

Теоретические основы

В настоящее время практика показывает возросшую вероятность возникновения военных конфликтов различной интенсивности, которые отличаются массированным применением высокоточного оружия большой дальности и последующим длительным ведением ожесточенных боевых действий в жилых районах городов, сопровождаются значительными разрушениями и большим количеством жертв среди мирного населения.

Одной из основных задач органов управления ГО в таких обстоятельствах является выполнение в условиях крайне ограниченного времени очень значительного объема работ по одновременному точечному спасению из-под завалов множества людей, пострадавших в результате массовых разрушений городской застройки. Для ее реализации требуется использовать новые подходы в области спасательного дела, оптимальные технологии и организацию проведения АСР. В частности, применять более совершенные, щадящие способы обеспечения доступа и высвобождения (деблокирования) пострадавших, основанные не на сплошной грубой разборке завала, а на более аккуратной, филигранной работе [1, 2, 4–9].

При рассмотрении специфики проведения крупномасштабных поисково-спасательных работ и операций важно руководствоваться процессным подходом [1, 2, 4, 7–9], поэтому АСР целесообразно рассматривать как последовательное выполнение технологических этапов, обусловленное изменением обстановки. Фактически имеет место совокупность взаимосвязанных операций или работ, протекающих во времени и пространстве, которые осуществляются в определенной последовательности, проявляются

в конкретной форме и подчиняются основной цели — спасению максимально возможного числа пострадавших при ЧС [1, 2, 7–9].

Одним из основных технологических этапов процесса АСР является разборка завалов строительных конструкций в целях деблокирования и извлечения пострадавших, которая предполагает выполнение типовых технологических операций по перемещению (подъему), сдвигу (смещению) и разрушению (резке, расчленению, дроблению) обломков разрушенных зданий и сооружений.

В настоящее время выполнение указанных типовых технологических операций, как правило, осуществляют относительно небольшие подразделения — расчеты, звенья, отделения спасателей в количестве 5–7 человек. При этом применяют специализированные аварийно-спасательные машины и инструменты, а также тяжелую инженерную технику, аналогичную той, которая используется при строительстве железобетонных зданий и сооружений [6]. Перечисленное оборудование, как правило, является достаточно громоздким, отличается большой массой, имеет значительные габариты и не обладает мобильностью (маневренностью, проходимостью, поворотливостью), позволяющей оперативно его перемещать и эффективно применять на ограниченном пространстве рабочих мест (площадок). Таким образом, для обеспечения высокой эффективности АСР целесообразно применять комплексы специализированной аварийно-спасательной техники различных типоразмеров, в т. ч. малых.

Малогабаритные технические средства отличаются высокой производительностью, надежностью, живучестью и энерговооруженностью и пригодны для одновременного выполнения нескольких типов функциональных

задач и типовых технологических операций в условиях ограниченной территории рабочих мест на объектах проведения АСР и сопутствующей ей усложненной обстановки — возможной потери оптической видимости, повышенной запыленности, задымленности, тления и горения в завалах, очистки больших площадей от обломков строительных конструкции [2, 3, 6, 8, 10]. К ним могут быть отнесены самоходные машины с навесным оборудованием (гидро-молотом, ковшом, бульдозерным отвалом, краном), например: малогабаритные экскаваторы, краны-манипуляторы и краны на автомобильном шасси.

Применение перечисленных технических средств может быть особенно эффективным при их использовании совместно с лен-

точными конвейерами и транспортерами, предназначенными для механизации перемещения мелких обломков строительных конструкций.

Результаты и их обсуждение

Представлялось необходимым проанализировать эффективность применения малогабаритной техники различных типов в ходе работ по ликвидации последствий обрушения зданий.

Малогабаритные экскаваторы

Малогабаритные (мини- и микро-) экскаваторы представляют собой универсальные машины ковшового типа, специально разработанные для работы в ограниченном пространстве в условиях разрушений (рис. 1).

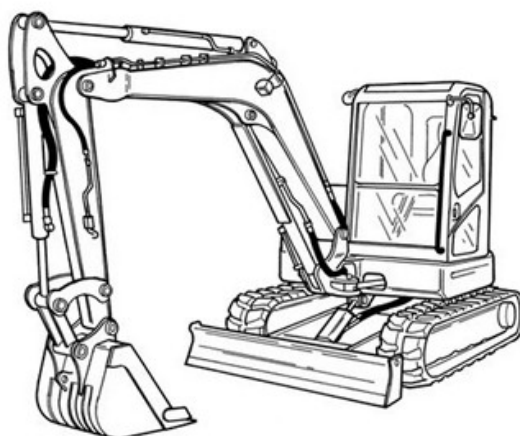


Рис. 1. Малогабаритный экскаватор [11]

Fig. 1. Compact excavator [11]

Основные преимущества при проведении АСР:

- оперативная доставка к месту ликвидации последствий ЧС стандартными грузовыми автомобилями, прицепами или даже большегрузными внедорожниками (некоторые модели могут быть выполнены на гусеничном ходу), а также при помощи авиации;

- умеренное давление на грунт: малый вес и гусеничный ход позволяют безопасно работать на неустойчивых завалах, в т. ч. вблизи подземных коммуникаций;

- многофункциональность: наличие сменных рабочих инструментов — гидро-молота (для разрушения бетонных конструкций), грейфера (для захвата и перемещения мелких обломков и бревен), стандартного

и узкого ковша (для расчистки проходов и выборки грунта);

— возможность работы в непосредственной близости от конструкций и объектов: конструктивное исполнение с нулевым или минимальным задним свесом позволяет работать вплотную к стенам и другим препятствиям.

Тактика применения:

1) первоначальная расчистка и планировка площадки для подхода тяжелой техники и разбивки/установки пункта временного размещения аварийно-спасательных средств (АСС);

2) локальный разбор завалов, где использование крупной техники невозможно или опасно;

3) создание лазов и тоннелей к заблокированным пострадавшим совместно с использованием гидравлического аварийно-спасательного инструмента.

Малогабаритные краны-манипуляторы и краны на автомобильном шасси

Указанный тип АСС предназначен для точечного подъема, перемещения и погрузки конструкций и элементов разрушенных конструкций, которые невозможно

или опасно перемещать с использованием экскаватора (рис. 2).

Основные преимущества при проведении АСР:

— высокая точность и аккуратность работы, что позволяет осторожно извлекать крупные, но неустойчивые конструкции (бетонные плиты, балки), минимизируя риск обрушения и вибрации;

— автономность работы: собственные двигатели делают краны независимыми от внешних источников энергии;

— грузоподъемность и вылет стрелы обеспечиваются достаточными тактико-техническими характеристиками, необходимыми при работе в ограниченном пространстве завала.

Тактика применения:

1) поэтапное удаление крупных элементов завала (перекрытий, стеновых панелей) после их предварительного обследования и обвязки (зачаливания);

2) подача АСС, в т. ч. средств жизнеобеспечения в труднодоступные зоны завала;

3) обеспечение страховки и поддержки спасателей при проведении АСР на высоте.



Рис. 2. Малогабаритный кран, 4 т [12]

Fig. 2. Small-sized crane, 4 tons [12]

Ленточные конвейеры и транспортеры для механизации перемещения мелких обломков строительных конструкций

Одной из самых трудоемких задач при проведении АСР при обрушениях являе-

тся удаление расчищенного материала (обломков, грунта) с места работ. Использование ленточных конвейеров (рис. 3) позволяет значительно ускорить этот процесс и снизить физическую нагрузку на спасателей.

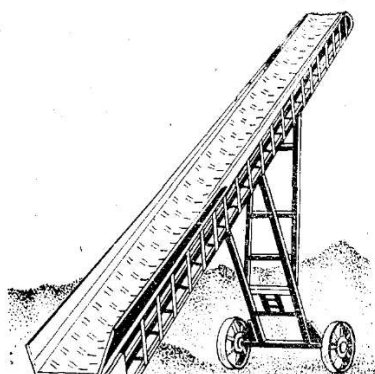


Рис. 3. Конвейер ленточный передвижной [13]

Fig. 3. Mobile belt conveyor [13]

Основные преимущества при проведении АСР:

- обеспечение непрерывности процесса с постоянным потоком материала (обломков строительных конструкций), в отличие от циклической работы погрузчиков и транспортных средств;

- высокая производительность: возможность перемещать большие объемы мелкофракционного материала на значительные расстояния (десятки метров);

- гибкость компоновки: установка в каскад (последовательно) позволяет организовать транспортировку материала (обломков, грунта) из труднодоступных мест к точке погрузки на транспортные средства;

- мобильность обеспечивается разборными моделями, предназначенными для быстрого монтажа непосредственно на завале, или моделями на колесном шасси.

Тактика применения:

- 1) организация транспортного коридора для удаления мелких обломков из места (эпицентра) проведения АСР;

- 2) использование в качестве составной части сортировочного пункта для отделения грунта и мелких обломков от крупных элементов конструкции;

- 3) механизация АСР в условиях, когда нахождение тяжелой техники (погрузчиков) в зоне разбора невозможно (небезопасно).

Необходимость использования указанных технических средств обусловлена особенностями структуры завала, возникшего при разрушении зданий, и спецификой организации технологического процесса АСР.

Анализ результатов исследований, проведенных в рассматриваемой области спасательного дела, позволил установить, что при разрушении железобетонных и кирпичных зданий наиболее распространенными элементами завала являются обломки мелкой и средней фракции. Доля мелких (менее 0,2 т) и средних (0,2–2 т) по весу обломков составляет у зданий:

- типа Б1 и В1 (каркасных и бескаркасных) 50–70 % соответственно;

- типа Б2 (бескаркасных и каркасных) 30–50 % [1,2].

Содержание элементов мелкой (0,1 м и менее) и средней (0,5–0,1 м) размерности составляет 55 (75)–75 (100) % для завалов зданий типа Б1 и 30–50 % — типа В1 [1,2].

Также необходимо учитывать, что работы по разборке завала проводятся на отдельной площадке силами расчета (звена, отделения) спасателей численностью 5–7 человек. Причем на территории одного разрушенного здания (объекте проведения АСР) одновременно может быть от 3 до 7 рабочих мест (площадок). Организация АСР в таких условиях сопряжена с возможной нехваткой тяжелой инженерной техники для одновременной разборки завала, обеспечения доступа и деблокирования пострадавших на всех площадках.

Для повышения производительности действий спасателей и обеспечения надлежащей эффективности проведения АСР нужно:

- предусматривать оснащение аварийно-спасательных подразделений действующими на уровне рабочих мест малогабаритными инженерными техническими средствами, такими как погрузчики, экскаваторы, бульдозеры, самоходное крановое оборудование уменьшенного типоразмера;
- применять малогабаритные технические средства уменьшенного типоразмера совместно с обычной стандартной тяжелой инженерной техникой.

Важно отметить и вопросы интеграции малогабаритной техники в общий комплекс проведения АСР:

- эффективность применения данного класса АСС достигается при их внедрении в общую логистику и тактику проведения АСР;

- разведка и планирование обеспечивает определение зон, где применение крупногабаритных АСС невозможно и куда необходимо доставить малогабаритные комплексы;

- создание рабочих площадок обеспечивается мини-экскаваторами для расчистки и выравнивания площадок для крано-манипуляторной установки, конвейеров и других АСС;

- послойный разбор завала обеспечивается комплексной работой мини-экскаватора (проводит предварительное разрыхление и подает материал на конвейер) кран-манипулятора (извлекает крупные элементы) и конвейерной линии (удаляет мелкие обломки).

Выводы

Использование малогабаритных кранов, экскаваторов и ленточных конвейеров является необходимым элементом современной технологии разборки завалов, обеспечивая механизацию работ на ограниченных рабочих площадках и заполняя нишу между ручным трудом спасателей и применением тяжелой инженерной техники.

Применение данной техники позволяет повысить производительность и безопасность аварийно-спасательных работ, сократить время их проведения и повысить вероятность спасения пострадавших.

С учетом этого целесообразно рекомендовать предприятиям промышленного комплекса Российской Федерации подготовить мероприятия по созданию и серийному производству малогабаритных инженерных технических средств, отличающихся небольшой массой, компактными габаритами и высокой мобильностью для работы в ограниченном пространстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник спасателя. Книга 2: спасательные работы при ликвидации последствий землетрясений, взрывов, бурь, смерчей и тайфунов / С. М. Вороной [и др.] ; ВНИИ ГОЧС (ФЦ). Москва : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2006. 180 с.
2. Чумак С. П. Аварийно-спасательные работы в условиях разрушенных зданий. Особенности технологии, организации и управления / С. П. Чумак ; МЧС России. М. : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010. 231 с.
3. Chumak S. P. Technological process of rescue operations in conditions of mass destruction. System-integrative aspect and principles of organization // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. Art. 042047. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042047.
4. Чумак С. П. Основы разработки технологии и управления процессами аварийно-спасательных работ при разрушениях зданий и сооружений // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. Вып. 4. С. 55–63.
5. Чумак С. П. Методические аспекты определения рациональной технологии выполнения аварийно-спасательных работ // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2010. Вып. 5. С. 63–77.
6. Чумак С. П., Дурнев Р. А. Некоторые аспекты развития технологий аварийно-спасательных работ при массовых разрушениях зданий и сооружений // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. 11. С. 71–77.
7. Чумак С. П. Методологические аспекты определения исходных данных при прогнозировании технологических процессов разработки завалов в условиях массовых разрушений // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 3. С. 10–22.
8. Чумак С. П. Методологические аспекты рациональной организации процессов проведения аварийно-спасательных работ в условиях массовых разрушений // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2020. № 3. С. 85–92.
9. Овчинников В. В., Чумак С. П., Стефанская С. М. Применение аэромобильных группировок при ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Технологии гражданской безопасности. 2018. Т. 15, № 1 (55). С. 16–21. DOI: 10.54234/CST.19968493.2018.15.1.55.3.16. EDN: YULGHP.
10. Овчинников В. В., Чумак С. П., Якутов А. В. Методические рекомендации по оценке эффективности применения поисково-спасательных формирований, привлекаемых к ликвидации чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. 2013. Т. 10, № 2 (36). С. 38–43.
11. Малогабаритный экскаватор черно белый рисунок // Pinterest: сайт. URL: <https://i.pinimg.com/474x/9c/a9/63/9ca963c7d70559923ee299e0e87ac492.jpg?nii=t> (дата обращения: 11.09.2026).
12. Малогабаритный кран 4 т, STSQ4A // Jining Sitong Construction Machinery Co., Ltd. (SITONG) : [сайт]. URL: <https://heavycrane-ru.com/1-1-3-4ton-light-duty-crane-stsq4a.html> (дата обращения: 11.09.2026).
13. Конвейеры и элеваторы // Строй-Техника.ру : [сайт]. URL: <https://stroy-technics.ru/article/konveiry-i-elevatory> (дата обращения: 25.03.2026).

REFERENCES

1. Rescuer's Handbook. Book 2: Rescue Operations in the Elimination of the Consequences of Earthquakes, Explosions, Storms, Tornadoes, and Typhoons / S. M. Voronoy [et al.]; Federal State Institution All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations (Federal Center). Moscow : Federal Center All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations, 2006. 180 p.
2. Chumak S. P. Emergency rescue operations in conditions of destroyed buildings. Features of technology, organization and management. Moscow : VNII GOChS (FC), 2010. 232 p.
3. Chumak S. P. Technological process of rescue operations in conditions of mass destruction. System-integrative aspect and principles of organization // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. Art. 042047. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042047.
4. Chumak S. P. Fundamentals of technology development and management of emergency management processes-rescue operations in case of destruction of buildings and structures. Problems of safety and emergency situations. Moscow : VNIITI. 2008. Vol. 4. P. 55–63.
5. Chumak S. P. Methodological aspects of determining the rational technology of emergency rescue operations // Problems of safety and emergency situations. 2010. No. 5. P. 63–77.
6. Chumak S. P., Durnev R. A. Some aspects of the development of emergency rescue technologies during mass destruction of buildings and structures // Safety problems in emergency situations. 1998. Vol. 11. P. 71–77.
7. Chumak S. P. Methodological aspects of determining the initial data in predicting technological processes of blockage development in conditions of mass destruction // Security and emergency issues. 2019. No. 3. P. 10–22.
8. Chumak S. P. Methodological aspects of the rational organization of processes: emergency rescue operations in conditions of mass destruction // Security and emergency issues. 2020. No. 3. P. 85–92.
9. Ovchinnikov V. V., Chumak S. P., Stefanskaya S. M. The Use of Airborne Groupings in the Elimination of Large-Scale Natural and Man-Made Emergencies // Civil Security Technologies. 2018. Vol. 15, No. 1 (55). P. 16–21. DOI: 10.54234/CST.19968493.2018.15.1.55.3.16. EDN: YULGHP.
10. Ovchinnikov V. V., Chumak S. P., Yakutov A. V. Methodological recommendations for evaluating the effectiveness of search and rescue units involved in emergency response // Technologies of civil safety. 2013. Vol. 10, No. 2 (36). P. 38–43.
11. Small-sized excavator black and white drawing // Pinterest: [website]. URL: <https://i.pinimg.com/474x/9c/a9/63/9ca963c7d70559923ee299e0e87ac492.jpg?nii=t> (accessed 09.11.2026).
12. 4 T small crane, STSQ4A // Jining Sitong Construction Machinery Co., Ltd. (SITONG) : [website]. URL: <https://heavycrane-ru.com/1-1-3-4ton-light-duty-crane-stsq4a.html> (accessed 09.25.2026).
13. Conveyors and elevators // Stroy-Tekhnika.ru : [website]. URL: <https://stroy-technics.ru/article/konveiry-i-elevatory> (accessed 03.25.2026).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чумак Сергей Петрович (ушел из жизни 4 ноября 2025 г.), д-р техн. наук, занимал должность главного научного сотрудника научно-исследовательского центра ВНИИ ГОЧС (ФЦ) (121352, Российская Федерация, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7); SPIN-код: 5245-0845.

Балин Дмитрий Николаевич, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра ВНИИ ГОЧС (ФЦ) (121352, Российская Федерация, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7); SPIN-код: 6228-0328; e-mail: dtp2006@mail.ru

Онищенко Юрий Анатольевич, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра ВНИИ ГОЧС (ФЦ) (121352, Российская Федерация, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7); SPIN-код: 2024-3051; e-mail: uao-630807@yandex.ru

Кузнецова Таисия Дмитриевна, научный сотрудник научно-исследовательского центра ВНИИ ГОЧС (ФЦ) (121352, Российская Федерация, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7); SPIN-код: 8567-6900; e-mail: kuznetcovatd@vniigochs.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey P. Chumak (deceased November 4, 2025), Doc. Sci. (Eng.), he held the position of Chief Researcher of the scientific research center of VNII GOChS (FC) (7 Davydkovskaya St., Moscow, 121352, Russian Federation); SPIN-code: 5245-0845.

Dmitry N. Balin, Senior Researcher of the scientific research center of VNII GOChS (FC) (7 Davydkovskaya St., Moscow, 121352, Russian Federation); SPIN-code: 6228-0328; e-mail: dtp2006@mail.ru

Yuri A. Onishchenko, Senior Researcher of the scientific research center of VNII GOChS (FC) (7 Davydkovskaya St., Moscow, 121352, Russian Federation); SPIN-code: 2024-3051; e-mail: uao-630807@yandex.ru

Taisiya D. Kuznetsova, Senior Researcher of the scientific research center of VNII GOChS (FC) (7 Davydkovskaya St., Moscow, 121352, Russian Federation); SPIN-code: 8567-6900; e-mail: kuznetcovatd@vniigochs.ru

УДК 004.8:551.515

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИНТЕГРАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ И СЛАБОФОРМАЛИЗОВАННЫХ ДАННЫХ

Шкерин Алексей Леонидович

МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Тропические циклоны и связанные с ними опасные гидрометеорологические процессы представляют угрозу для прибрежных территорий, морской деятельности, объектов транспортной и энергетической инфраструктуры. В ходе исследования применялись метеорологические, спутниковые и ретроспективные данные, представленные различными форматами и различной структурой. Исследуемая задача сформулирована как бинарное вероятностное прогнозирование события циклогенеза для пространственно-временного окна наблюдений. Сформирован общий набор примеров для горизонтов прогноза 24, 48 и 72 ч, реализован механизм пространственно-временного согласования и интеграции слабоформализованных данных в единый согласованный набор. Проведена оценка результатов работы моделей по ряду метрик: площадь под кривой ошибки (ROC-AUC), площадь под кривой полноты и точности (PR-AUC), индекс Брайера (Brier Score), вероятность обнаружения (POD), критический индекс успеха (CSI) и др. По результатам численного эксперимента сформирован набор из 2 568 пространственно-временных примеров для горизонтов прогноза 24, 48 и 72 ч. Модель из семейства мультимодальных сверточных сетей краткосрочной долгой памяти показала наибольшее значение метрики площади под кривой полноты и точности на горизонте 72 ч (0,517) и критический индекс успеха (0,367). Исследованные модели и разработанные алгоритмы позволили получить воспроизводимые вероятностные оценки циклогенеза на горизонтах прогноза до 72 ч. Эксперимент показал высокую информативность пространственно-временной интеграции слабоформализованных данных, в частности метеорологических, спутниковых и ретроспективных в задачах мониторинга и поддержки принятия решений.

Ключевые слова: безопасность в чрезвычайных ситуациях, тропический циклон, циклогенез, модели на основе искусственного интеллекта, ERA5, мультимодальные модели

Для цитирования: Шкерин А. Л. Прогнозирование динамики тропического циклона на основе методов пространственно-временной интеграции разнородных и слабоформализованных данных // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 188–206.

FORECASTING THE DYNAMICS OF TROPICAL CYCLONES USING METHODS OF SPATIOTEMPORAL INTEGRATION OF HETEROGENEOUS AND LOOSELY FORMALIZED DATA

Alexey L. Shkerin

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

Abstract. Tropical cyclones and the associated hazardous hydrometeorological processes pose a threat to coastal areas, maritime activities, and transportation and energy infrastructure. The study utilized meteorological, satellite, and retrospective data presented in various formats and with varying structures. The research problem is formulated as a binary probabilistic forecast of cyclogenesis for a spatiotemporal observation window. A general set of examples was formed for 24-, 48-, and 72-hour forecast horizons, and a mechanism for spatiotemporal harmonization and integration of weakly formalized data into a single harmonized dataset was implemented. The performance of the models was evaluated using a number of metrics, including Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (ROC-AUC), Area Under the Precision-Recall Curve (PR-AUC), Brier Score, Probability of Detection (POD), Critical Success Index (CSI), and several others. Based on the results of the numerical experiment, a set of 2,568 spatiotemporal examples was formed for forecast horizons of 24, 48, and 72 hours. A model from the family of multimodal Short-Term Long-Memory Convolutional Neural Networks showed the highest Area Under the Precision-Accuracy Curve metric at the 72-hour horizon, equal to 0.517, and the Critical Success Index, equal to 0.367. The investigated models and developed algorithms made it possible to obtain reproducible probabilistic estimates of cyclogenesis for forecast horizons up to 72 hours. The experiment demonstrated the high informational value of spatiotemporal integration of weakly formalized data, in particular meteorological, satellite, and retrospective data, in monitoring and decision support tasks.

Keywords: emergency safety, tropical cyclone, cyclogenesis, AI-based models, ERA5, multimodal models

For citation: Shkerin A. L. Forecasting the dynamics of tropical cyclones using methods of spatiotemporal integration of heterogeneous and loosely formalized data // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 188–206.

Введение

Тропические циклоны являются источниками гидрометеорологических явлений, представляющих потенциальную опасность для критической инфраструктуры и жизней людей, проживающих на приморских территориях. Воздействие подобных природных

явлений проявляется в резком усилении ветра, штормовом нагоне, нарушении транспортного сообщения, повреждении инженерных сооружений и возникновении условий для развития чрезвычайных ситуаций природного характера. В связи с этим задача раннего выявления циклогенеза имеет прикладное значение для обеспечения безопасности

в чрезвычайных ситуациях, предупреждения ущерба и поддержки принятия управленческих решений.

В отечественных исследованиях вопросы анализа тропических циклонов рассматривались в контексте оценки опасности тайфунов, обработки метеорологических данных и влияния тропических циклонов на территорию Дальнего Востока России. В частности, были рассмотрены подходы к анализу накопленной энергии тайфунов при исследовании чрезвычайных ситуаций, обусловленных активностью тропических циклонов, вопросы анализа метео данных с упорядоченным аргументом применительно к задачам техносферной безопасности и особенности эволюции тропических циклонов, оказывавших влияние на погодные условия Дальнего Востока России [1–3].

В отечественной практике предупреждения чрезвычайных ситуаций природного характера прогнозирование опасных гидрометеорологических явлений является межведомственной задачей: результаты специализированных гидрометеорологических наблюдений и краткосрочных прогнозов использовались органами управления РСЧС, территориальными подразделениями МЧС России, дежурно-диспетчерскими службами и службами спасения. Методические рекомендации МЧС России по мониторингу и прогнозированию чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера определяют мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций как элемент заблаговременного выявления угроз, оценки возможных последствий, подготовки решений по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций [4].

Росгидромет и подведомственные ему учреждения выполняют функцию эксперт-

ного источника гидрометеорологической информации, включая сведения о фактических и ожидаемых погодных условиях, опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях. К опасным метеорологическим явлениям относятся явления, которые по интенсивности, продолжительности и времени возникновения представляют угрозу безопасности людей и могут нанести значительный ущерб инфраструктуре на месте происшествия.

Для задач обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях важным является не только получение прогноза циклогенеза как атмосферного процесса, но и преобразование этого прогноза в информационно-аналитический признак возможного формирования источника чрезвычайных ситуаций. В настоящем исследовании рассмотрено применение вероятностной оценки циклогенеза в прикладных задачах, что позволяет предварительно выделить зоны повышенного внимания, требующие сопоставления с официальной информацией служб предупреждения и мониторинга чрезвычайных ситуаций.

Особое значение для задач предупреждения чрезвычайных ситуаций имеют системы раннего предупреждения, поскольку своевременная информация определяет возможность заблаговременного реагирования, уточнения зон возможного воздействия и подготовки сил и средств чрезвычайного реагирования. При этом эффективность раннего предупреждения зависит не только от факта прогнозирования, но и от корректной интерпретации спрогнозированных оценок, их применимости в действующих системах предупреждения чрезвычайных ситуаций и возможности преобразования результатов моделирования

в решения, обеспечивающие снижение риска негативных последствий чрезвычайных ситуаций [4].

Существенное значение для научного обоснования рассматриваемой задачи имели результаты отечественных исследователей Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН и организаций Росгидромета. В работах, связанных с опасными атмосферными конвективными явлениями, внимание уделялось мезомасштабным конвективным системам, ливневым осадкам, граду, шквалам, смерчам и предикторам, значимым для прогноза опасных явлений.

Исследования Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН были связаны с развитием моделей климатической системы, общей циркуляции атмосферы, океана и сопряженных компонентов Земной системы. Результаты, представленные в этих исследованиях, сформировали важную методологическую основу численного моделирования атмосферных процессов, однако их основное назначение заключалось в физико-математическом описании климатической и метеорологической динамики. В настоящем исследовании ключевой задачей является прикладная задача раннего выделения источника чрезвычайных ситуаций и поддержка принятий решений в системе предупреждения чрезвычайных ситуаций [5–7].

Современное развитие методов искусственного интеллекта создает предпосылки для более полного использования пространственно-временной структуры метеорологических и спутниковых данных. В зарубежных исследованиях были предложены модели глубокого обучения для обнаружения тропи-

ческих циклонов, прогнозирования циклогенеза по спутниковым данным и данным реанализа, интерпретации результатов машинного обучения при прогнозировании тропического циклогенеза.

Отдельное направление составляют модели на основе глубокого обучения для прогнозирования траекторий тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана. Данные модели были рассмотрены китайскими научными коллективами, в работе R. Zhang была предложена модель глубокого обучения для прогнозирования тропического циклогенеза по сеточным спутниковым данным в бассейне Тихого океана. Дальнейшие китайские исследования развивали это направление в сторону более сложных архитектур, в частности, модель TCGP-Net учитывала взаимодействие океана и атмосферы, а также включала элементы интерпретации результатов через причинный анализ и интегральные градиенты [8, 9].

В рамках проводимого исследования было выяснено, что отличия заключаются в цели применения и обучения подобных моделей, т. к. основное их применение рассматривается в прикладных задачах обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях. Так же стоит отметить, что обучение моделей, представленных в настоящем исследовании, проводится на интегрированном наборе слабоформализованных и слабоструктурированных мультимодальных данных, что не представлено в работах китайских исследователей.

Полученные в описанных исследованиях результаты показали перспективность нейросетевых моделей в задачах предупреждения чрезвычайных ситуаций, однако выявили проблему согласования

разнородных источников данных, различающихся пространственным разрешением, временной дискретизацией, физическим смыслом переменных и степенью формализации.

Для обработки пространственно-временных последовательностей в метеорологических задачах особую значимость приобрели архитектуры, способные одновременно учитывать пространственную структуру метеорологических полей и их временную динамику. К подобным архитектурам относятся сверточные нейронные сети краткосрочной долгой памяти (ConvLSTM). Для задач предупреждения чрезвычайных ситуаций подобные модели представляют интерес, поскольку признаки формирования циклона проявляются не только в отдельных значениях метеорологических переменных, но и в согласованной эволюции облачно-конвективной структуры, полей давления, скорости ветра, влажности и температуры поверхности моря [11–15].

Следует отметить, что применение моделей глубокого обучения в задачах раннего предупреждения требует не только достижения высокой точности классификации, но и прикладной оценки качества вероятностного прогнозирования. Для практического применения разработанных моделей в системах предупреждения чрезвычайных ситуаций важно правильно определить методы оценки полученных результатов. В связи с этим целесообразно рассматривать в первую очередь метрики, отражающие прикладную полезность разработанной модели, лишь затем оценивать метрики, традиционно используемые в машинном обучении [16].

Материалы и методы

В настоящем исследовании использовали три источника разнородных данных.

Первым источником является последовательность метеорологических полей пятого поколения реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ERA5), представляющая согласованные во времени и пространстве поля метеорологических переменных [17]. В ходе исследования были рассмотрены переменные температуры воздуха на высоте 2 м, точка росы на высоте 2 м, давление на уровне моря, компоненты ветра на высоте 10 м и температура поверхности моря.

Вторым источником данных является набор данных яркостной температуры в инфракрасном диапазоне по геостационарному каналу (GridSat-B1), в котором представлены данные геостационарных наблюдений в инфракрасном диапазоне [18].

Последним источником данных является набор данных из Международного архива наилучших треков в области рационального природопользования (IBTrACS), из которого были использованы характеристики: последовательность трека тропического циклона, географические координаты и время циклогенеза [19].

Выбранные данные представляют собой множество мультимодальных данных с разной временной и пространственной дискретизацией, что позволяет рассматривать комплексное состояние циклогенеза в целях раннего выявления чрезвычайных ситуаций.

Рассмотрим множество пространственно-временных окон наблюдений:

$$D = \{(X_i^{sat}, X_i^{era}, m_i, y_{i,H})\}_{i=1}^N, \quad H \in \{24, 48, 72\}, \quad (1)$$

где:

X_i^{sat} — последовательность спутниковых инфракрасных фрагментов из набора данных яркостной температуры в инфракрасном диапазоне по геостационарному каналу (GridSat-B1);

X_i^{era} — последовательность метеорологических полей пятого поколения реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ERA5);

m_i — метаданные прогнозного окна, включающие в себя момент времени $t_{0,i}$, координаты, идентификатор события, бассейн зарождения;

$y_{i,H}$ — бинарная метка циклогенеза для горизонта прогноза H .

Бинарная метка определена следующим образом:

$$y_{i,H} = \begin{cases} 1, & 0 < t_i^{gen} - t_{0,i} \leq H, \\ 0, & t_i^{gen} - t_{0,i} > H. \end{cases} \quad (2)$$

где t_i^{gen} — момент циклогенеза, определенный по трековой информации из IBTrACS.

Задача, передаваемая модели, сформирована следующим образом:

$$p_{i,H} = P_\theta(y_{i,H} = 1 | X_i^{sat}, X_i^{era}, m_i, H), \quad (3)$$

где:

P_θ — вероятностная модель с параметрами θ ;

θ — параметры модели.

Для модели, принимающей на вход только спутниковые изображения, вероятность вычисляется как:

$$p_{i,H} = f_{sat}(X_i^{sat}, \theta_{sat}), \quad (4)$$

где:

f_{sat} — модель для спутниковой постановки;

θ_{sat} — обучаемые параметры модели.

Для модели, использующей только метеорологические данные, вероятность вычисляется следующим соотношением:

$$p_{i,H} = f_{era}(X_i^{era}, \theta_{era}), \quad (5)$$

где:

f_{era} — модель для реаналитической постановки;

θ_{era} — обучаемые параметры модели.

Для модели, основанной на мультимодальных данных, использовалась следующая формула:

$$p_{i,H} = f_{fused}(\varphi_{sat}(X_i^{sat}), \varphi_{era}(X_i^{era}), m_i, \theta), \quad (6)$$

где:

$p_{i,H}$ — прогнозная вероятность циклогенеза для i -го пространственно-временного окна на горизонте H ;

f_{fused} — модель для мультимодальной постановки;

$\varphi_{sat}, \varphi_{era}$ — отображения признаков соответствующих модальностей.

Для обучения нейросетевых моделей в качестве функции потерь была использована бинарная кросс-энтропия:

$$L(\theta) = \frac{1}{N_H} \sum_{i=1}^{N_H} [y_{i,H} \log(p_{i,H}) + (1 - y_{i,H}) \log(1 - p_{i,H})], \quad (7)$$

где:

θ — обучаемые параметры модели;

N_H — число обучающих примеров;

$y_{i,H}$ — истинная бинарная метка;

$p_{i,H}$ — предсказанная моделью вероятность положительного класса;

$\varphi_{sat}, \varphi_{era}$ — отображения признаков соответствующих модальностей.

В качестве основной исследуемой архитектуры моделей использовались сверточные сети краткосрочной долгой памяти

(ConvLSTM). В общем виде состояние одной ячейки модели может быть описано системой (8):

$$\begin{cases} i_t = \sigma(W_{xi} * X_t + W_{hi} * H_{t-1} + b_i) \\ f_t = \sigma(W_{xf} * X_t + W_{hf} * H_{t-1} + b_f) \\ o_t = \sigma(W_{xo} * X_t + W_{ho} * H_{t-1} + b_o) \\ \tilde{C} = \text{th}(W_{xc} * X_t + W_{hc} * H_{t-1} + b_c) \\ C_t = f_t \circ C_{t-1} + i_t \circ \tilde{C}_{t-1} \\ H_t = o_t \circ \text{th}(C_t) \end{cases} \quad (8)$$

где:

i_t, f_t, o_t — входной, забывающий и выходной вентиля;

σ — сигмоидальная функция активации;

W_{x*}, W_{h*} — обучаемые сверточные ядра для входа и скрытого состояния;

$*$ — операция свертки;

X_t — входной пространственный тензор в момент времени t ;

H_t — скрытое состояние;

H_{t-1} — скрытое состояние на предыдущем временном шаге;

b_i, b_f, b_o, b_c — обучаемые смещения;

th — гиперболический тангенс;

C_t — состояние памяти;

$\circ$ — операция поэлементного произведения;

C_{t-1} — состояние памяти на предыдущем временном шаге;

$\tilde{C}_t$ — кандидатное состояние памяти.

Важными аспектами в применении описанной модели является воспроизводимость и достоверность полученных результатов, для чего в исследовании рассматривали следующие метрики верификации результатов: площадь под кривой ошибки (ROC-AUC), площадь под кривой полноты и точности (PR-AUC), индекс Брайера (Brier Score), ожидаемая ошибка калибровки (ECE), точность (Precision), полнота (Recall), F1-мера, вероятность обнаружения (POD), коэффициент ложных тревог (FAR), критический индекс успеха (CSI). Используемый при верификации набор исследуемых метрик позволяет удостовериться в точности полученных результатов с разносторонней оценкой. Обучение и проверку результатов моделей повторили несколько раз для установления статистической устойчивости полученных результатов.

Для преобразования рассчитанной вероятности к бинарной оценке использовали заданный порог τ_n , значение которого варьировали в зависимости от значения F1-меры на валидационной выборке.

Прикладной смысл введенного порога состоит в выделении окон, требующих повышенного внимания в системе мониторинга.

Для оперативного применения он может быть скорректирован в соответствии с требуемым значением допустимого уровня ложных тревог и требованиями конкретных метеорологических служб.

В актуальных системах мониторинга результат работы модели может быть представлен в виде формализованного сообщения для системы поддержки принятия решений: горизонт прогноза H , ч, координаты пространственного интервала, сектор потенциального воздействия, значения прогнозируемой вероятности, уровень риска. Подобная структура позволила использовать модель как вспомогательный прогнозно-аналитический компонент, дополняющий действующие процедуры мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера.

Для расчета предложенных метрик использовали результаты бинарной классификации, определенные через количество истинно положительных (TP), ложноположительных (FP), истинно отрицательных (TN) и ложноотрицательных (FN) решений. Из данных значений сформировали метрики точности, полноты и F1-меры:

$$\begin{aligned} \text{Precision} &= \frac{TP}{TP + FP} \\ \text{Recall} &= \frac{TP}{TP + FN} \\ F1 &= \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для задач раннего предупреждения ключевыми метриками являются POD, FAR и CSI; они задаются формулами (10):

$$\begin{aligned} \text{POD} &= \frac{TP}{TP + FN} \\ \text{FAR} &= \frac{FP}{TP + FP} \\ \text{CSI} &= \frac{TP}{TP + FN + FP}. \end{aligned} \quad (10)$$

Метрика POD характеризует долю обнаруженных опасных событий, FAR — долю ложных тревог среди выданных предупреждений, CSI — общий индекс успешности обнаружения с учетом пропусков и ложных тревог.

Данный набор метрик позволил корректно оценить пригодность разработанных моделей к предупреждению чрезвычайных ситуаций.

Для оценки вероятностной точности был использован индекс Брайера:

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - y_i)^2. \quad (11)$$

Калибровка вероятностей оценивается через метрику ECE:

$$ECE = \sum_{b=1}^B \frac{|I_b|}{N} |acc(I_b) - conf(I_b)|, \quad (12)$$

где:

I_b — множество примеров, попавших в интервал вероятности b ;

$acc(I_b)$ — фактическая частота положительных событий в интервале;

$conf(I_b)$ — средняя предсказанная вероятность.

Основной областью исследуемых источников являются регионы в интервале долгот 110–180° в. д. и интервале широт 0–45° с. ш. В этой области проводилась пространственно-временная интеграция использованных данных.

Отдельно выделена область потенциального воздействия на Дальневосточный регион. Для секторной диагностики обозначили следующие районы Дальневосточного региона:

- 1) Приморье,
- 2) Японское море,

- 3) Охотское море,
- 4) юг Камчатки,
- 5) Курило-Тихоокеанский сектор.

При попадании события в несколько секторов применяется фиксированный приоритет, который в настоящей работе определен согласно приведенному нумерованному списку.

На рис. 1 представлено графическое отображение принятой схемы интервалов и размечены границы исследуемых регионов.

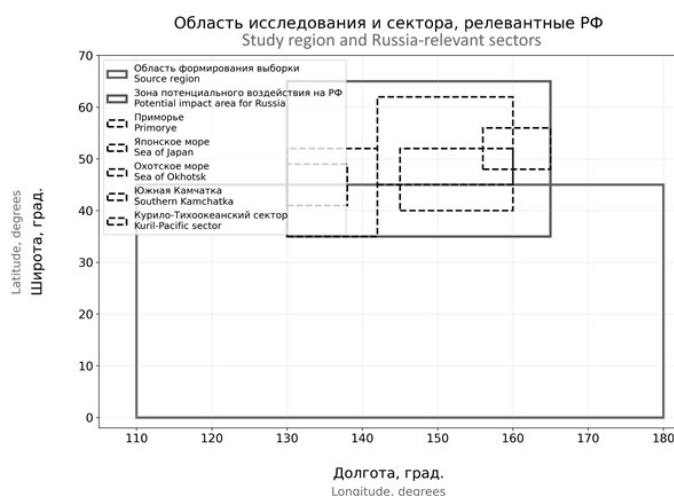


Рис. 1. Схема географической области исследования

Fig. 1. Map of the study area

В результате применения алгоритмов пространственно-временной интеграции сформировано 2 568 базовых пространственно-временных примеров. Для горизонтов прогноза 24, 48 и 72 ч сформирован набор из 7 704 строк, в исследуемой выборке отмечено 1 284 положительных события и 6 420 отрицательных.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены основные результаты верификации моделей на тестовой выборке.

Полученные результаты показывают, что модели глубокого обучения превосходят традиционный метод логистической регрессии по большинству ранжирующих и вероятностных метрик. На горизонтах прогноза 24 и 48 ч лучшие значения ROC-AUC и PR-AUC демонстрирует исследуемая модель, обученная исключительно на данных реанализа ERA5. На горизонте 72 ч наибольший PR-AUC равен 0,517 и достигается при использовании исследуемой модели, обученной на пространственно-временной интеграции исследуемых данных.

Таблица 1
Значения метрик исследуемых моделей

Table 1
Metrics for the models under study

Модель Model	ROC-AUC 24/48/72 ч ROC-AUC 24/48/72 h	PR-AUC 24/48/72 ч PR-AUC 24/48/72 h	BS 24/48/72 ч BS 24/48/72 h	ECE 24/48/72 ч ECE 24/48/72 h	Доля обнаружений Detection rate
Логистическая регрессия исключительно на данных ERA5 Logistic regression trained exclusively on ERA5 data	0,798/ 0,781/ 0,819	0,145/ 0,248/ 0,368	0,039/ 0,071/ 0,097	0,003/ 0,029/ 0,045	0,615
Сверточная сеть исключительно на данных GridSat-B1 Convolutional network trained exclusively on GridSat-B1 data	0,887/ 0,866/ 0,852	0,238/ 0,395/ 0,444	0,035/ 0,065/ 0,088	0,007/ 0,015/ 0,038	0,677
Предложенная модель, обученная исключительно на данных GridSat-B1 Proposed model trained exclusively on GridSat-B1 data	0,881/ 0,866/ 0,852	0,183/ 0,372/ 0,429	0,038/ 0,065/ 0,089	0,015/ 0,020/ 0,034	0,625
Предложенная модель, обученная исключительно на данных ERA5 Proposed model trained exclusively on ERA5 data	0,889/ 0,881/ 0,867	0,317/ 0,469/ 0,498	0,034/ 0,058/ 0,082	0,014/ 0,026/ 0,019	0,771
Предложенная модель, обученная на интегрированном наборе данных Proposed model trained on integrated data	0,876/ 0,857/ 0,874	0,232/ 0,433/ 0,517	0,036/ 0,061/ 0,082	0,005/ 0,027/ 0,032	0,708

На рис. 2 представлено графическое отображение метрики ROC-AUC для исследуемых моделей.

На рис. 3 представлено графическое отображение метрики PR-AUC для исследуемых моделей.

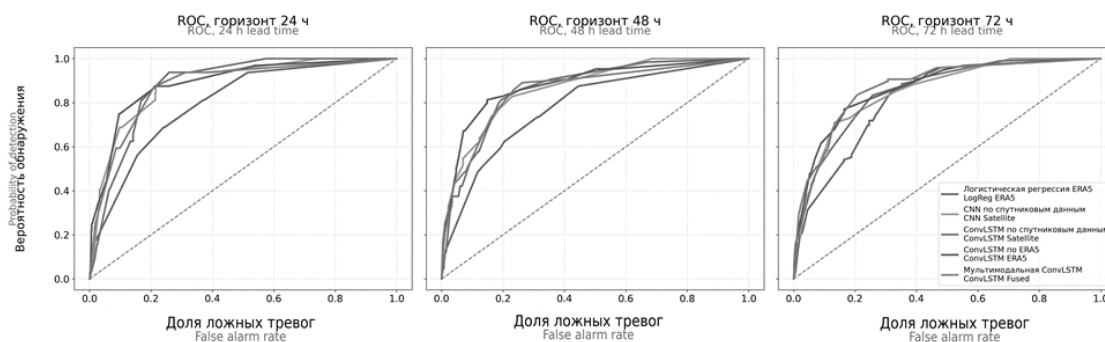


Рис. 2. ROC-кривые моделей на тестовой выборке для горизонтов прогноза 24, 48 и 72 ч. Сокращения, принятые в легенде: LogReg ERA5 — логистическая регрессия; CNN Satellite — сверточная сеть на спутниковых данных; ConvLSTM — предложенные модели на спутниковых, метеорологических и интегрированных данных

Fig. 2. ROC curves of the models on the test dataset for 24-, 48-, and 72-hour forecast horizons. Abbreviations used in the legend: LogReg ERA5 — logistic regression; CNN Satellite — Convolutional Neural Network based on satellite data; ConvLSTM — proposed models based on satellite, meteorological, and integrated data

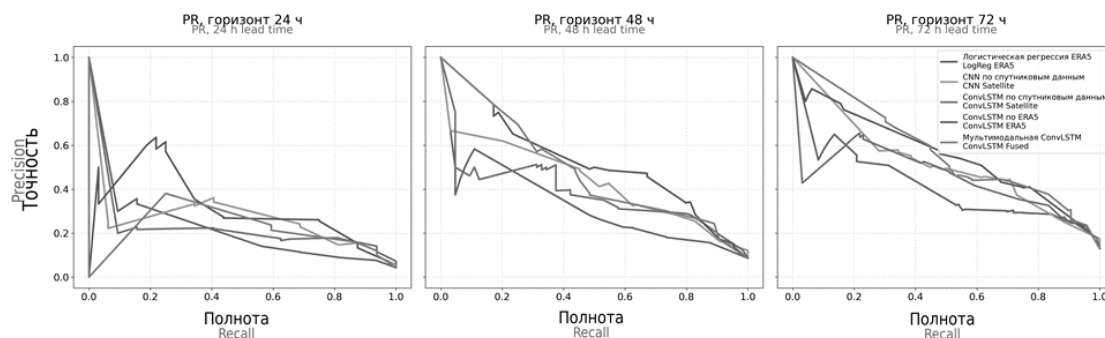


Рис. 3. PR-кривые моделей на тестовой выборке для горизонтов прогноза 24, 48 и 72 ч. Сокращения, принятые в легенде: LogReg ERA5 — логистическая регрессия; CNN Satellite — сверточная сеть на спутниковых данных; ConvLSTM — предложенные модели на спутниковых, метеорологических и интегрированных данных

Fig. 3. PR curves of the models on the test dataset for forecast horizons of 24, 48, and 72 hours. Abbreviations used in the legend: LogReg ERA5 — logistic regression; CNN Satellite — Convolutional Neural Network based on satellite data; ConvLSTM — proposed models based on satellite, meteorological, and integrated data

Из данных табл. 1, рис. 2 и 3 следует вывод о превосходстве предложенных моделей над традиционными. Для раннего преду-

ждения чрезвычайных ситуаций более информативны операционные метрики, показатели которых сведены в табл. 2.

Таблица 2
Значения операционных метрик для исследуемых моделей

Table 2
Values of operational metrics for the models under study

Модель Model	POD 24/48/72 ч 0,562/0,484/0,542	FAR 24/48/72 ч FAR 24/48/72 h	CSI 24/48/72 ч CSI 24/48/72 h
Логистическая регрессия исключительно на данных ERA5 Logistic regression trained exclusively on ERA5 data	0,562/ 0,484/ 0,542	0,859/ 0,718/ 0,673	0,127/ 0,217/ 0,256

Окончание таблицы 2

Модель Model	POD 24/48/72 ч 0,562/0,484/0,542	FAR 24/48/72 ч FAR 24/48/72 h	CSI 24/48/72 ч CSI 24/48/72 h
Сверточная сеть исключительно на данных GridSat-B1 Convolutional network trained exclusively on GridSat-B1 data	0,406/ 0,547/ 0,698	0,658/ 0,573/ 0,559	0,228/ 0,315/ 0,370
Предложенная модель, обученная исключительно на данных GridSat-B1 Proposed model trained exclusively on GridSat-B1 data	0,406/ 0,422/ 0,594	0,780/ 0,620/ 0,584	0,167/ 0,250/ 0,324
Предложенная модель, обученная исключительно на данных ERA5 Proposed model trained exclusively on ERA5 data	0,750/ 0,547/ 0,750	0,742/ 0,514/ 0,593	0,238/ 0,347/ 0,358
Предложенная модель, обученная на интегрированном наборе данных Proposed model trained on integrated data	0,594/ 0,484/ 0,677	0,765/ 0,617/ 0,555	0,202/ 0,272/ 0,367

Для приведения полученных результатов к прикладным значениям в задаче обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях было выполнено сопоставление предложенной методики с существующими подходами, применяемыми в отечественной и зарубежной практике прогнози-

рования чрезвычайных ситуаций. Сравнение проводилось с открытыми и известными моделями и информационными технологиями, используемыми в задачах предупреждения чрезвычайных ситуаций природного характера, сравнение представлено в табл. 3.

Таблица 3
Сравнение разработанных моделей с актуальными аналогами

Table 3
Comparison of developed model with actual analogues

Класс подходов Solution class	Назначение Usage	Сильные стороны Advances	Ограничения Limitations
Синоптические прогнозы Росгидромета Roshydromet's weather forecasts	Подготовка официальной информации о гидрометеорологическом явлении Preparation of official information on a hydrometeorological phenomenon	Нормативная информация, экспертная проверка, интегрировано в современные системы Regulatory information and expert review, integrated into modern systems	Не предоставляет вероятностного прогнозирования по каждому пространственно-временному окну Does not provide probabilistic forecasts for each spatiotemporal window
Численные гидродинамические модели атмосферы Numerical hydrodynamic models of the atmosphere	Физически обоснованное прогнозирование атмосферной динамики Physically-Based Forecasting of Atmospheric Dynamics	Высокая физическая интерпретируемость High physical interpretability	Высокая вычислительная сложность, чувствительность к начальным условиям High computational complexity, sensitivity to initial conditions

Окончание таблицы 3

Класс подходов Solution class	Назначение Usage	Сильные стороны Advances	Ограничения Limitations
Статистические модели Statistical models	Оценка связи и признаков чрезвычайной ситуации Assessment of communication and signs of an emergency	Простота, интерпретируемость Simplicity, interpretability	Не учитывают временной динамики и метеорологических полей Do not take into account temporal dynamics and meteorological fields
Сверточные нейронные сети на спутниковых данных CNN applied to satellite data	Выявление облачно-конвективных признаков Identification of cloud-convective features	Эффективная обработка спутниковых изображений Efficient processing of satellite images	Ограниченный учет временной динамики и метеорологических полей Limited consideration of temporal dynamics and meteorological fields
Предложенная модель Proposed model	Вероятностная оценка риска циклогенеза на горизонтах прогнозирования 24, 48 и 72 ч Probabilistic assessment of cyclogenesis risk at 24-, 48-, and 72-hour forecast horizons	Интеграция слабоформализованных и слабоструктурированных данных, формирование прикладных оценок Integration of weakly formalized and weakly structured data; generation of applied estimates	Не предоставляет всесторонний прогноз, требует калибровки под конкретный регламент применения Does not provide a comprehensive forecast, requires calibration for specific application guidelines

Таким образом, разработанная модель решает прикладную задачу, недостаточно раскрытую в классических метеорологических методах, связанных с предупреждением чрезвычайных ситуаций. Наиболее устойчивые значения метрик показывает предложенная модель, обученная только на данных ERA5, значения метрики POD для нее составило 0,75, предложенная модель, обученная на интегрированных данных, показала значения CSI 0,367, что является высоким показателем для исследуемой области.

Таким образом, по данным табл. 1–3 сделаны выводы о превосходстве предложенных моделей среди исследуемых моделей по ряду важных метрик. Примечательными являются частные случаи превосходства модели, обученной только на данных реанализа, над моделью, обученной на интегрированных данных.

Для оценки статистической устойчивости были проведены повторные запуски обучения и тестирования исследуемых моделей. На горизонте прогноза 72 ч для предложенной модели, обученной только на данных реанализа, метрика PR-AUC составила 0,505 с 95-процентным доверительным интервалом [0,389; 0,599], для модели, обученной на интегрированных данных, значение той же метрики составило 0,521 с 95-процентным доверительным интервалом [0,383; 0,621]. Для метрики ROC-AUC для тех же моделей на том же горизонте прогноза получены значения 0,868 и 0,875 с 95-процентным доверительным интервалом, [0,829; 0,913] и [0,834; 0,922], для моделей, обученных только на данных реанализа и на интегрированных данных соответственно.

Для Дальневосточного региона выборка данных содержала 77 окон на каждый прогнозный горизонт и 9 событий циклогенеза,

результаты исследования моделей приведены в табл. 4.

На исследуемой выборке наибольшую вероятность обнаружения так же получила предложенная модель, обученная только на спутниковых данных: модель показала наивысший результат на горизонте 72 ч, что говорит о высокой значимости и информативности облачно-конвективной струк-

туры при анализе отдельных российских регионов.

Результаты калибровки вероятности показывают улучшение согласования прогнозных вероятностей с наблюдаемыми частотами. Для предложенной модели на горизонте прогноза 72 ч значения метрик BS и ECE улучшились, результаты калибровки представлены на диаграмме достоверности (рис. 4).

Таблица 4

Значения метрики PR-AUC для Дальневосточного региона

Table 4

PR-AUC metric values for the Far East region

Модель Model	PR-AUC 24 ч PR-AUC 24 h	PR-AUC 48 ч PR-AUC 48 h	PR-AUC 72 ч PR-AUC 72 h	Доля обнаружений Detection rate
Логистическая регрессия исключительно на данных ERA5 Logistic regression trained exclusively on ERA5 data	0,390	0,647	0,898	0,556
Сверточная сеть исключительно на данных GridSat-B1 Convolutional network trained exclusively on GridSat-B1 data	0,349	0,709	0,905	0,593
Предложенная модель, обученная исключительно на данных GridSat-B1 Proposed model trained exclusively on GridSat-B1 data	0,380	0,688	0,960	0,630
Предложенная модель, обученная исключительно на данных ERA5 Proposed model trained exclusively on ERA5 data	0,515	0,716	0,889	0,704
Предложенная модель, обученная на интегрированном наборе данных Proposed model trained on integrated data	0,466	0,692	0,911	0,667

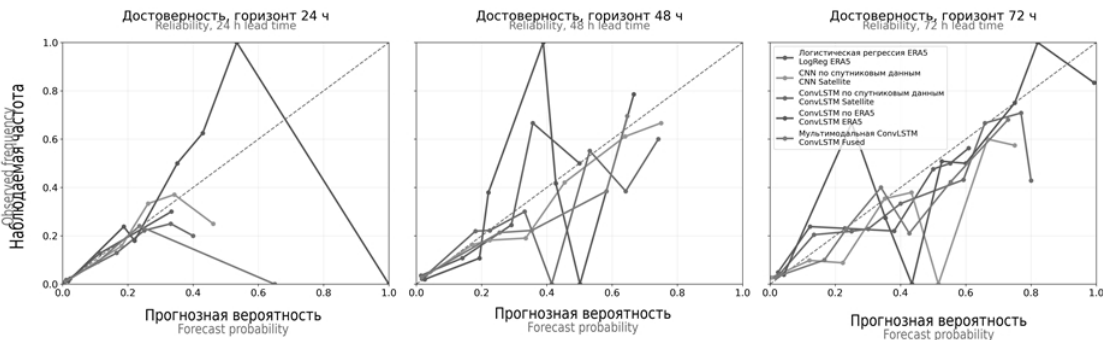


Рис. 4. Диаграммы достоверности исследуемых моделей на тестовой выборке для горизонтов прогноза 24, 48 и 72 ч. Сокращения, принятые в легенде: LogReg ERA5 — логистическая регрессия; CNN Satellite — сверточная сеть на спутниковых данных; ConvLSTM — предложенные модели на спутниковых, метеорологических и интегрированных данных

Fig. 4. Confidence plots for the models under study on the test dataset for 24-, 48-, and 72-hour forecast horizons. Abbreviations used in the legend: LogReg ERA5 — logistic regression; CNN Satellite — Convolutional Neural Network based on satellite data; ConvLSTM — proposed models based on satellite, meteorological, and integrated data

На рис. 4. представлено, что наиболее достоверными результатами обладают предложенные модели, обученные на данных ре-анализа и на интегрированных данных.

Заключение

В ходе исследования были разработаны модели с пространственно-временной интеграцией слабоформализованных и слабоструктурированных данных для вероятностной оценки риска тропического циклогенеза на горизонтах 24, 48 и 72 ч. Предложенные модели были рассмотрены в прикладном контексте обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях: как инструмент раннего выявления чрезвычайной ситуации и информационно-аналитической поддержки принятия решений.

В результате применения алгоритмов пространственно-временной интеграции был сформирован набор из 2 568 пространственно-временных интервалов. Для исследуемых горизонтов прогнозирования 24, 48 и 72 ч был получен общий набор из 7 704 строк, включавший 1 284 положительных и 6 420 отрицательных примеров. Полученные результаты показали, что нейросетевые модели оказались эффективнее по ряду метрик, ключевых для оценки применимости моделей в задачах раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций. На горизонте 72 ч предложенная модель, обученная на интегрированном наборе данных, показала наибольшее значение метрики PR-AUC, равное 0,517, и высокое значение метрики CSI, равное 0,367. Данные результаты указывают на прикладную значимость и применимость разработанной модели в актуальных системах мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Проведенный эксперимент продемонстрировал, что модель показала устойчивые и воспроизводимые результаты на горизонтах прогнозирования 24 и 48 ч, на горизонте прогнозирования 72 ч достоверность результата уменьшается согласно увеличению неопределенности данных.

Полученные в ходе проведенного исследования результаты позволяют сформулировать ряд важных выводов.

Разработанные в ходе исследования алгоритмы показали высокие результаты по метрикам, важным для оценки пригодности моделей в задаче предупреждения чрезвычайных ситуаций. Важно отметить, что предложенная модель обладает рядом преимуществ: объединение слабоформализованных и слабоструктурированных данных, формирование вероятностной оценки циклогенеза, прикладная интерпретация результатов, высокие результаты сценарной апробации на регионах Дальнего Востока.

Стоит отметить ограничения и недостатки модели: необходимость дополнительной проверки устойчивости на больших горизонтах прогнозирования, зависимость итоговой оценки от определяемого порога, необходимость использования большого количества данных для получения разносторонней информации о чрезвычайной ситуации, отсутствие готовых решений для интеграции разработанной модели в актуальные системы мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Практическая значимость 72-часового прогнозирования риска природных опасных явлений заключается в возможности заблаговременного выделения территорий, требующих повышенного внимания со стороны органов управления, дежурно-

диспетчерских служб и служб спасения. В организационном отношении разработанные модели могут быть использованы для предварительной мобилизации резервов материально-технических ресурсов, оценки возможной нагрузки на транспортную, энергетическую и прибрежную инфраструктуру.

В условиях современного этапа комплексных и гибридных угроз, включая сценарии преднамеренного воздействия на природно-технические системы, в частности технологии искусственного воздействия

на гидрометеорологические процессы, значение заблаговременного прогнозно-аналитического обеспечения возрастает.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на сопряжение разработанных моделей с геоинформационными слоями уязвимости территорий, данными о населении, критической инфраструктуры. Такое развитие позволит перейти от вероятностной оценки циклогенеза к всесторонней оценке риска чрезвычайной ситуации и повысить прикладную значимость прогнозируемых значений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малыгин И. Г., Калач А. В., Парамонов А. А. Почти-периодический анализ накопленной энергии тайфунов при исследовании развития чрезвычайных ситуаций, обусловленных активностью тропических циклонов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 3 (71). С. 55–62. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-55-62. EDN: IBPLCG.
2. Калач А. В., Парамонов А. А., Крынецкий Б. А. К вопросу анализа метеоданных с упорядоченным аргументом в аспекте решения задач техносферной безопасности // Технологии техносферной безопасности. 2024. № 3(105). С. 170–180. DOI: 10.25257/TTS.2024.3.105.170-180. EDN: HDQEJN.
3. Озерова Н. А. Исследование особенностей эволюции тропических циклонов, влияющих на погоду Дальнего Востока России // European Journal of Natural History. 2023. № 1. С. 29–34. EDN: ETWEOW.
4. Методические рекомендации МЧС России по мониторингу и прогнозированию чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / под ред. К. Д. Моськина. М., 2024. 168 с. URL: <https://clck.ru/aBgfJ> (дата обращения: 10.07.2026).
5. Towards the accurate automatic detection of mesoscale convective systems in remote sensing data: from data mining to deep learning models and their applications / M. Krinitskiy [et al.] // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 14. Art. 3493. DOI: 10.3390/rs15143493.
6. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения / Г. С. Ривин [и др.] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 37–53.
7. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН / Е. М. Володин [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 2. С. 164–178. DOI: 10.7868/S0002351517020122.

8. Predicting tropical cyclogenesis using a deep learning method from gridded satellite and ERA5 reanalysis data in the Western North Pacific Basin / R. Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. P. 1–10. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3069217.
9. A deep learning-based global tropical cyclogenesis prediction model and its interpretability analysis / B. Mu [et al.] // Science China Earth Sciences. 2024. Vol. 67. P. 3671–3695. DOI: 10.1007/s11430-023-1383-6.
10. Alcántara-Ayala I., Oliver-Smith A. Early Warning Systems: Lost in Translation or Late by Definition? A FORIN Approach // International Journal of Disaster Risk Science. 2019. Vol. 10. P. 317–331. DOI: 10.1007/s13753-019-00231-3.
11. Deep learning approach for detecting tropical cyclones and their precursors in the simulation by a cloud-resolving global nonhydrostatic atmospheric model / D. Matsuoka [et al.] // Progress in Earth and Planetary Science. 2018. Vol. 5. Art. 80. DOI: 10.1186/s40645-018-0245-y.
12. Loi C. L., Wu C.-C., Liang Y.-C. Prediction of Tropical Cyclogenesis Based on Machine Learning Methods and Its SHAP Interpretation // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2024. Vol. 16. Art. e2023MS003637. DOI: 10.1029/2023MS003637.
13. A Review on the Application of Machine Learning Methods in Tropical Cyclone Forecasting / Z. Wang [et al.] // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. Art. 902596. DOI: 10.3389/feart.2022.902596.
14. Forecasting tropical cyclone tracks in the northwestern Pacific based on a deep-learning model / L. Wang [et al.] // Geoscientific Model Development. 2023. Vol. 16. P. 2167–2179. DOI: 10.5194/gmd-16-2167-2023.
15. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting / X. Shi [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2015. Vol. 28. P. 802–810.
16. Loveday N., Taggart R., Khanarmuei M. A User-Focused Approach to Evaluating Probabilistic and Categorical Forecasts // Weather and Forecasting. 2024. Vol. 39. No. 8. P. 1163–1180. DOI: 10.1175/WAF-D-23-0201.1.
17. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
18. Globally gridded satellite observations for climate studies / K. R. Knapp [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. Vol. 92. No. 7. P. 893–907. DOI: 10.1175/2011BAMS3039.1.
19. The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data / K. R. Knapp [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. Vol. 91. No. 3. P. 363–376. DOI: 10.1175/2009BAMS2755.1.

REFERENCES

1. Malygin I. G., Kalach A. V., Paramonov A. A. Near-Periodic Analysis of Typhoon Accumulated Energy for Emergencies Caused by Tropical Cyclone Activity // Risk Management Problems in the Technosphere. 2024. No. 3 (71). P. 55–62. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-55-62. EDN: IBPLCG.
2. Kalach A. V., Paramonov A. A., Krynetsky B. A. On the Analysis of Meteorological Data with an Ordered Argument for Solving Technosphere Safety Problems // Technosphere Safety Technologies. 2024. No. 3 (105). P. 170–180. DOI: 10.25257/TTS.2024.3.105.170-180. EDN: HDQEJN.

3. Ozerova N. A. Evolution of Tropical Cyclones Affecting the Russian Far East Weather // *European Journal of Natural History*. 2023. No. 1. P. 29–34. EDN: ETWEOW.
4. *Methodological Recommendations of EMERCOM of Russia on Monitoring and Forecasting Natural and Technogenic Emergencies* / edited by K. D. Moskin. Moscow, 2024. 168 p. URL: <https://clck.su/aBgfJ> (accessed 10.07.2026).
5. Towards the accurate automatic detection of mesoscale convective systems in remote sensing data: from data mining to deep learning models and their applications / M. Krinitskiy [et al.] // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. No. 14. Art. 3493. DOI: 10.3390/rs15143493.
6. COSMO-Ru High-Resolution Short-Range Numerical Weather Prediction System: Its Development and Applications / G. S. Rivin [et al.] // *Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2019. No. 4 (374). P. 37–53.
7. Simulation of Modern Climate with the New Version of the INM RAS Climate Model / E. M. Volodin // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Vol. 53. No. 2. P. 164–178. DOI: 10.7868/S0002351517020122.
8. Predicting tropical cyclogenesis using a deep learning method from gridded satellite and ERA5 reanalysis data in the Western North Pacific Basin / R. Zhang [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. Vol. 60. P. 1–10. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3069217.
9. A deep learning-based global tropical cyclogenesis prediction model and its interpretability analysis / B. Mu [et al.] // *Science China Earth Sciences*. 2024. Vol. 67. P. 3671–3695. DOI: 10.1007/s11430-023-1383-6.
10. Alcántara-Ayala I., Oliver-Smith A. Early Warning Systems: Lost in Translation or Late by Definition? A FORIN Approach // *International Journal of Disaster Risk Science*. 2019. Vol. 10. P. 317–331. DOI: 10.1007/s13753-019-00231-3.
11. Deep learning approach for detecting tropical cyclones and their precursors in the simulation by a cloud-resolving global nonhydrostatic atmospheric model / D. Matsuoka [et al.] // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2018. Vol. 5. Art. 80. DOI: 10.1186/s40645-018-0245-y.
12. Loi C. L., Wu C.-C., Liang Y.-C. Prediction of Tropical Cyclogenesis Based on Machine Learning Methods and Its SHAP Interpretation // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2024. Vol. 16. Art. e2023MS003637. DOI: 10.1029/2023MS003637.
13. A Review on the Application of Machine Learning Methods in Tropical Cyclone Forecasting / Z. Wang [et al.] // *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. Art. 902596. DOI: 10.3389/feart.2022.902596.
14. Forecasting tropical cyclone tracks in the northwestern Pacific based on a deep-learning model / L. Wang [et al.] // *Geoscientific Model Development*. 2023. Vol. 16. P. 2167–2179. DOI: 10.5194/gmd-16-2167-2023.
15. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting / X. Shi [et al.] // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2015. Vol. 28. P. 802–810.
16. Loveday N., Taggart R., Khanarmuei M. A User-Focused Approach to Evaluating Probabilistic and Categorical Forecasts // *Weather and Forecasting*. 2024. Vol. 39. No. 8. P. 1163–1180. DOI: 10.1175/WAF-D-23-0201.1.
17. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

18. Globally gridded satellite observations for climate studies / K. R. Knapp [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. Vol. 92. No. 7. P. 893–907. DOI: 10.1175/2011BAMS3039.1.

19. The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data / K. R. Knapp [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. Vol. 91. No. 3. P. 363–376. DOI: 10.1175/2009BAMS2755.1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шкерин Алексей Леонидович, ассистент кафедры прикладной математики Института информационных технологий МИРЭА — Российского технологического университета (119454, Российская Федерация, г. Москва, просп. Вернадского, д. 78); РИНЦ ID: 1212098; Researcher ID: 154232; ORCID: 0009-0004-2839-4731; e-mail: le.hkerin@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexey L. Shkerin, Assistant at the Department of Applied Mathematics of Institute of Information Technologies, MIREA — Russian Technological University (78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, Russian Federation); ID RSCI: 1212098; Researcher ID: 154232; ORCID: 0009-0004-2839-4731; e-mail: le.hkerin@yandex.ru

УДК 614.8:613.2

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОТРУДНИКОВ СПАСАТЕЛЬНЫХ СЛУЖБ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Алексеева Екатерина Ивановна¹, Антонова Ильвира Илгизовна², Гумеров Тимофей Юрьевич¹,
Насырова Екатерина Андреевна³

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполев–КАИ,
г. Казань, Российская Федерация

² Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская
Федерация

³ Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань,
Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена деятельности спасателей МЧС России в условиях чрезвычайных ситуаций, сопряженных с экстремальными нагрузками, нерегулярным режимом питания и воздействием экстремальных температур в Арктической зоне и странах с жарким климатом. Отмечены повышенные требования к продовольственному обеспечению как ключевому фактору сохранения профессионального здоровья спасателей. В работе представлены практические рекомендации по интеграции нового пищевого продукта в систему продовольственного обеспечения с учетом нормативной базы и результатов исследований ведущих учреждений МЧС России. На основе анализа гуманитарных миссий МЧС России в Ливии, Сербии, на Кубе и в Мьянме выделены специфические факторы, определяющие требования к питанию спасателей. Выявлено, что действующие нормы продовольственного обеспечения спасателей, включая арктические рационы, не в полной мере компенсируют дефицит пищевых волокон, антиоксидантов и полифенолов, критически важных для поддержания работоспособности в экстремальных условиях. Расчетным способом подтверждена детоксикационная, пребиотическая, антиоксидантная и противовоспалительная эффективность предлагаемого продукта. Интегральный показатель функциональной эффективности свидетельствует о высоком положительном эффекте компонентов. Разработанный продукт рекомендован для включения в арктические рационы и промежуточные пайки.

Ключевые слова: безопасность в чрезвычайных ситуациях, гуманитарная миссия, питание спасателей, функциональная эффективность, арктические рационы, работоспособность, промежуточные пайки

Для цитирования: Повышение эффективности профессиональной деятельности сотрудников спасательных служб за счет оптимизации продовольственного обеспечения / Е. И. Алексеева [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 207–229.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PROFESSIONAL ACTIVITY OF RESCUE SERVICE EMPLOYEES BY OPTIMIZING FOOD SUPPLY

Ekaterina I. Alekseeva¹, Ilvira I. Antonova², Timofey Yu. Gumerov¹, Ekaterina A. Nasyrova³

¹ KNRTU–KAI, Kazan, Russian Federation

² KSUAE, Kazan, Russian Federation

³ KNRTU, Kazan, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the activities of EMERCOM of Russia rescuers in emergency situations associated with extreme loads, irregular nutrition, and exposure to extreme temperatures in the Arctic zone and countries with hot climates. Increased requirements for food supply as a key factor in maintaining the occupational health of rescuers are noted. The paper presents practical recommendations for the integration of a new food product into the food supply system, taking into account the regulatory framework and research results of leading institutions of EMERCOM of Russia. Based on the analysis of humanitarian missions of EMERCOM of Russia in Libya, Serbia, Cuba and Myanmar, specific factors determining the requirements for nutrition of rescuers are identified. It was found that the current norms of food supply for rescuers, including Arctic rations, do not fully compensate for the deficiency of dietary fiber, antioxidants and polyphenols, which are critical for maintaining performance in extreme conditions. The detoxification, prebiotic, antioxidant and anti-inflammatory effectiveness of the proposed product has been confirmed by calculation. The integral indicator of functional effectiveness indicates a high positive effect of the components. The developed product is recommended for inclusion in Arctic rations and intermediate rations.

Keywords: emergency safety, humanitarian mission, nutrition of rescuers, functional effectiveness, Arctic rations, working capacity, intermediate rations

For citation: Improving the efficiency of professional activity of rescue service employees by optimizing food supply / E. I. Alekseeva [et al.] // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 208–229.

Введение

Обеспечение безопасности сотрудников спасательных служб в ходе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций является комплексной задачей, включающей не только технические и организационные аспекты, но и медико-биологическое сопровождение. Работа спасателя сопряжена с воздействием комплекса неблагоприятных факторов: высокими физическими нагрузками, психоэмоциональным напряжением, нере-

гулярным режимом труда и отдыха, сложными климатическими условиями [1, 2]. В таких обстоятельствах питание перестает быть просто источником энергии и превращается в ключевой фактор, определяющий выносливость, скорость реакции, устойчивость к стрессу и риск развития профессиональных заболеваний [3, 4].

В последние десятилетия в мировой и отечественной науке сформировалась парадигма функционального питания, рассматривающая рацион как инструмент

целенаправленной коррекции гомеостаза при экстремальных воздействиях. Фундаментальное значение для развития этого направления имеет монография «Функциональное питание человека при экстремальных воздействиях» под редакцией академика РАН В. С. Новикова (2017), в которой обоснован модульный принцип функционального питания [5]. Нормативная база продовольственного обеспечения в системе МЧС России регламентируется семью основными видами пайков [6]. Однако существующие сбалансированные по макронутриентам рационы не всегда способны компенсировать специфические метаболические сдвиги, возникающие при работе в экстремальных условиях. Дефицит витаминов группы В, антиоксидантов, минералов и пищевых волокон ведет к снижению иммунитета, замедлению восстановительных процессов и ухудшению когнитивных функций [7, 8].

Цель работы — обоснование практических рекомендаций по интеграции в систему продовольственного обеспечения МЧС России нового пищевого продукта, предназначенного для оптимизации питания сотрудников спасательной службы с учетом специфики различных экстремальных условий.

Задачи исследования:

1. Провести разбор современной системы продовольственного обеспечения спасателей МЧС России, включая новые арктические рационы (нормы № 7 и 8).

2. Проанализировать специфику питания спасателей при гуманитарных миссиях (на примере землетрясения в Мьянме в 2025 г., наводнений в Ливии в 2023 г. и Сербии в 2024 г., урагана на Кубе в 2024 г.).

3. Разработать рецептуру пищевого продукта повышенной пищевой ценности

с обоснованием выбора каждого ингредиента.

4. Оценить безопасность разработанного пищевого продукта и доказать его функциональную эффективность в соответствии с действующими в РФ нормативами.

5. Предложить практические рекомендации по внедрению разработанного продукта.

Материалы и методы

На первом (обзорно-аналитическом) этапе работы рассмотрены научно-техническая литература и нормативные документы, регламентирующие питание спасателей (приказы МЧС России № 768 от 23.12.2019, № 290 от 29.04.2013, постановление Правительства РФ № 946, проект арктических рационов 2024–2025 гг.), а также изучены физиологические особенности энергозатрат при выполнении работ различной категории сложности.

Проанализированы результаты исследований ведущих учреждений МЧС России и профильных научных работ, в частности диссертационного исследования Н. Н. Кириченко, посвященного макронутриентному статусу военнослужащих в экстремальных условиях Арктики, Всероссийского центра экстренной и радиационной медицины имени А. М. Никифорова, Санкт-Петербург (ВЦЭРМ им. А. М. Никифорова); Академии гражданской защиты, Химки; Дальневосточного федерального университета, Владивосток (ДВФУ), Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева (кафедра Промышленной и экологической безопасности) и Северо-Кавказского федерального университета, Ставрополь (СКФУ), в области оптимизации питания спасателей. По итогам

первого этапа сформулированы требования к составу и функциональным свойствам разрабатываемого продукта.

На втором (экспериментально-расчетном) этапе представлен состав пищевого продукта с лабораторным обоснованием показателей качества и безопасности.

Объект исследования — пищевой продукт на основе пшеничной муки I сорта с добавлением клетчатки яблочной и из семян амаранта сорта «кизлярец», сушеной вишни, порошка имбиря, орегано, молока и сливочного масла. Технология производства защищена патентом РФ № 2823337 [9].

Санитарно-химические и микробиологические показатели определяли в аккредитованной лаборатории согласно ГОСТ 34140–2017, ГОСТ 31653–2012, ГОСТ 33824–2016, МУ 5178–90, ГОСТ 31747–2012, ГОСТ 31659–2024, ГОСТ 10444.12–2013, ГОСТ 33536–2015, МУК 2.6.1.1194–2003, МУК 4.2.1847–04. Пищевую ценность рассчитывали по справочным таблицам и сопоставляли с нормами физиологических потребностей (МР 2.3.1.0253–21). Органолептическую оценку проводили дегустационной комиссией по 5-балльной шкале в контрольные точки: 1, 15, 30, 45 и 54 сутки хранения.

Функциональную эффективность оценивали расчетными методами в соответствии с действующими нормативными документами: ГОСТ 29186–91, ГОСТ Р 54014–2010, ГОСТ Р 57975–2017, ГОСТ Р 57132–2016, МУ 2.3.2.2789–10, МУ 2.3.7.3693–21.

Результаты и их обсуждение

Анализ дефицитов в действующих рационах питания спасателей

Арктический вектор. Работа спасателей в Арктической зоне Российской Федерации

характеризуется комплексом экстремальных факторов, предъявляющих особые требования к продовольственному обеспечению. Согласно данным ВЦЭРМ им. А. М. Никифорова и результатам диссертационного исследования Н. Н. Кириченко, к числу таких факторов относятся: экстремально низкие температуры воздуха (до -50°C и ниже), нарушение фотопериодичности (полярная ночь / полярный день), повышенные энерготраты (на 10–15 % выше, чем в средней полосе), гипоксия, воздействие ультрафиолетового излучения на фоне высокой отражающей способности снежного покрова [10, 11].

В 2024–2025 гг. в рамках реализации «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.» МЧС России инициировало пересмотр норм продовольственного обеспечения. Ключевым нововведением стало утверждение двух специализированных арктических рационов: норма № 7 «Арктический рацион» и норма № 8 «Арктический рацион (промежуточный)».

В табл. 1 представлена сравнительная характеристика базового и арктического рационов, демонстрирующая принципиальные различия в энергетической ценности и составе.

Анализ состава арктических рационов показывает, что их энергетическая ценность повышена преимущественно за счет увеличения доли жиров (соотношение Б : Ж : У : 1 : 1,5 : 3,5 вместо 1 : 1 : 4), что является физиологически обоснованным, поскольку жиры — наиболее энергоемкий компонент пищи. В рацион введены специализированные продукты: три вида протеиновых батончиков (с молоком, энергетический,

с мясом и печенью), БАД «Согревающий сбор», кисели «согревающий» и «общеукрепляющий», а также поливитамины.

Для обоснования необходимости разработки специализированного продукта

также был проведен анализ содержания ключевых функциональных компонентов — пищевых волокон, антиоксидантов и полифенолов — в базовых и арктических рационах (табл. 2).

Таблица 1
Сравнительная характеристика продовольственных рационов спасателей

Table 1
Comparative characteristics of food rations for rescuers

Критерии Criteria	Базовый рацион (норма № 2) Basic ration (ration No. 2)	Арктический рацион (норма № 7) Arctic ration (norm No. 7)
Энергетическая ценность, ккал/сут. Energy value, kcal/day	2 650–2 750	3 200–3 400
Соотношение Б : Ж : У Ratio P : F : C	1 : 1 : 4	1 : 1,5 : 3,5
Специализированные продукты Specialized products	Отсутствуют None	Протеиновые батончики (3 вида), БАД «Согревающий сбор», поливитамины Protein bars (3 types), dietary supplement "Warming collection", multivitamins

Таблица 2
Содержание функциональных компонентов в различных рационах

Table 2
Content of functional components in various diets

Критерии Criteria	Базовые рационы (норма № 1–7) Basic rations (rations No. 1–7)	Арктические рационы (нормы № 7, 8) Arctic rations (norms No. 7, 8)	Рекомендуемая норма [9] Recommended norm [9]
Пищевые волокна, г/сут. Dietary fiber, g/day	8–12	12–15	20–30
Дефицит пищевых волокон, % Fiber deficiency, %	40–60	25–50	—
Антиоксиданты, мкмоль ТЕ / сут. Antioxidants, μmol TE/day	1 200–1 800	1 800–2 500	3 000–5 000 [12]
Дефицит антиоксидантов, % Antioxidant deficiency, %	60–64	40–50	—
Полифенолы, мг/сут. Polyphenols, mg/day	200–400	300–500	800–1 500 [12]
Дефицит полифенолов, % Polyphenol deficiency, %	50–75	50–67	—

Полученные данные свидетельствуют:

1) о недостаточном количестве пищевых волокон, фактическое потребление которых спасателями в полевых условиях составляет 8–12 г/сут. при норме 20–30 г/сут. Дефицит достигает 50–60 %, что при длительной работе в Арктике может приводить к нарушению моторики кишечника, дисбиозу и снижению детоксикационной функции организма;

2) об отсутствии стандартизированных источников полифенольных соединений (до 75 %). Антоцианы, флавоноиды и другие полифенолы обладают доказанной антигипоксической и радиопротекторной активностью [3], что особенно важно в условиях Арктики, где спасатели подвергаются воздействию повышенного уровня космической радиации и ультрафиолетового излучения;

3) о недостаточном обеспечении антиоксидантами (до 64 %). При высоких энергозатратах и окислительном стрессе, индуцированном холодовым воздействием, потребность в антиоксидантах возрастает в 1,5–2 раза. Существующие арктические рационы не содержат стандартизированных источников антиоксидантов, а поливитаминные препараты не всегда обеспечивают достаточный уровень защиты;

4) о недосмотре сортовых особенностей растительного сырья. Включение в рационы продуктов на основе амаранта, облепихи, шиповника требует учета сортовых различий, поскольку содержание биологически активных веществ (скалена, каротиноидов, флавоноидов) может варьировать в 2–3 раза в зависимости от сорта и условий культивирования [12, 13].

Гуманитарные миссии (на примере ликвидации последствий природных чрезвычайных ситуаций). Международная гума-

нитарная деятельность МЧС России является одним из приоритетных направлений внешней политики Российской Федерации. За период 2023–2026 гг. МЧС России выполнило более 30 гуманитарных операций в 17 зарубежных странах, включая доставку гуманитарных грузов, проведение аварийно-спасательных работ, развертывание полевых госпиталей и участие в тушении природных пожаров [4, 11]. Анализ наиболее масштабных гуманитарных миссий позволяет выделить универсальные факторы, определяющие требования к питанию спасателей, работающих в различных климатических и санитарно-эпидемиологических условиях.

В сентябре 2023 г. циклон «Даниэль» вызвал катастрофическое наводнение на северо-востоке Ливии. В зону бедствия были направлены три спецборта Ил-76 МЧС России, доставлено 30 т гуманитарного груза (палатки, одеяла, передвижные электростанции, аварийно-спасательные комплекты), работал аэромобильный госпиталь отряда «Центроспас». Спасатели обследовали более 3 км² зоны бедствия, извлекли тела более 110 погибших, оказали помощь 35 пострадавшим.

Специфические факторы: температура воздуха > 30 °C, высокая влажность, риск инфекционных заболеваний, психотравмирующее воздействие (число жертв: > 11 тыс. человек).

В мае 2024 г. сильное наводнение охватило значительную территорию Сербии. В затопленный город Обреновац менее чем через сутки после начала бедствия прибыли 76 спасателей МЧС России. За двое суток эвакуировано 2 166 человек, в т. ч. 576 детей. Доставлено 67 т гуманитарного груза (насосы для откачки воды, передвижные электростанции, лодки, одеяла, консервы), два

вертолета Ка-32 использовались для поиска и спасения на воде.

Специфические факторы: работа на воде, необходимость быстрой эвакуации, взаимодействие с местными властями.

В ноябре 2024 г. ураган «Рафаэль» (3-й уровень опасности из 5, скорость ветра до 180 км/ч) оставил без электричества 4 млн кубинцев. Глава МЧС России лично координировал доставку гуманитарного груза: фильтров для воды, санитарных сумок, продуктов питания, медикаментов.

Специфические факторы: жаркий влажный климат, нарушение инфраструктуры, высокая потребность в чистой воде и средствах санитарии.

В марте 2025 г. землетрясение в Мьянме магнитудой 7,7 с серией последующих афтершоков унесло жизни более 3,4 тыс. человек, было ранено более 4,8 тыс. Российская Федерация направила 264 спа-

сателя МЧС России, 68 т гуманитарного груза (продукты питания, палатки, генераторы), полевой госпиталь. Спасатели работали в условиях разрушенной инфраструктуры в координации с международными партнерами (Беларусь, Китай, Индия, Малайзия, Филиппины, Сингапур, Таиланд).

Специфические факторы: жаркий климат (температура до +42 °С), психотравмирующее воздействие, работа в две-три смены, инфекционные риски, логистические ограничения.

Анализ представленных миссий позволяет выделить общие факторы, определяющие требования к питанию спасателей: необходимость обеспечения антиоксидантной защиты при работе в жарком климате, пребиотической поддержки для профилактики кишечных инфекций, а также компактности и длительного срока хранения продуктов (табл. 3).

Таблица 3

Факторы, определяющие требования к питанию спасателей

Table 3

Factors determining the nutritional requirements of rescuers

Фактор Factor	Проявление Manifestation	Требования к питанию Nutritional requirements
Климатогеографический стресс Climatic stress	Жаркий влажный климат (Мьянма, Ливия, Куба: температура до +42 °С) Hot humid climate (Myanmar, Libya, Cuba: temperatures up to +42 °C)	Повышенная потребность в электролитах, усиленная антиоксидантная защита (ORAC > 300 мкмоль ТЕ / 100 ккал) Increased electrolyte requirements, enhanced antioxidant protection (ORAC > 300 μmol TE / 100 kcal)
Нарушение циркадных ритмов Circadian rhythm disruption	Работа в две-три смены, в ночное время, при искусственном освещении Work in two or three shifts, at night, under artificial lighting	Необходимость адаптогенных компонентов (гингеролы, сквален), поддержка мелатонинового обмена Need for adaptogenic components (gingerols, squalene), melatonin metabolism support
Психотравмирующее воздействие Psychotraumatic impact	Массовые разрушения, большое число погибших (Ливия: > 11 тыс.; Мьянма: > 3,4 тыс.) Massive destruction, high death toll (Libya: > 11.000; Myanmar: > 3.400)	Катаболическая направленность метаболизма, повышенная потребность в белке и антиоксидантах Catabolic metabolism, increased protein and antioxidant requirements

Окончание таблицы 3

Фактор Factor	Проявление Manifestation	Требования к питанию Nutritional requirements
Инфекционные риски Infectious risks	Антисанитарные условия, контакт с пострадавшими, работа с водой Unsanitary conditions, contact with victims, working with water	Пребиотическая поддержка (пищевые волокна, $PI > 1,0$), иммуномодуляторы (сквален, лизин) Prebiotic support (dietary fiber, $PI > 1.0$), immunomodulators (squalene, lysine)
Логистические ограничения Logistical limitations	Питание на себя в первые сутки, непрерывное питание сухими пайками > 7 суток [11] Food for yourself during the first day, continuous dry rations for > 7 days [11]	Компактные продукты длительного хранения (> 30 суток), высокая пищевая плотность (≥ 270 ккал / 100 г) Compact products with a long shelf life (> 30 days), high nutritional density (≥ 270 kcal / 100 g)

Разработка и обоснование состава пищевого продукта для спасателей

Авторами статьи предложен пищевой продукт длительного срока хранения,

с высокой энергетической ценностью, заданными антиоксидантной и противовоспалительной активностью, пребиотической и адаптогенной эффективностью (табл. 4).

Таблица 4
Соответствие разработанного продукта требованиям гуманитарных миссий

Table 4

Compliance of the developed product with the requirements of humanitarian missions

Требования Requirement	Значение Value	Реализация в продукте Implementation in the product
Длительный срок хранения Long shelf life	> 30 суток > 30 days	54 дня (подтверждено экспериментально) 54 days (experimentally confirmed)
Высокая энергетическая плотность Logistical limitations	> 250 ккал / 100 г > 250 kcal / 100 g	270 ккал / 100 г 270 kcal / 100 g
Антиоксидантная защита Antioxidant protection	ORAC > 300 мкмоль ТЕ / 100 ккал ORAC $> 300 \mu\text{mol TE}/100 \text{ kcal}$	568,5 мкмоль ТЕ / 100 ккал 568.5 $\mu\text{mol TE} / 100 \text{ kcal}$
Пребиотическая поддержка Prebiotic support	$PI > 1,0$	$PI = 1,35$
Противовоспалительное действие Anti-inflammatory effect	Полифенолы > 500 мг/сут. Polyphenols $> 500 \text{ mg/day}$	1 070 мг / 100 г 1 070 mg / 100 g
Адаптогенный эффект Adaptogenic effect	Наличие сквалена, гингеролов Presence of squalene, gingerols	Сквален 18,5 мг / 100 г, гингеролы (имбирь) Squalene 18.5 mg/100 g, gingerols (ginger)
Детоксикационная функция Detoxification function	Пектин > 5 г / 100 г Pectin $> 5 \text{ g} / 100 \text{ g}$	7,07 г пектина / 100 г 7.07 g pectin / 100 g

Характеристика разработанного продукта. Для обеспечения сбалансированного поступления функциональных компонентов,

необходимых спасателям при выполнении аварийно-спасательных работ, была разработана рецептура продукта, сочетающего

пищевые волокна, антиоксиданты и полноценный белок [9]. В табл. 5 представлен количественный состав ингредиентов, обеспечивающий заявленные функциональные свойства.

Предложенная рецептура обеспечивает высокое содержание пищевых волокон (28,2 г / 100 г) и полифенольных соединений, что подтверждает функциональную направленность продукта.

Таблица 5
Рецептура пищевого продукта
Table 5
Food product recipe

Наименование Name	Расход, кг Consumption, kg	Наименование Name	Расход, кг Consumption, kg	Наименование Name	Расход, кг Consumption, kg
Мука, 1 сорт First-grade flour	32,4	Вишня сушеная Dried cherries	7,6	Масло сливочное Butter	10,0
Клетчатка яблочная Apple fiber	15,7	Имбирь (порошок) Ginger (powder)	3,5	Молоко коровье Cow's milk	14,3
Клетчатка из семян амаранта Amaranth seed fiber	12,5	Орегано Oregano	1,5	Сахар Sugar	1,7
				Соль Salt	0,8
Итого сырья, кг Total raw materials, kg	100,0				
Выход, % Yield, %	97,5				

Безопасность и сроки хранения. Для определения возможности использования разработанного продукта в системе продовольственного обеспечения спасателей

были определены санитарно-химические и микробиологические показатели в соответствии с требованиями ТР ТС 021/2011 (табл. 6).

Таблица 6
Показатели безопасности продукта
Table 6
Product safety indicators

Показатель Indicator	Норма (не более) Standard (max)	Фактическое значение Actual value	Показатель Indicator	Норма (не более) Standard (max)	Фактическое значение Actual value
Мышьяк, мг/кг Arsenic, mg/kg	0,2	0,024	Цезий-137, Бк/кг Cesium-137, Bq/kg	60	Менее 3,6 Less than 3,6
Кадмий, мг/кг Cadmium, mg/kg	0,1	0,004	Свинец, мг/кг Lead, mg/kg	0,5	0,054

Окончание таблицы 6

Показатель Indicator	Норма (не более) Standard (max)	Фактическое значение Actual value	Показатель Indicator	Норма (не более) Standard (max)	Фактическое значение Actual value
Сальмонеллы (в 25 г) Salmonella (in 25 g)	Не допускаются Not allowed	Не обнаружены Not found			
БГКП (в 1 г) Coliforms (in 1 g)	Не допускаются Not allowed	Не обнаружены Not found			

Исследование показало, что продукт сохраняет стабильные органолептические свойства (суммарная оценка не ниже 29,1 балла из 30) и микробиологическую чистоту в течение 54 суток, а содержание токсичных элементов, микотоксинов и патогенной микрофлоры значительно ниже установленных пределов, что подтверждает безопасность продукта и позволяет использовать его в составе сухих пайков для длительного автономного питания.

Пищевая ценность. Для количественной оценки вклада разработанного продукта в удовлетворение физиологических потребностей спасателей был выполнен расчет пищевой и энергетической ценности.

В табл. 7 представлен детальный химический состав продукта в сравнении с нормами физиологических потребностей.

Согласно химическому составу рассматриваемый пищевой продукт может являться дополнительным источником витаминов, минеральных веществ и аминокислот, что особенно важно для поддержания функционального состояния организма при высоких физических нагрузках при проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ.

Энергетическая ценность 100 г продукта составляет 270 ккал, что обеспечивает покрытие 9–10 % суточной потребности в энергии при разовом употреблении.

Таблица 7
Химический состав пищевого продукта

Table 7
Chemical composition of food product

Витамины, % от РСР* Vitamins, % of RDA		Минеральные вещества, % от РСР Minerals, % of RDA		Незаменимые аминокислоты, г Essential amino acids, g	
А, мкг A, mcg	46,3 5,1	Калий, мг Potassium, mg	125 5	Валин Valine	0,027
В1, мг B1, mg	0,086 5,7	Кальций, мг Calcium, mg	41 4,1	Изолейцин Isoleucine	0,023
В2, мг B2, mg	0,052 2,9	Магний, мг Magnesium, mg	26 6,5	Лейцин Leucine	0,037
В6, мг B6, mg	0,11 5,5	Натрий, мг Sodium, mg	314 24	Лизин Lysine	0,02

*Рекомендуемое суточное потребление согласно МР 2.3.1.0253–21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации».

Окончание таблицы 7

Витамины, % от РСП Vitamins, % of RDA		Минеральные вещества, % от РСП Minerals, % of RDA		Незаменимые аминокислоты, г Essential amino acids, g	
В9, мкг B9, mcg	15,5 3,9	Сера, мг Sulfur, mg	32 3,2	Метионин Methionine	0,007
С, мг C, mg	0,06 0,1	Фосфор, мг Phosphorus, mg	49 6,1	Треонин Threonine	0,02
Е, мг E, mg	0,95 6,4	Селен, мкг Selenium, mcg	4,1 5,8	Триптофан Tryptophan	0,013
К, мкг K, mcg	10,1 8,4	Фтор, мкг Fluorine, mcg	0,3 —	Фенилаланин Phenylalanine	0,022
РР, мг PP, mg	1,8 9,1	Цинк, мг Zink, mg	0,5 4,3		

Обоснование выбора ингредиентов.
Каждый ингредиент разработанного продук-
та выполняет специфическую функцию в под-
держании гомеостаза организма спасателя
при выполнении аварийно-спасательных

работ. В табл. 8 представлено обоснование
функциональной роли каждого компонента
с позиций патогенетической направленно-
сти на коррекцию нарушений, возникающих
при экстремальных воздействиях.

Таблица 8

Обоснование функциональной роли ингредиентов

Table 8

Justification of the functional role of ingredients

Ингредиент Ingredient	Физиологическое действие Physiological action	Значение для спасателей Significance for rescuers
Мука пшеничная Wheat flour	Сложные углеводы Complex carbohydrates	Длительное энергообеспечение Long-term energy supply
Клетчатка яблочная Apple fiber	Пектины, детоксикация Pectins, detoxification	Связывание тяжелых металлов Binding of heavy metals
Клетчатка амаранта Amaranth fiber	Сквален, лизин Squalene, lysine	Антигипоксический, иммуномодулирующий эффект Antihypoxic, immunomodulatory effect
Вишня сушеная Dried cherry	Антоцианы Anthocyanins	Антиоксидантная защита Antioxidant protection
Имбирь Ginger	Гингеролы Gingerols	Противовоспалительное, адаптогенное действие Anti-inflammatory, adaptogenic effect
Молоко, масло Milk, butter	Белок, жиры, витамины Protein, fats, vitamins	Восстановление тканей, энергетическая плотность Tissue restoration, energy density

Синергетическое взаимодействие пре-
дставленных ингредиентов обеспечивает
комплексное действие: детоксикацион-

ное (пектин), антиоксидантное (антоциа-
ны, гингеролы), пребиотическое (пищевые
волокна) и антигипоксическое (сквален),

что подтверждает обоснованность выбранной рецептуры.

Одним из ингредиентов рассматриваемого продукта является клетчатка из семян амаранта сорта «кизлярец» (*Amaranthus cruentus*). Именно она обеспечивает основной нутрицевтический эффект (антигипоксический, иммуномодулирующий, пребиотический), поэтому ее выбору было уделено наиболее пристальное внимание.

Род *Amaranthus* L. объединяет более 100 видов растений, однако для пищевых целей используется лишь несколько, суще-

ственно различающихся по химическому составу и биотропным эффектам. В мировой и отечественной практике для производства функциональных продуктов наиболее широко применяются белосемянные сорта (*Amaranthus cruentus*, *Amaranthus hypochondriacus*), которые характеризуются повышенным содержанием белка, сквалена и сбалансированным аминокислотным профилем. В табл. 9 представлен сравнительный анализ основных сортов пищевого амаранта, культивируемых в Российской Федерации.

Таблица 9

Сравнительная характеристика основных пищевых сортов амаранта

Table 9

Comparative characteristics of the main food varieties of amaranth

Сорт, вид Variety, type	Содержание, % Content of %			Содержание лизина, г / 100 г белка Lysine content, g / 100 g protein	Особенности Features
	Белок Protein	Сквален Squalene	Пищевые волокна Dietary fiber		
Кизлярец, A. cruentus Kizlyarets	17,2–19,5	8,0–10,0	12,0–15,0	5,2–5,7	Наивысшее содержание сквалена и лизина, оптимальный аминокислотный профиль Highest content of squalene and lysine; optimal amino acid profile
Воронежский, A. hypochondriacus Voronezhsky	14,8–16,2	5,0–7,0	10,0–2,0	4,5–5,0	Повышенное содержание крахмала (до 70 %), хорошие мукомольные свойства Increased starch content (up to 70 %), good milling properties
Валентина, A. tricolor Valentina	13,5–15,0	3,0–5,0	8,0–10,0	4,0–4,5	Высокое содержание амарантина (беталаинового пигмента), антиоксидантная активность High content of amaranthine (betalain pigment), antioxidant activity
Гелиос, A. cruentus Gelios	16,0–18,0	6,0–8,0	11,0–14,0	4,8–5,2	Высокая масличность (до 7–8 %), повышенное содержание токоферолов High oil content (up to 7–8 %), increased content of tocopherols

Окончание таблицы 9

Сорт, вид Variety, type	Содержание, % Content of %			Содержание лизина, г / 100 г белка Lysine content, g / 100 g protein	Особенности Features
	Белок Protein	Сквален Squalene	Пищевые волокна Dietary fiber		
Крепыш, A. Hypochondriacus Krepysh	18,0–20,0	5,0–7,0	10,0–13,0	5,5–5,8	Максимальное содержание белка, повышенное содержание лизина Maximum protein content, increased lysine content
Ультра, A. cruentus Ultra	15,5–17,5	6,0–8,0	11,0–13,0	4,5–5,0	Сбалансированный состав, высокая пищевая ценность Balanced composition, high nutritional value

Приведенные данные свидетельствуют о том, что среди районированных в Российской Федерации сортов амаранта сорт «кизлярец» характеризуется наивысшими показателями содержания сквалена (8–10 %) — в 1,6–2 раза выше, чем у сортов «воронежский» и «валентина», — и лизина (5,2–5,7 г / 100 г белка), что является крити-

чески важным для синтеза коллагена и регенерации тканей.

Окончательный выбор в пользу сорта «кизлярец» обусловлен его уникальным химическим составом, обеспечивающим комплексное физиологическое воздействие на организм спасателя при выполнении аварийно-спасательных и других неотложных работ (табл. 10).

Таблица 10
Физиологическая характеристика сорта амаранта «кизлярец»

Table 10

Physiological characteristics of the amaranth variety "kizlyarets"

Компонент Component	Содержание Content	Физиологическое действие Physiological action	Значение для спасателей Significance for rescuers
Белок Protein	17,2–19,5 %	Поддержание азотистого баланса, обеспечение пластических процессов Maintenance of nitrogen balance, provision of plastic processes	Предотвращает катаболические процессы при высоких физических нагрузках и психоэмоциональном стрессе Prevents catabolic processes during high physical exertion and psycho-emotional stress
Лизин Lysine	5,2–5,7 г / 100 г белка 5.2–5.7 g / 100 g protein	Синтез коллагена, регенерация тканей, образование антител, усвоение кальция Collagen synthesis, tissue regeneration, antibody formation, calcium absorption	Ускоряет заживление ран и восстановление после травм; поддерживает иммунную защиту; профилактика остеопороза при длительных нагрузках Accelerates wound healing and recovery after injuries; supports immune defense; prevention of osteoporosis
Сквален Squalene	8–10 % от масла	Антигипоксическое, иммуномодулирующее, радиопротекторное действие; повышение насыщения клеток кислородом	Критически важен при работе в условиях гипоксии (высокогорье, работа в СИЗОД), при воздействии ионизирующего излучения, для ускорения восстановления после травм

Окончание таблицы 10

Компонент Component	Содержание Content	Физиологическое действие Physiological action	Значение для спасателей Significance for rescuers
	8–10 % of oil	Antihypoxic, immunomodulatory, radioprotective action; increasing cell oxygen saturation	Critical for work in hypoxic conditions (high altitude, work in personal protective equipment), under ionizing radiation, to accelerate recovery after injuries
Пищевые волокна Dietary fiber	12–15 %	Пребиотический эффект, связывание и выведение токсинов и ксенобиотиков, нормализация моторики кишечника Prebiotic effect, binding and elimination of toxins and xenobiotics, normalization of intestinal motility	Обеспечивает детоксикацию организма при работе в зонах химического загрязнения; профилактика заболеваний ЖКТ (40 % в структуре патологии спасателей) Provides detoxification of the body when working in areas of chemical contamination; prevention of gastrointestinal diseases (40 % in the structure of rescuers' pathology)
Витамин Е Vitamin E	Повышенное Increased	Мембраностабилизирующее действие, антиоксидантная защита, улучшение регенерации тканей Membrane-stabilizing action, antioxidant protection, improvement of tissue regeneration	Защищает клеточные мембраны от окислительного стресса, индуцированного интенсивными физическими нагрузками и воздействием экстремальных температур Protects cell membranes from oxidative stress induced by intense physical activity and exposure to extreme temperatures
Фитостеролы Phytosterols	Высокое High	Гиполипидемическое действие, противовоспалительный эффект Hypolipidemic action, anti-inflammatory effect	Профилактика сердечно-сосудистых заболеваний при хроническом стрессе Prevention of cardiovascular diseases during chronic stress

Таким образом, клетчатка семян амаранта сорта «кизлярец» обеспечивает комплексное нутрицевтическое действие, включающее антигипоксический (сквален), иммуномодулирующий (лизин, сквален), пребиотический (пищевые волокна), антиоксидантный (витамин Е) и детоксикационный (пищевые волокна) эффекты, что делает ее оптимальным компонентом для питания спасателей, работающих в экстремальных условиях.

Далее представлены данные, подтверждающие функциональную значимость продукта. Основным показателем качества готового продукта является *детоксикационная эффективность*, характеризующаяся содержанием пектина. Согласно ГОСТ 29186–91 и МУ 2.3.2.1078–01 содержание пектина в яблочной клетчатке составляет не менее 45 % от массы, а общее содержание пектина рассчитывается следующим образом:

$$\text{Пектин} = 15,7 \cdot 0,45 = 7,07 \text{ г} / 100 \text{ г продукта},$$

где 15,7 — содержание яблочной клетчатки в 100 г продукта (табл. 5); 0,45 — минимальное содержание пектина в яблочной клетчатке в соответствии с ГОСТ 9186–91 и МУ 2.3.2.1078–01.

Детоксикационная эффективность пектина подтверждена исследованиями [10], согласно которым курс приема пектина

в дозе 30 г/сут. обеспечивает снижение свинца на 43,5 %, кадмия — более чем на 95 %. При включении 1–2 порций продукта (100–200 г) в суточный рацион обеспечивается 23,6–47,2 % от курсовой детоксикационной дозы.

Следующим показателем качества пищевой продукции является *пребиотическая*

эффективность на примере содержание пищевых волокон (ПВ), суммарное содер-

жание которых рассчитывали согласно ГОСТ Р 54014–2010:

$$\text{ПВ} = 15,7 + 12,5 = 28,2 \text{ г / 100 г продукта}$$

где 12,5 — содержание клетчатки из семян амаранта (табл. 5).

В соответствии с МР 2.3.1.0253–21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах» [14], суточная норма потребления пищевых волокон составляет 20–30 г/сут. Таким образом,

одна порция продукта (100 г) полностью покрывает суточную потребность.

Третий показатель — *пребиотический индекс* (PI), отражающий соотношение содержания специфических пребиотических компонентов к усвояемым углеводам, рассчитывали по методике МУ 2.3.2.2680–10 по формуле:

$$PI = \frac{C_{GOS} + C_{FOS} + C_{Inulin}}{C_{Glc} + C_{Fru}}. \quad (1)$$

где:

C_{GOS} — содержание галактоолигосахаридов (в пересчете на сухое вещество);

C_{FOS} — содержание фруктоолигосахаридов;

C_{Inulin} — содержание инулина;

C_{Glc} — содержание глюкозы;

C_{Fru} — содержание фруктозы.

Для рассматриваемого продукта на основе яблочной клетчатки и клетчатки амаранта были использованы расчетные данные по содержанию углеводов:

— суммарное содержание пребиотических компонентов ($C_{GOS} + C_{FOS} + C_{Inulin}$) определено по содержанию растворимых пищевых волокон (пектины, камеди) и составило 10,8 г / 100 г продукта (расчетно-экспериментальным путем на основе данных о составе сырья);

— суммарное содержание усвояемых сахаров ($C_{Glc} + C_{Fru}$) определено по содержанию сахарозы (1,7 г / 100 г) и моносахаридов, содержащихся в вишне и других ингредиентах,

и составило 8,0 г / 100 г продукта (с учетом инвертации сахарозы).

Таким образом, $PI = 1,35$, что значительно превышает пороговое значение 1,0, установленное МУ 2.3.2.2680–10 для отнесения продукта к обладающим пребиотическими свойствами. Полученный результат подтверждает эффективность продукта.

Четвертый показатель — *суммарная антиоксидантная емкость* продукта рассчитывалась стандартизированным методом ORAC (поглощающая способность по отношению к кислородным радикалам) по ГОСТ Р 57975–2017:

$$\text{ORAC} = 731,1 + 518,0 + 131,9 + 153,8 = 1535 \text{ мкмоль ТЕ / 100 г,}$$

где содержание в продукте · ORAC ингредиента (г / 100 г · мкмоль ТЕ / 100 г продукта):

$$731,1 = 7,6 \cdot 96,2 \text{ — вишня сушеная;}$$

$$518,0 = 3,5 \cdot 148,0 \text{ — имбирь (порошок);}$$

$$131,9 = 15,7 \cdot 8,4 \text{ — клетчатка яблочная;}$$

$$153,8 = 12,5 \cdot 12,3 \text{ — клетчатка амаранта «кизлярец».$$

В соответствии с МУ 2.3.2.2680–10 суточная потребность в антиоксидантах при повышенных физических нагрузках составляет 3 000–5 000 мкмоль ТЕ / сут. Покрытие суточной потребности при употреблении 100 г продукта: $1\,535 / 4\,000 \cdot 100 \% = 38,4 \%$

Показатель ORAC на 100 ккал энергетической ценности продукта (270 ккал / 100 г) составляет: $1\,535 \text{ мкмоль ТЕ} / 100 \text{ г} / 2,7 = 568,5 \text{ мкмоль ТЕ} / 100 \text{ ккал}$, что превышает рекомендуемый уровень для функциональных продуктов ($> 300 \text{ мкмоль ТЕ} / 100 \text{ ккал}$).

$$\text{Полифенолы}_{\text{сумма}} = 560 + 240 + 120 + 150 = 1070 \text{ мг} / 100 \text{ г},$$

где содержание в продукте, г / 100 г, ·
содержание полифенолов в ингредиенте,
мг / 100 г:

560 = 7,6 · 73,68 [1, 3] — вишня сушеная;

240 = 3,5 · 68,57 [3] — имбирь (порошок);

120 = 15,7 · 7,65 [2, 4] — клетчатка яблочная;

150 = 12,5 · 12,00 [12] — клетчатка амаранта «кизлярец».

Пятый показатель — *противовоспалительная эффективность* на примере содержания полифенолов (флавоноиды, антоцианы, фенолокислоты). Важнейшие природные антиоксиданты обладают выраженным противовоспалительным, иммуномодулирующим и капилляроукрепляющим действием [15]. Содержание полифенолов в ингредиентах определено на основании данных научной литературы, нормативной документации и результатов лабораторных исследований, а его суммарное значение согласно ГОСТ Р 57132–2016 равно:

В соответствии с МУ 2.3.2.2680–10 противовоспалительный эффект наблюдается при дозе полифенолов 500–1 000 мг/сут. Одна порция продукта (100 г) полностью покрывает суточную противовоспалительную дозу.

Шестой показатель — *интегральный показатель функциональной эффективности (IPFE)*, рассчитывался в соответствии с МУ 2.2.9.2492–09 [12] по формуле:

$$IPFE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i, \text{norm}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где:

C_i — фактическое содержание i -го функционального компонента в продукте (в пересчете на 100 г);

$C_{i, \text{norm}}$ — нормативное содержание i -го функционального компонента, рекомендованное для включения в 100 г рациона;

n — количество учитываемых функциональных компонентов.

Значения:

$C_{\text{Пищевые волокна}} = 28,2 \text{ г} / 100 \text{ г};$

$C_{\text{Полифенолы}} = 1\,070 \text{ мг} / 100 \text{ г};$

$C_{\text{Антиоксиданты}} = 1\,535 \text{ ТЕ} / 100 \text{ г};$

$C_{\text{Сквален}} = 18,5 \text{ мг} / 100 \text{ г};$

$C_{\text{Пищевые волокна, норм}} = 5,0 \text{ г} / 100 \text{ г};$

$C_{\text{Полифенолы, норм}} = 200 \text{ мг} / 100 \text{ г};$

$C_{\text{Антиоксиданты, норм}} = 500 \text{ ТЕ} / 100 \text{ г};$

$C_{\text{Сквален, норм}} = 5,0 \text{ мг} / 100 \text{ г}.$

$$IPFE = \frac{5,64 + 5,35 + 3,07 + 3,70}{4} \cdot 100 \% = 444 \%$$

Таким образом, показатель $IPFE = 444 \%$. Это означает, что разработанный продукт превышает нормативные требования по содержанию функциональных компонентов в рационе спасателя в 4,44 раза (или на 344 % выше нормативного уровня). В соответствии с классификацией МУ 2.2.9.2492–09 [15] продукт с $IPFE > 200 \%$ относится к категории «высокоэффективные функциональные продукты», что подтверждает его обоснованность для использования в системе продоволь-

ственного обеспечения спасателей МЧС России при выполнении задач в экстремальных условиях.

Для количественной оценки ожидаемого влияния разработанного продукта на профессиональную деятельность спасателей выполнен расчет прогнозного прироста физической работоспособности (ΔW) с использованием метода, изложенного в МР «Оценка физической работоспособности человека» и приказе Минздравсоцразвития России № 1144н от 23.10.2020, по формуле:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \left(k_i \cdot \frac{C_i}{C_{i, norm}} \right) \quad (3)$$

где:

k_i — коэффициент влияния i -го нутриента (функционального компонента) на физическую работоспособность (определен на основании данных ВЦЭРМ им. А. М. Никифорова МЧС России);

C_i — фактическое содержание i -го нутриента (функционального компонента) в 100 г разработанного продукта;

$C_{i, norm}$ — нормативное содержание i -го нутриента, рекомендованное для включения в 100 г рациона (согласно [15]);

n — количество учитываемых функциональных компонентов (табл. 11).

Таблица 11

Данные для определение прогнозного прироста физической работоспособности

Table 11

Data for determining the predicted increase in physical performance

Нутриент Nutrient	k_i	C_i	$C_{i, norm}$
Пищевые волокна Dietary fiber	0,15	28,2 г / 100 г 28.2 g / 100 g	5,0 г / 100 г 5.0 g / 100 g
Антиоксиданты (ORAC) Antioxidants (ORAC)	0,25	1 535 мкмоль ТЕ / 100 г 1 535 μmol TE/100 g	500 мкмоль ТЕ / 100 г 500 μmol TE / 100 g
Полифенолы Phytosterols	0,20	1 070 мг / 100 г 1 070 mg / 100 g	200 мг / 100 г 200 mg / 100 g
Витамин Е Vitamin E	0,20	0,95 мг / 100 г 0.95 mg / 100 g	0,42 мг / 100 г 0.42 mg / 100 g
Магний Magnesium	0,20	26 мг / 100 г 26 mg / 100 g	40 мг / 100 г 40 mg / 100 g

Таким образом, $\Delta W = 0,85 + 0,77 + 1,07 + 0,45 + 0,13 = 3,27 \%$.

В соответствии с Приказом № 1144н прирост работоспособности на 3–5 % оценивается как клинически значимый, способствующий повышению профессиональной надежности спасателей и снижению риска травматизма при выполнении аварийно-спасательных работ.

На основании проведенного сравнительного анализа и с учетом актуальных изменений в системе продовольственного обеспечения МЧС России [16] разработанный продукт может быть рекомендован для включения в состав сухих пайков.

Предлагаются следующие направления внедрения разработанного продукта.

1. Включение в арктические рационы (нормы № 7 и 8) как источника пищевых волокон, антиоксидантов и сквалена для компенсации дефицитов в условиях Крайнего Севера [10, 12, 13].

2. Использование в промежуточных пайках (норма № 4) для профилактики заболеваний ЖКТ, составляющих 40 % патологии спасателей, при проведении длительных аварийно-спасательных работ, когда отсутствует возможность трехразового горячего питания.

3. Включение в состав гуманитарных миссий для обеспечения детоксикационной, антиоксидантной и пребиотической поддержки в условиях жаркого климата, высоких инфекционных рисков и психотравмирующего воздействия.

4. Замена или дополнение протеиновых батончиков в рационах спасателей на продукт с более широким спектром функциональных свойств, что позволит реализовать модульный принцип питания без увеличения массы пайка [17].

Выводы

Проведенное исследование позволило комплексно рассмотреть актуальные проблемы продовольственного обеспечения спасателей МЧС России в экстремальных условиях профессиональной деятельности. На основе анализа нормативной базы, научной литературы и результатов собственных экспериментально-расчетных исследований сформулированы следующие основные выводы.

1. Анализ действующей системы продовольственного обеспечения спасателей МЧС России, включая базовые рационы (пайки № 1–6) и новые арктические рационы (нормы № 7 и 8), выявил существенные дефициты функциональных компонентов питания. Установлено, что даже при повышенной энергетической ценности арктических рационов (3 200–3 400 ккал/сут.) сохраняется недостаточное содержание пищевых волокон (дефицит до 50 %), антиоксидантов (дефицит до 50 %) и полифенолов (дефицит до 67 %), что напрямую коррелирует с высоким уровнем заболеваемости органов пищеварения среди спасателей (40 % среди хронических патологий) и снижением общей физической работоспособности.

2. Работа спасателей в условиях Арктической зоны характеризуется комплексом экстремальных факторов: низкими температурами, нарушением фотопериодичности (полярная ночь / полярный день), повышенными энергозатратами, гипоксией, воздействием ультрафиолетового излучения на фоне высокой отражающей способности снежного покрова. Эти факторы обуславливают особые требования к продовольственному обеспечению, которые не в полной мере реализованы в существующих

арктических рационах (нормы № 7 и 8): их состав требует некоторого совершенствования, в частности, обогащения источниками пищевых волокон, антиоксидантов и антигипоксических компонентов (сквалена, полифенолов).

3. Анализ гуманитарных миссий МЧС России за период 2023–2026 гг. позволил выделить универсальные факторы, определяющие требования к питанию спасателей в условиях международных гуманитарных операций, включая ликвидацию природных чрезвычайных ситуаций.

4. Разработанный пищевой продукт (патент РФ № 2823337) представляет собой готовое к употреблению изделие на основе функциональных ингредиентов, обоснование выбора которых выполнено с учетом их физиологического действия и синергетического взаимодействия, обеспечивающего комплексную нутрицевтическую поддержку организма спасателя. Результаты санитарно-химических и микробиологических исследований подтвердили полное соответствие продукта требованиям ТР ТС 021/2011. Установленный срок хранения (54 дня) позволяет использовать продукт в составе сухих пайков для длительного автономного питания.

Расчетные данные, выполненные в соответствии с действующими нормативными документами (ГОСТ 29186–91, ГОСТ Р 54014–2010, ГОСТ Р 57975–2017, ГОСТ Р 57132–2016, МУ 2.3.2.2680–10, МУ 2.2.9.2492–09), подтверждают высокую детоксикационную и пребиотическую эффективность, а также антиоксидантную и противовоспалительную активность.

5. Интегральный показатель функциональной эффективности, рассчитанный в соответствии с МУ 2.2.9.2492–09, составил

444 %, что свидетельствует о превышении нормативных требований к содержанию функциональных компонентов в 4 раза. Согласно классификации, продукт относится к категории «высокоэффективные функциональные продукты».

Прогнозируемый прирост общей физической работоспособности при регулярном включении продукта в рацион составляет 3,27 %, что в соответствии с Приказом Минздравсоцразвития России оценивается как клинически значимый результат, способствующий повышению профессиональной надежности спасателей и снижению риска травматизма.

На основании проведенного анализа разработаны практические рекомендации по внедрению продукта в систему продовольственного обеспечения МЧС России:

- в арктические рационы (нормы № 7 и 8) для компенсации дефицита пищевых волокон, антиоксидантов и сквалена в условиях Крайнего Севера;

- в промежуточные пайки (норма № 4) для профилактики заболеваний ЖКТ при проведении длительных аварийно-спасательных работ;

- в состав гуманитарных миссий для обеспечения детоксикационной, антиоксидантной и пребиотической поддержки при ликвидации последствий природных чрезвычайных ситуаций (наводнения, ураганы, землетрясения) в странах с жарким климатом.

Проведенное исследование подтверждает, что оптимизация продовольственного обеспечения спасателей МЧС России путем включения специализированных продуктов функционального назначения является эффективным направлением повышения их профессиональной надежности,

сохранения здоровья и трудоспособности в экстремальных условиях. Разработанный продукт, обладающий доказанной безопасностью и высокой функциональной эф-

фективностью, может быть рекомендован для практического применения в системе продовольственного обеспечения МЧС России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вахрамеев Р. А. Эмпирическое исследование зернопродуктового подкомплекса Российской Федерации // Известия Уральского государственного экономического университета. 2017. № 6 (74). С. 115–127. DOI: 10.29141/2073-1019-2017-74-6-9. EDN: YNERGM.
2. Особенности организации питания военнослужащих РФ / А. А. Терехова [и др.] // Парадигма. 2021. № 4. С. 20–25. DOI: 10.24412/2367-8658-2021-4-001. EDN: KIFQZA.
3. Гумеров Т. Ю., Клинцева А. К., Насырова Е. А. О питании сотрудников спасательной службы // Безопасность жизнедеятельности. 2025. № 5 (293). С. 6–11. EDN: XFTFBG.
4. Евдокимов В. И., Санников М. В. Анализ нозологий, выявленных при периодических медицинских осмотрах, у личного состава пожарно-спасательных формирований Федеральной противопожарной службы МЧС России // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2025. № 2. С. 28–50. DOI: 10.25016/2541-7487-2025-0-2-28-50. EDN: SXQLMG.
5. Новиков В. С., Каркищенко В. Н., Шустов Е. Б. Функциональное питание человека при экстремальных воздействиях. СПб. : Политехника-принт, 2017. 346 с. EDN: TBAXUV.
6. О внесении изменений в приложения № 1, 2 и 3 к приказу МЧС России от 29.04.2013 № 290 : приказ МЧС России от 23.12.2019 № 768 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc /73546112 /?ysclid=mu168d9a418608 4680> (дата обращения: 03.10.2026).
7. Study of chronic toxicity of a cereal bar / Т. Yu. Gumerov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1052, No. 1. P. 012120. DOI: 10.1088/1755-1315/1052/1/012120. EDN: PHRWIS.
8. Лачугин А. П., Романенко С. П. Применение функциональных продуктов для обогащения рационов питания, предназначенных для работающих Арктической зоны // Бюллетень Северного государственного медицинского университета. 2025. Т. 52, № 1. С. 338–339. EDN: BPRONF.
9. Патент № 2823337 С1 Российская Федерация, МПК А23L 7/10, А23L 33/10, А23L 33/21. Зерновой продукт для питания сотрудников спасательной службы : № 2024101518 ; заявл. 23.01.2024 ; опубл. 22.07.2024 / Т. Ю. Гумеров [и др.] ; заявитель Казанский национальный исследовательский технологический университет. 7 с. EDN: AGAQDC.
10. Tekutskaya E. E. Detoxical aspects of nutritional therapy using natural enterosorbents on the basis of pectins // Russian Open Medical Journal. 2013. Vol. 2, No. 3. P. 0306. EDN: RAJLTX.
11. Кириченко Н. Н. Микронутриентный статус военнослужащих в экстремальных условиях Арктики и профилактика его нарушений : дисс. ... канд. мед. наук. СПб., 2021. 177 с.

12. . Сквален — природный биологически активный компонент питания 21 века / Е. В. Ульрих [и др.] // Пищевые системы. 2025. Т. 8, № 4. С. 583–594. DOI: 10.21323/2618-9771-2025-8-4-583-594. EDN: XNMDIA.
13. Высочина Г. И. Амарант (*Amaranthus L.*): химический состав и перспективы использования (обзор) // Химия растительного сырья. 2013. № 2. С. 5–14. EDN: RCYKLF.
14. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации : методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 / В. А. Тутельян [и др.]. Москва : Роспотребнадзор, 2021. 72 с. EDN: MAYTEB.
15. Попова А. Ю. Тутельян В. А., Никитюк Д. Б. О новых (2021) Нормах физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации // Вопросы питания. 2021. Т. 90, № 4 (536). С. 6–19. DOI: 10.33029/0042-8833-2021-90-4-6-19. EDN: VSSZQJ.
16. Юматов Е. Н. Концепция легкого рациона питания военнослужащих РФ — ЛРП. Минимизация массогабаритных показателей // Health, Food & Biotechnology. 2023. Т. 5, № 1. С. 35–50. DOI: 10.36107/hfb.2023.i1.s164. EDN: EGCFVH.
17. Роль технологических инноваций в обеспечении устойчивого развития пищевой промышленности / И. В. Петрунина [и др.] // Пищевые системы. 2025. Т. 8, № 3. С. 316–323. DOI: 10.21323/2618-9771-2025-8-3-316-323. EDN: KTNAFJ.

REFERENCES

1. Vakhrameev R. A. Empirical study of the grain product subcomplex of the Russian Federation // Bulletin of the Ural State University of Economics. 2017. No. 6 (74). P. 115–127. DOI: 10.29141/2073-1019-2017-74-6-9. EDN: YNERGM.
2. Features of the organization of meals for military personnel of the Russian Federation / A. A. Terekhova [et al.] // Paradigm. 2021. No. 4. P. 20–25. DOI: 10.24412/2367-8658-2021-4-001. EDN: KIFQZA.
3. Gumerov T. Yu., Klintsova A. K., Nasyrova E. A. On the nutrition of rescue service personnel // Life Safety. 2025. No. 5 (293). P. 6–11. EDN: XFTFBG.
4. Evdokimov V. I., Sannikov M. V. Analysis of nosologies identified during periodic medical examinations among the personnel of fire and rescue teams of the Federal Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia // Medical, biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations. 2025. No. 2. Pp. 28–50. DOI: 10.25016/2541-7487-2025-0-2-28-50. EDN: SXQLMG.
5. Novikov V. S., Karkishchenko V. N., Shustov E. B. Functional nutrition of humans under extreme conditions. Saint Petersburg: Politechnika-print, 2017. 346 p. EDN: TBAXUV.
6. On amendments to Appendices No. 1, 2 and 3 to the Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 04.29.2013 No. 290 : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 12.23.2019 No. 768 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73546112/?ysclid=mu168d9a4186084680> (accessed: 03.10.2026).

7. Study of chronic toxicity of a cereal bar / Gumerov T. Yu. [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1052, No. 1. P. 012120. DOI: 10.1088/1755-1315/1052/1/012120. EDN: PHRWIS.
8. Lachugin A. P., Romanenko S. P. Use of functional products to enrich diets intended for workers in the Arctic zone // Bulletin of the Northern State Medical University. 2025. Vol. 52, No. 1. P. 338–339. EDN: BPRONF.
9. Patent No. 2823337 C1 Russian Federation, IPC A23L 7/10, A23L 33/10, A23L 33/21. Grain product for feeding rescue service personnel : No. 2024101518 ; declared 23.01.2024 ; published 22.07.2024 / Gumerov T. Yu. [et al.] ; applicant Kazan National Research Technological University. 7 p. EDN: AGAQDC.
10. Tekutskaya E. E. Detoxical aspects of nutritional therapy using natural enterosorbents based on pectins // Russian Open Medical Journal. 2013. Vol. 2, No. 3. P. 0306. EDN: RAJLTX.
11. Kirichenko, N. N. Micronutrient status of military personnel in extreme Arctic conditions and prevention of its disorders : Cand. Sci. (Med.) dissertation. Saint Petersburg, 2021. 177 p.
12. Ulrikh E. V., Sukhikh S. A., Samusev I. G., Babich O. O. Squalene - a natural biologically active component of the 21st century nutrition // Food systems. 2025. Vol. 8, No. 4. P. 583–594. DOI: 10.21323/2618-9771-2025-8-4-583-594. EDN: XNMDIA.
13. Vysochina G. I. Amaranth (*Amaranthus L.*): chemical composition and prospects of use (review) // Chemistry of plant raw materials. 2013. No. 2. P. 5–14. EDN: RCYKLF.
14. Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation : Methodological recommendations MR 2.3.1.0253-21 / V. A. Tutelyan [et al.]. Moscow : Rospotrebnadzor, 2021. 72 p. EDN: MAYTEB.
15. Popova A. Yu. Tutelyan V. A., Nikityuk D. B. On the new (2021) Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation // Nutrition Issues. 2021. Vol. 90, No. 4 (536). P. 6–19 DOI: 10.33029/0042-8833-2021-90-4-6-19. EDN: VSSZQJ.
16. Yumatov E. N. Concept of a light ration for military personnel of the Russian Federation — LRP. Minimization of weight and size indicators // Health, Food & Biotechnology. 2023. Vol. 5, No. 1. P. 35–50. DOI: 10.36107/hfb.2023.i1.s164. EDN: EGCFVH.
17. The role of technological innovations in ensuring sustainable development of the food industry / Petrunina I. V. [et al.] // Food Systems. 2025. T. 8, No. 3. P. 316–323. DOI: 10.21323/2618-9771-2025-8-3-316-323. EDN: KTNAFJ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексеева Екатерина Ивановна, канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной и экологической безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева–КАИ (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10); SPIN-код: 2870-8044; AuthorID: 1096798; e-mail: kleongard@bk.ru

Антонова Ильвира Илгизовна, старший преподаватель кафедры химии и инженерной экологии в строительстве Казанского государственного архитектурно-строительного университета (420043, Российская Федерация, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1); SPIN-код: 4496-7593; AuthorID: 1138425; e-mail: antonova.elvira@yandex.ru

Гумеров Тимофей Юрьевич, д-р техн.наук, доцент, профессор кафедры промышленной и экологической безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполев–КА (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10); профессор кафедры химии и инженерной экологии в строительстве Казанского государственного архитектурно-строительного университета (420043, Российская Федерация, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1); SPIN-код: 3243-8668; AuthorID: 792359; e-mail: tt-timofei@mail.ru

Насырова Екатерина Андреевна, аспирант кафедры технологии пищевых производств Казанского национального исследовательского технологического университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68); e-mail: avatarkate330@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ekaterina I. Alekseeva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial and Environmental Safety, KNRTU–KAI (10 Karl Marx St., Kazan, 420015, Russian Federation); SPIN-code: 2870-8044; AuthorID: 1096798; e-mail: kleongard@bk.ru

Ilvira I. Antonova, Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Engineering Ecology in Construction, Kazan State University of Architecture and Engineering (1 Zelenaya St., Kazan, 420043, Russian Federation); SPIN-code: 4496-7593; AuthorID: 1138425; E-mail: antonova.elvira@yandex.ru

Timofey Yu. Gumerov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Industrial and Environmental Safety, KNRTU–KAI (10 Karl Marx St., Kazan, 420015, Russian Federation); Professor of the Department of Chemistry and Engineering Ecology in Construction, Kazan State University of Architecture and Engineering (1 Zelenaya St., Kazan, 420043, Russian Federation); SPIN-code: 3243-8668; AuthorID: 792359; e-mail: tt-timofei@mail.ru

Ekaterina A. Nasyrova, Postgraduate Student of the Department of Food Production Technology, Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx St., Kazan, 420015, Russian Federation); e-mail: avatarkate330@yandex.ru