



Федеральное государственное казенное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор»
Министерства Российской Федерации
по делам гражданской обороны,
чрезвычайным ситуациям и ликвидации
последствий стихийных бедствий»

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИ «РЕСПИРАТОР»

№ 1 (63)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2026

Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – 147 с.

Изложены результаты исследований в области защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях, техногенной безопасности, предупреждения и тушения пожаров на шахтах, создания горноспасательной техники, спасения людей при подземных авариях.

Публикуемые материалы предназначены для ученых и специалистов, занимающихся вопросами предупреждения чрезвычайных ситуаций, борьбы с их последствиями, преподавателей, аспирантов и студентов вузов, работников различных отраслей промышленности.

Учредитель: Федеральное государственное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России».

Издатель: Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; Федеральное государственное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России».

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В. Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	В. В. Мамаев – заместитель главного редактора
д-р техн. наук	А. Ф. Долженков
д-р техн. наук	С. Г. Ехилевский (Республика Беларусь)
д-р техн. наук	В. А. Канин
д-р техн. наук	А. П. Ковалев
д-р техн. наук	К. Н. Лабинский
д-р техн. наук	Д. Ю. Палеев
д-р техн. наук	Г. П. Стариков
д-р мед. наук	В. В. Черкесов
д-р хим. наук	В. В. Шаповалов

Издание внесено в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, сформированный ВАК при Минобрнауки России (дата включения издания в Перечень 12.02.2024).

Издание включено в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) (договор № 157-03/2016 от 23.03.2016).

Зарегистрировано Министерством информации ДНР. Свидетельство о регистрации печатной версии издания ААА № 000263 от 09.08.2022.

Подписано к печати 16.03.2026 по рекомендации Ученого совета ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России» (протокол № 1 от 26.02.2026).

Дата выхода в свет 19.03.2026.

Распространяется бесплатно.



Federal State Institution
«The Scientific Research Institute «Respirator»
of the Ministry of the Russian Federation for Civil
Defence, Emergencies and Elimination
of Consequences of Natural Disasters»

**SCIENTIFIC
BULLETIN
OF THE NII «RESPIRATOR»**

No. 1 (63)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2026

Scientific bulletin of the NII «Respirator». – 2026. – No. 1 (63). – 147 p.

The results of investigations in the field of population and territories protection in Emergencies, Technological safety, Fire prevention and Extinguishing in mines, development of mine-rescue equipment and people rescue in underground accidents are presented.

The materials published are intended for scientists and specialists involved in studying the problems of emergency prevention, eliminating the consequences, lecturers, postgraduate students and students of higher education institutions and workers of various branches of industry.

Founder: Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia».

Publisher: Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters; Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia».

Editorial board:

Dr. Sci. (Tech.)	V. G. Ageyev – Editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	V. V. Mamayev – Deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	A. F. Dolzhenkov
Dr. Sci. (Tech.)	S. G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)
Dr. Sci. (Tech.)	V. A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	A. P. Kovalyov
Dr. Sci. (Tech.)	K. N. Labinskiy
Dr. Sci. (Tech.)	D. Yu. Paleyev
Dr. Sci. (Tech.)	G. P. Starikov
Dr. Sci. (Med.)	V. V. Cherkesov
Dr. Sci. (Chem.)	V. V. Shapovalov

This publication is included in the List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of sciences, for the degree of Doctor of sciences, must be published, formed by the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of Russia (date of publication inclusion in the List: 12.02.2024).

The publication is included in the Russian Science Citation Index (RSCI) database (Contract No. 157-03/2016 dated 23.03.2016).

Registered by the Ministry of Information of the Donetsk People's Republic. Certificate of the Publication printing version registration: series AAA No. 000263 dated 09.08.2022.

Approved for printing 16.03.2026 according to the reference of the Academic council of FSI «NII «Respirator» EMERCOM of Russia» (Protocol No. 1 dated 26.02.2026).

Release date: 19.03.2026.

Distributed free of charge.

СОДЕРЖАНИЕ

TABLE OF CONTENTS

I. Пожарная безопасность

- Кирьян А. П., Пештибай Г. И.,
Галухин Н. А.**
Влияние низкой температуры
на параметры потока компрессионной
пены в рукавной линии
- Головченко Е. А., Пашковский О. П.,
Гусар Г. А., Гришин А. Н.**
Количественная оценка пожароопасности
выработанного пространства с учетом
аэродинамических показателей
его фильтрации
- Агарков Ал. В., Ефименко В. Л.,
Кавера А. Л., Евтеев Д. С.**
Тепломассообменные процессы
в горных выработках аварийных
участков угольных шахт при пожарах
- Алексеев С. Г.**
Прогнозирование температуры
вспышки пиридина и алкилпиридинов
- Козлова Ю. С.**
Тепловые процессы в элементах
электроустановок: от нормативного
расчета к оценке реальной пожарной
опасности

II. Безопасность труда

- Мамаев В. В., Зборщик Л. А.,
Плетенецкий Р. С.**
Работа шахтного самоспасателя
при отрицательных температурах
- Агеев В. Г., Лебедева В. В.,
Храпоненко О. В.**
Быстротвердеющий состав
для возведения взрывоустойчивых
перемычек послойным нанесением

I. Fire safety

- Kiryay A. P., Peshribay G. I.,
Galukhin N. A.**
7 The influence of low temperature
on the flow parameters of compression
foam moving in a hose line
- Golovchenko Ye. A., Pashkovskiy O. P.,
Gusar G. A., Grishin A. N.**
19 Quantitative assessment of the fire
hazard of mined-out space taking into
account the aerodynamic indicators
of its filtration
- Agarkov Al. V., Efimenko V. L.,
Kavera A L., Evteev D. S.**
27 Heat and mass transfer processes
in mining workings of emergency
sections of coal mines in case of fires
- Alexeev S. G.**
38 Pyridine and alkyl pyridines
flash point prediction
- Kozlova Yu. S.**
47 Thermal processes in the elements
of electrical installations: from
the normative calculation
to the assessment of the real fire danger

II. Occupational safety

- Mamayev V. V., Zborshchik L. A.,
Pletenetskiy R. S.**
55 Operation of mine self-rescuer
at negative temperatures
- Ageev V. G., Lebedeva V. V.,
Khraponenko O. V.**
66 Fast-hardening composition
for constructing explosion-resistant
lintels by layer-by-layer application

**Агарков Ал. В., Политучий Д. А.,
Буряк Д. С., Балта Д. Ф.**
Обеспечение нормативных
гидравлических параметров
противопожарного водоснабжения
с использованием шахтного водоотлива

**Клюй В. В., Османов Ш. А.,
Завьялов Д. Е.**
Анализ способов защиты пожарных
частей от атак с применением
беспилотных авиационных систем

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

**Павленко А. Т., Рыбаков А. В.,
Малкин В. Ю.**
Прогнозирование динамики опасных
зон при ликвидации пожаров на опасных
производственных объектах

**Горлов В. В., Меньших В. В.,
Никитенко В. А.**
Оптимизация эвакуации материальных
ценностей в условиях чрезвычайных
ситуаций с учетом их важности

Воронцов С. В.
Сравнительная оценка вероятности
гибели туристов-экстремалов
в зарегистрированных
и незарегистрированных группах

**Матвеев В. А., Ничкова Л. А.,
Рыкунов С. М.**
Повышение огнестойкости дверных
блоков на путях эвакуации
в исторических зданиях

Гарелина С. А., Скрынников А. Ю.
Обоснование параметров технических
средств предотвращения чрезвычайных
ситуаций

Публикационная этика

**Правила оформления
авторских рукописей**

**Agarkov Al. V., Polituchiy D. A.,
Buryak D. S., Balta D. F.**
73 Provision of standard hydraulic
parameters of fire-fighting water
supply using mine drainage

**Klyuy V. V., Osmanov Sh. A.,
Zavyalov D. E.**
83 Analysis of methods for protecting
fire departments from attacks using
unmanned aircraft systems

III. Safety in emergency situations

**Pavlenko A. T., Rybakov A. V.,
Malkin V. Yu.**
92 Forecasting the dynamics of dangerous
zones when fire suppression at hazardous
industrial facilities

**Gorlov V. V., Menshikh V. V.,
Nikitenko V. A.**
106 Optimizing the evacuation of material
valuables in emergency situation, taking
into account their importance

Vorontsov S. V.
114 Comparative assessment
of the probability of death
of extreme tourists in registered
and unregistered groups

**Matveev V. A., Nichkova L. A.,
Rykunov S. M.**
126 Increasing the fire resistance
of door blocks on escape routes
in historic buildings

Garelina S. A., Skrynnikov A. Yu.
134 Substantiation of parameters technical
means of prevention emergency
situations

144

146

I. Пожарная безопасность

УДК 614.844.5:62-974

Андрей Петрович Кирьян, канд. техн. наук, начальник института; e-mail: andrei-kiryan@mail.ru
Георгий Иванович Пештибай, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru
Николай Александрович Галухин, ст. науч. сотр.; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru
Федеральное государственное казенное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»
283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-36

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ В РУКАВНОЙ ЛИНИИ

Цель. Раскрытие закономерностей изменения параметров компрессионной пены в рукавной линии под действием низкой температуры окружающей среды для определения расхода, подаваемого в очаг пожара.

Методы. Аналитические исследования теплообменных процессов между цилиндрической поверхностью и окружающей средой, фундаментальные законы сохранения энергии и количества движения в двухфазных потоках, методы определения потерь давления на трение.

Результаты. Получены: дифференциальное уравнение распределения температуры компрессионной пены по длине рукавной линии, алгебраическое уравнение третьей степени для определения скорости пенного потока в зависимости от длины рукавной линии и температуры окружающей среды.

Научная новизна. Разработана математическая модель процесса движения компрессионной пены в рукавной линии, отличающаяся от известных тем, что для определения распределения ее температуры и скорости по длине линии использован линейный коэффициент теплопередачи для цилиндрических поверхностей и окружающей среды, что снижает погрешность расчетов на 4-5 %.

Практическая значимость. Проведенные исследования позволяют установить зависимость для определения расхода компрессионной пены, подаваемой в зону пожара, с учетом температуры окружающей среды и длины рукавной линии.

Ключевые слова: компрессионная пена; влияние температуры; расчет азотатора; теплообменные процессы; потери давления.

Для цитирования: Кирьян А. П., Пештибай Г. И., Галухин Н. А. Влияние низкой температуры на параметры потока компрессионной пены в рукавной линии // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 7–18. – EDN YHSVRQ

Постановка проблемы. В последние годы значительно вырос интерес к тушению пожаров компрессионной пеной. Это проявляется в возросшем объеме научных исследований [1–11] и внедрении новой пожаротушащей техники [12–20], оборудованной установками тушения пожаров газонаполненной компрессионной пеной.

Исследователи относят способ тушения пожаров и оборудование для подачи компрессионной пены к инновационным на основе практически доказанной эффективности тушения пожаров по новой технологии генерирования пены и отличительным свойствам компрессионной пены по сравнению с традиционной, получаемой эжекционным путем. Основное отличие обусловлено способом получения компрессионной пены путем нагнетания сжатого воздуха в водный раствор пенообразователя. Для этого используются, как правило, насосы для подачи воды и пенообразователя, компрессор сжатого воздуха. В результате компрессионная пена приобретает следующие свойства:

- монодисперсность (пузырьки одинакового размера);
- повышенная адгезия, включая вертикальную металлическую поверхность с отрицательным углом наклона;
- повышенная устойчивость;
- повышенная транспортируемость пены без образования свободной жидкой фазы;
- увеличение дальности и высоты подачи;
- высокая плотность сцепления пузырьков;
- снижение расхода воды при тушении пожара.

В связи с улучшенными свойствами компрессионной пены расширяется и область ее применения для тушения топливных резервуаров, высотных зданий, лесных пожаров, объектов электроэнергетики и других объектов, в том числе, в зимний период времени или расположенных в холодной климатической зоне. Однако влияние температуры окружающей среды на параметры потока компрессионной пены изучено не в полной мере.

Цель работы. Раскрытие закономерностей изменения параметров компрессионной пены в рукавной линии под действием низкой температуры окружающей среды для определения расхода, подаваемого в очаг пожара.

Анализ последних исследований. В работе [13] рассмотрены вопросы повышения эффективности тушения пожаров при использовании компрессионной пены за счет совершенствования оперативно-тактических мероприятий, позволяющих сократить численность личного состава при выполнении профессиональных задач. Показана эффективность тушения пожаров компрессионной пеной по сравнению с тушением водой, сокращение в три раза численности личного состава, выполняющего задачи по назначению.

Тушению пожаров в различных сферах промышленности посвящен ряд работ [6, 12, 14, 18], пожарное оборудование успешно эксплуатируется на ряде крупных предприятий для тушения пожаров резервуаров с бензином [12, 16]. Установлено, что время тушения пожара в четыре раза меньше нормативного. Отмечается эффективность тушения пожаров в зданиях повышенной этажности (до 200 м) и возможность тушения энергоустановок под напряжением. Установлено, что при тушении компрессионной пеной разлива моторного масла время его тушения сокращается в два раза.

Значительная часть публикаций посвящена исследованиям свойств компрессионной пены [1, 3, 5, 7- 9], в результате экспериментальных исследований получена зависимость коэффициента гидравлического трения компрессионной пены от объемного газосодержания, что позволяет определять потери давления при транспортировании компрессионной пены по рукавной линии. Кроме того, экспериментально исследована дальность подачи компрессионной пены через ручные пожарные стволы, результаты подтвердили существенное увеличение дальности ее подачи по отношению к классической полидисперсной пене.

В работе [11] автор приводит зависимость для градиента давления компрессионной пены в рукавной линии, заимствованную из иностранных научных источников, однако ее структуру не обосновывает, само выражение содержит неточность.

Исследовано влияние низких температур на движение компрессионной пены в рукавной линии [9]. Для расчета охлаждения пены автор использовал коэффициент теплопередачи от внешней среды до пены в цилиндрическом рукаве. Однако указанный коэффициент теплопередачи применяют для расчета

теплопотерь через плоскую стенку, при этом погрешность определения температуры компрессионной пены в рукавной линии составила 17 %.

Несмотря на ряд проведенных исследований актуальными остаются вопросы повышения точности определения температуры и учет влияния низкой температуры окружающей среды на параметры течения компрессионной пены в рукавной линии, что позволит оценить соответствие параметров пенного потока нормативному значению интенсивности подачи компрессионной пены в зону пожара.

Результаты исследований. Тушение пожара компрессионной пеной в условиях низких температур сопровождается охлаждением движущейся пены вдоль рукавной линии. Простейшее уравнение теплового баланса может быть представлено в виде

$$C_n m_n dT = \alpha (T - T_o) S dt, \quad (1)$$

где C_n – теплоемкость компрессионной пены, Дж/(кг · К);

m_n – масса компрессионной пены, кг;

T – температура пены, К;

α – коэффициент теплоотдачи от пены в окружающую среду, Вт/(м² · К);

T_o – температура окружающей среды, К;

S – площадь поверхности теплоотдачи, м²;

t – время, с.

В качестве коэффициента теплоотдачи традиционно используют выражение [21]:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (2)$$

где δ – толщина стенки рукава, м;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от пены к внутренней поверхности рукава, Вт/(м² · К);

α_2 – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности рукава в окружающую среду, Вт/(м² · К);

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки рукава, Вт/(м² · К).

Выражение (2) применимо для плоской стенки. Использование его для цилиндрической поверхности рукавной линии увеличивает ошибку на 4-5 %. Поэтому для учета передачи тепла через цилиндрическую поверхность рукава используется линейный коэффициент теплопередачи для цилиндрических труб [21], K_l , Вт/(м · К)

$$K_l = - \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \left(\frac{1}{2\lambda}\right) \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}},$$

где d_1, d_2 – внутренний и наружный диаметры пожарного рукава соответственно, м.

В связи с вышеизложенным уравнение (1) принимает вид

$$C_n m_n dT = - K_l (T - T_o) l dt, \quad (3)$$

где l – длина рукава, м.

Представим массу пены в рукаве в виде произведения

$$m_n = \rho_n S_p l, \quad (4)$$

где ρ_n – плотность компрессионной пены, кг/м³;

S_p – площадь сечения пожарного рукава, м².

Для того, чтобы перейти от временной зависимости $T(t)$ к зависимости $T(x)$, где x – переменная величина, идентифицирующая длину рукава, м, воспользуемся уравнением для определения скорости движения пены в пожарном рукаве

$$v_n = \frac{dx}{dt}. \quad (5)$$

Определим dt из уравнения (5) и подставляем его в правую часть уравнения (3). Одновременно вместо m_n подставляем его выражение из уравнения (4) в левую часть уравнения (3), получаем

$$v_n C_n \rho_n S l dT = - K_l (T - T_o) l dx, \quad (6)$$

Преобразуем уравнение (6), с того, произведение

$$v_n \rho_n S = G_n,$$

где G_n – массовый расход пены в пожарном рукаве, кг/с.

Тогда уравнение (6) принимает вид

$$C_n G_n dT = - K_l (T - T_o) dx. \quad (7)$$

Разделяем переменные в дифференциальном уравнении (7)

$$\frac{d(T - T_o)}{T - T_o} = - \frac{K_l}{C_n G_n} dx \quad (8)$$

и интегрируем обе части уравнения (8)

$$\int_{T_n}^T \frac{d(T - T_o)}{T - T_o} = - \int_0^x \frac{K_l}{C_n G_n} dx,$$

где T_n – начальная температура компрессионной пены, К.

В результате получаем зависимость температуры T от продольной координаты x рукавной линии

$$T = T_o + (T_n - T_o) \exp \left(- \frac{K_l}{C_n G_n} x \right). \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что при $x = 0$ $T = T_n$, а при $x \rightarrow \infty$ $T \rightarrow T_o$, то есть полученное уравнение правильно отображает физический процесс охлаждения компрессионной пены в рукавной линии.

Для нахождения начальной температуры T_n компрессионной пены рассмотрим конструктивную схему аэратора (рис.).

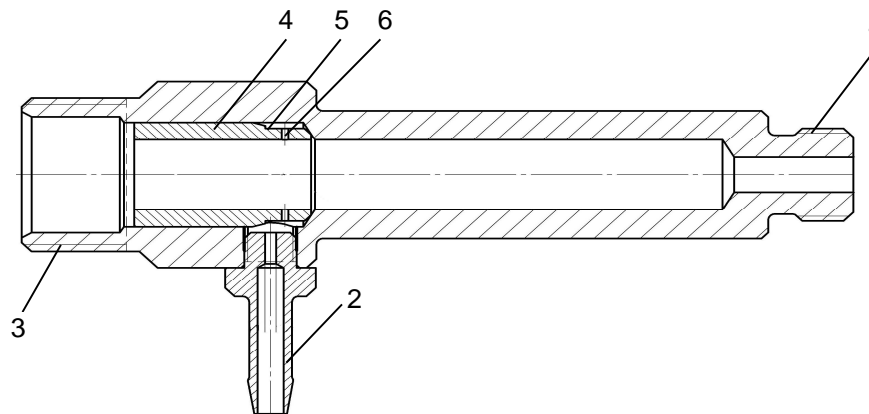


Рис. Конструктивная схема аэратора:

1 - входное соединение; 2 - штуцер подвода воздуха; 3 - выходное соединение;
4 - втулка; 5 - кольцевая проточка; 6 - отверстия

Водный раствор пенообразователя (жидкая фаза) подают со входа 1 аэратора вдоль его продольной оси, а газ (сжатый воздух) – перпендикулярно потоку жидкой фазы через штуцер 2, кольцевую проточку 5 и отверстия 6 во втулке 4. В результате на выходе аэратора образуется поток компрессионной пены, который подается в соединенный с аэратором пожарный рукав. При движении в рукавной линии процесс пенообразования продолжается до полного перехода жидкой и газовой фаз в «однофазный» пенный поток. В отличие от традиционно получаемой эжекционным путем воздушно-механической пены сеточной генерации свободная фаза (жидкость) в компрессионной пене отсутствует. При соединении жидкой и газовой фаз и их преобразовании в пену выполняются законы сохранения энергии и сохранения количества движения.

Баланс полной энергии можно записать в виде

$$G_2 i_2^* + G_6 i_6^* = const, \quad (10)$$

где G_2 - массовый расход газа, кг/с;

i_2^* - удельная энтальпия торможения газа, Дж/кг:

$$i_2^* = i_2 + \frac{v_2^2}{2};$$

$i_2 = C_2 T_2$ – статическая удельная энтальпия газа, Дж/кг;

C_2 - теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг × К);

T_2 - температура газовой фазы, К;

v_2 - скорость газа, м/с;

G_6 - массовый расход воды, кг/с;

i_6^* - удельная энтальпия торможения воды, Дж/кг:

$$i_6^* = i_6 + \frac{v_6^2}{2};$$

$i_6 = C_6 T_6$ - удельная статическая энтальпия воды, Дж/кг;

C_6 – теплоемкость воды, Дж/(кг · К);

T_6 – температура воды, К;

v_6 – скорость воды, м/с.

Уравнение (10) применительно к аэратору можно представить в развернутом виде

$$\left(C_2 T_2 + \frac{v_2^2}{2}\right) G_2 + \left(C_6 T_6 + \frac{v_6^2}{2}\right) G_6 = \left(C_n T_n + \frac{v_n^2}{2}\right) (1 - \alpha_6) (G_6 + G_2) + \Delta E,$$

$$\Delta E = \left(C_6 T_n + \frac{v_n^2}{2}\right) \alpha_6 G_6,$$

где ΔE – энергия жидкой фазы в пене, Дж/с;

α_6 – массовая доля свободной жидкой фазы в пене;

C_n – теплоемкость пены, Дж/(кг · К);

v_n – скорость пены, м/с.

Для компрессионной пены можно считать $\alpha_6 = 0$, поскольку вся жидкая фаза сосредоточена в оболочках пузырьков без остатка. Кроме того, при перпендикулярном введении газовой фазы в движущийся поток жидкости проекция скорости газа v_2 на продольную ось x равна нулю. Тогда уравнение баланса энергии для компрессионной пены запишем в виде

$$C_2 T_2 G_2 + \left(C_6 T_6 + \frac{v_6^2}{2}\right) G_6 = \left(C_n T_n + \frac{v_n^2}{2}\right) (G_6 + G_2). \quad (11)$$

Из уравнения (11) определим начальную температуру пены

$$T_n = \left[\frac{C_2 T_2 G_2 + \left(C_6 T_6 + \frac{v_6^2}{2}\right) G_6}{(G_6 + G_2)} - \frac{v_n^2}{2} \right] \frac{1}{C_n}. \quad (12)$$

В выражении (12) неизвестная величина – скорость пены v_n . Для ее определения составляем уравнение баланса количества движения пенного потока

$$G_2 v_2 + P_2 F_2 + G_6 v_6 + P_6 F_6 = (G_6 + G_2) v_n + P_n F_n,$$

где P_2, P_6, P_n – давление газа, воды, пены (соответственно), Па;

F_2, F_6, F_n – площадь сечения газового, водного, пенного потока (соответственно), м².

С учетом того, что $\bar{v}_2 \perp \bar{v}_6$ выражение для v_n имеет вид

$$v_n = \frac{P_2 F_2 + P_6 F_6 + G_6 v_6 - P_n F_n}{G_6 + G_2}. \quad (13)$$

При одинаковых давлениях подвода газа и воды имеем $P_2 = P_6 = P_0$. Тогда зависимость (13) перепишем в виде

$$v_n = \frac{P_0 \left(\frac{F_z + F_g - F_n}{G_g + G_z} \right) + G_g v_g}{G_g + G_z}, \quad (14)$$

где P_0 – давление в начале рукавной линии, Па.

Подставляя зависимость (14) в выражение (12), получим:

$$T_n = \left[\frac{C_2 T_2 G_z + \left(C_6 T_g + \frac{v_g^2}{2} \right) G_g}{(G_g + G_z)} - \left(\frac{P_0 \left(\frac{F_z + F_g - F_n}{G_g + G_z} \right) + G_g v_g}{G_g + G_z} \right)^2 \right] \frac{1}{2} \frac{1}{C_n}. \quad (15)$$

Если принять допущение, что в рукавной линии имеет место независимое движение пузырьков (рукавная линия находится под давлением), то используя аппроксимацию [8] сопротивления трения от скорости пузырьков пены можно записать зависимость потерь давления в виде:

$$\Delta p = \frac{l}{d} \cdot 10^{-3} (0,7v_n^2 + 4,5v_n + 6,2),$$

где d – внутренний диаметр рукава, м;

Δp – потери давления, Па.

Тогда давление при произвольной длине рукава x составит

$$P = P_o - \Delta p$$

или

$$P = P_o - \frac{x}{d} \cdot 10^{-3} (0,7v_n^2 + 4,5v_n + 6,2). \quad (16)$$

Скорость пены в произвольной точке длины x рукава найдем по формуле:

$$v_n = \frac{G_n}{\rho_n S_p}, \quad (17)$$

где ρ_n – плотность пены, кг/м³.

Плотность пены рассчитаем как средневзвешенное по массовому расходу значение жидкой и газовой фаз:

$$\rho_n = \rho_g \frac{G_g}{G_g + G_z} + \rho_z \frac{G_z}{G_g + G_z}, \quad (18)$$

где ρ_g – плотность воды, кг/м³;

ρ_z – плотность газа, кг/м³;

Плотность газа находим из уравнения состояния идеального газа

$$\rho_z = \frac{P}{RT}, \quad (19)$$

где R – газовая постоянная воздуха, Дж/(кг · К).

Подставляя правую часть выражения (16) в уравнение (19), получим:

$$\rho_z = \frac{P_o - \frac{x}{d} \cdot 10^{-3} (0,7v_n^2 + 4,5v_n + 6,2)}{RT}. \quad (20)$$

Последовательно подставляем ρ_z из выражения (20) в правую часть выражения (18), а затем ρ_n – в правую часть уравнения (17), получим зависимость:

$$v_n = \frac{G_n}{\left[\rho_g \frac{G_g}{G_n} + \frac{P_o - \frac{x}{d} \cdot 10^{-3} (0,7v_n^2 + 4,5v_n + 6,2)}{RT} \frac{G_z}{G_n} \right] S_p}. \quad (21)$$

После преобразования зависимости (21) получаем приведенное к стандартному виду кубическое уравнение относительно v_n :

$$\frac{0,7 \cdot 10^{-3} G_z x}{d} v_n^3 + \frac{4,5 \cdot 10^{-3} G_z x}{d} v_n^2 + \left(\frac{6,2 \cdot 10^{-3} G_z x}{d} - \rho_g G_g R T - G_z P_o \right) v_n + \frac{G_n^2}{S_p} RT = 0. \quad (22)$$

В результате решения уравнения (22) относительно v_n определим объемный расход пены по длине x рукавной линии и температуре пены T :

$$Q_n = S_p v_n,$$

что позволяет оценить фактический объемный расход компрессионной пены с учетом влияния низкой температуры и обеспечить нормативную интенсивность подачи пены для эффективного тушения пожара.

Выводы. В результате исследований разработана математическая модель теплового баланса движущейся в рукавной линии компрессионной пены, отличающаяся повышенной на 4-5 % точностью определения температуры пенного потока. Предложен метод расчета выходных параметров аэратора (температуры, скорости) на основе уравнений баланса энергии и количества движения в двухфазном потоке. Впервые получено алгебраическое уравнение для определения скорости движения компрессионной пены в условиях действия низких температур, что позволяет определить влияние температуры окружающей среды на объемный расход компрессионной пены, подаваемой в зону горения.

Список литературы / References

1. Камлюк, А. Н. Методы применения компрессионной пены для тушения пожаров / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин // Техносферная безопасность. – 2018. – № 3 (20). – С. 3–14.
Kamlyuk, A. N., Grachulin A. V. *Metody primeneniya kompressionnoy peny dlya tusheniya pozharov* [Methods of using compression foam for extinguishing fires]. Technosphere safety, 2018, no. 3, pp. 3-14. (In Russian)

2. Камлюк, А. Н. Особенности применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин // Вестник университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т.2, № 2. – С. 168–175.

Kamlyuk, A. N., Grachulin A. V. *Osobennosti primeneniya penogeneriruyushchikh sistem so szhatym vozdukhom dlya tusheniya pozharov* [Features of the use of foam-generating systems with compressed air for extinguishing fires]. Bulletin of the University of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 168-175. (In Russian)

3. Скорупич, И. С. Экспериментальные исследования подачи струи компрессионной пены / И. С. Скорупич, А. В. Грачулин, К. Е. Шинкаренко // Вестник университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т.6, № 2. – С. 201–210.

Skorupich, I. S., Grachulin, A. V., Shinkarenko, K. E. *Eksperymentalnyye issledovaniya podachi strui kompressionnoy peny* [Experimental studies of the supply of a jet of compression foam]. Bulletin of the University of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 201-210. (In Russian)

4. Шварев, А. Ю. Компрессионная пена – помощник пожарной охраны / А. Ю. Шварев, В. А. Смирнов // Аллея науки. – 2019. – Т.1, № 1(28). – С. 816–824.

Shvarev, A. Yu., Smirnov, V. A. *Kompressionnaya pena – pomoshchnik pozharной okhrany* [Compression foam - assistant to the fire department]. Alley of Science, 2019, vol. 1, no. 1(28), pp. 816-824. (In Russian)

5. Шинкоренко, К. Е. Методика экспериментального определения режимов течения компрессионной пены / К. Е. Шинкоренко, А. В. Грачулин, В. Н. Рябцев // Вестник университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т.7, № 2. – С. 188–201.

Shinkorenko, K. E., Grachulin, A. V., Ryabtsev, V. N. *Metodika eksperimentalnogo opredeleniya rezhimov techeniya kompressionnoy peny* [Methodology for experimental determination of compression foam flow regimes]. Bulletin of the University of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 188-201. (In Russian)

6. Алешков, М. В. Применение компрессионной пены при тушении пожаров в зданиях повышенной этажности / М. В. Алешков, В. М. Ройтман, С. С. Воевода // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 3. – С. 59–62.

Aleshkov, M. V., Roytman, V. M., Voevoda, S. S. *Primeneniye kompressionnoy peny pri tushenii pozharov v zdaniyakh povyshennoy etazhnosti* [Use of compression foam for extinguishing fires in high-rise buildings]. Fires and emergencies: prevention, liquidation, 2019, no. 3, pp. 59-62. (In Russian)

7. Грачулин, А. В. Методы применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров : специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Грачулин Александр Владимирович; Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь». – Минск, 2017. – 23 с. – Место защиты: ГУО «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Grachulin, A. V. *Metody primeneniya penogeneriruyushchikh sistem so szhatym vozdukhom dlya tusheniya pozharov* [Methods of using foam-generating systems with compressed air for extinguishing fires : 05.26.03 «Fire and Industrial Safety» (by industry) specialty : abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Grachulin Alexander Vladimirovich]. Minsk, 2017, 23 p. Place of thesis defence: State Educational Institution «University of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus». (In Russian)

8. Карпенчук, И. В. Реологические особенности при подаче пены пеногенерирующими системами со сжатым воздухом / И. В. Карпенчук, А. В. Грачулин // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2011. – № 2 (14). – С. 88–95.

Karpenchuk, I. V., Grachulin, A. V. *Reologicheskiye osobennosti pri podache peny penogeneriruyushchimi sistemami so szhatym vozdukhom* [Rheological features during foam

delivery by foam-generating systems with compressed air]. Bulletin of the Command Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 2011, no. 2 (14), pp. 88-95. (In Russian)

9. Гумиров, А. С. Подача компрессионной пены по насосно-рукавным системам при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур : специальность 2.10.1 «Пожарная безопасность (технические науки)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гумиров Андрей Сергеевич. – М., 2025. – 24 с. – Место защиты: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России.

Gumirov, A. S. *Podacha kompressionnoy peny po nasosno-rukavnym sistemam pri tushenii pozharov na ob'yektakh energetiki v usloviyakh nizkikh temperatur* [Supply of compression foam through pump-hose systems during fire extinguishing at energy facilities in low-temperature conditions : 2.10.1 “Fire safety” (technical sciences) specialty : abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Gumirov Andrey Sergeevich]. Moscow, 2025, 24 p. Place of thesis defence: Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. (In Russian)

10. Камлюк, А. Н. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом / А. Н. Камлюк, О. Д. Навроцкий, А. В. Грачулин // Вестник университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т.1, № 1. – С. 44–53.

Kamlyuk, A. N., Navrotsky, O. D., Grachulin, A. V. *Tusheniye pozharov penogeneriruyushchimi sistemami so szhатыm vozdukhom* [Fire extinguishing with foam-generating systems using compressed air]. Bulletin of the University of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 44-55. (In Russian)

11. Сизонова, Н. А. Средства получения и перспективы применения компрессионной пены в пожаротушении / Н. А. Сизонова // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2024. – № 3 (34). – С. 211–220.

Sizonova, N. A. *Sredstva polucheniya i perspektivy primeneniya kompressionnoy peny v pozharotushenii* [Means of obtaining and prospects for the use of compression foam in fire extinguishing]. Siberian fire and rescue bulletin, 2024, no. 3 (34), pp. 211-220. (In Russian)

12. Микушина, В. ГК «Сталт». Тушение резервуаров компрессионной пеной / В. Микушина // Тренды. События. Рынки. – 2020. – № 8–9. – С. 161–162.

Mikushina, V. *GK «Stalt». Tusheniye rezervuarov kompressionnoy penoy* [GC «Stalt». Extinguishing tanks with compression foam]. Trends. Events. Markets, 2020, no. 8-9, pp. 161-162. (In Russian)

13. Карапузиков, А. А. К вопросу об эффективности применения в тушении пожаров компрессионной пены NATISK / А. А. Карапузиков, М. Р. Шавалеев, А. А. Палло // Техносферная безопасность. – 2019. – № 3 (24). – С. 30–35.

Karapuzikov, A. A., Shavaleev, M. R., Pallo, A. A. *K voprosu ob effektivnosti primeneniya v tushenii pozharov kompressionnoy peny NATISK* [On the effectiveness of using NATISK compression foam in extinguishing fires]. Technosphere safety, 2019, no. 3 (24), pp. 30-35. (In Russian)

14. Алешков, М. В. Обзор применения технологии подачи компрессионной пены при тушении пожаров электрооборудования под напряжением / М. В. Алешков, Р. А. Емельянов, А. А. Колбасин // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 4 (62). – С. 1–6.

Aleshkov, M. V., Emelianov, R. A., Kolbasin, A. A. *Obzor primeneniya tekhnologii podachi kompressionnoy peny pri tushenii pozharov elektrooborudovaniya pod napryazheniyem* [Review of the application of compression foam supply technology for extinguishing fires in live electrical equipment]. Technologies of technosphere safety, 2015, no. 4 (62), pp. 1-6. (In Russian)

15. Калашников, С. А. Инновационная технология пожаротушения с применением компрессионной пены / С. А. Калашников // Башкирский экологический вестник. – 2012. – № 1 (30). – С. 23–24.

Kalashnikov, S. A. *Innovatsionnaya tekhnologiya pozharotusheniya s primeneniym kompressionnoy peny* [Innovative fire extinguishing technology using compression foam]. Bashkir Ecological Bulletin, 2012, no. 1, pp. 23-24. (In Russian)

16. Установка пожаротушения генерированием пены компрессионным способом : руководство по проектированию / ООО «СТАЛТ». – СПб., 2019. – 67 с.

Ustanovka pozharotusheniya generirovaniym peny kompressionnym sposobom : rukovodstvo po proyektirovaniyu [Fire extinguishing installation with foam generation using compression method: design manual]. ООО STALT, St. Petersburg, 2019, 67 p. (In Russian)

17. Компрессионная пена – история развития в мире и применения в России // Сфера. Нефть и газ. – 2021. – № 1 (80). – С. 104–106.

Kompressionnaya pena – istoriya razvitiya v mire i primeneniya v Rossii [Compression foam – history of development in the world and application in Russia]. Sphere. Oil and Gas, 2021, no. 1 (80), pp. 104-106. (In Russian)

18. Белорожев, О. Н. Эффективность применения компрессионных пен при тушении пожаров / О. Н. Белорожев, И. В. Багажков // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2016. – Т.1, № 1(7). – С. 305–307.

Belorozhev, O. N. *Effektivnost primeneniya kompressionnykh pen pri tushenii pozharov* [Efficiency of using compression foams in extinguishing fires]. Fire safety: problems and prospects, 2016, vol. 1, no. 1 (7), pp. 305-307. (In Russian)

19. Белорожев, О. Н. Эффективность применения компрессионных пен при тушении пожаров / О. Н. Белорожев, И. В. Багажков, М. О. Бакенов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXVIII международной научно-практической конференции в 2 ч. Ч. 1. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2016. – С. 192–198.

Belorozhev, O. N., Bagazhkov, I. V., Bakenov, M. O. *Effektivnost primeneniya kompressionnykh pen pri tushenii pozharov* [Efficiency of using compression foams in extinguishing fires]. Actual problems of fire safety: materials of the XXVIII international scientific and practical conference in 2 parts, 2016, part 2, pp. 192-198. (In Russian)

20. Гришин, А. А. Особенности тушения пожаров при применении компрессионной пены / А. А. Гришин, М. Р. Шавалов // Развитие науки и образования: новые подходы и актуальные исследования : сб. науч. тр. по материалам XXXVIII Международной научно-практической конференции (Анапа, 21 февраля 2023 г.). – Анапа : ООО «НИЦ ЭСП» в ЮФО, 2023. – С. 21–25.

Grishin, A. A., Shavalov, M. R. *Osobennosti tusheniya pozharov pri primeneni kompressionnoy peny* [Features of fire extinguishing using compression foam]. Development of science and education: new approaches and current research: collection of scientific papers based on the materials of the XXXVIII International Scientific and Practical Conference, 2023, pp. 21-25. (In Russian)

21. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Книга 2. / под общ. ред. В. А. Григорьева и В. Н. Зорина; 2-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 559 с.

Grigoriev, V. A., Zorin, V. N., red. [Theoretical Foundations of Heat Engineering. Heat Engineering Experiment. Vol. 2]. Second edition. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988. 559 p. (In Russian)

Дата поступления рукописи 29.01.2026
Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым

Andrey Petrovich Kiryan, Cand. of Tech. Sci., Head of the Institute; e-mail: andrei-kiryan@mail.ru
Georgy Ivanovich Peftibay, Cand. of Tech. Sci., Head of Dep.; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru
Nikolay Aleksandrovich Galukhin, Senior Researcher; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-36

THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURE ON THE FLOW PARAMETERS OF COMPRESSION FOAM MOVING IN A HOSE LINE

Objective. Revealing the patterns of changes in the parameters of compression foam in the hose line under the influence of low ambient temperature to determine the flow rate supplied to the fire source.

Methods. Analytical studies of heat exchange processes between a cylindrical surface and the surrounding environment, fundamental laws of conservation of energy and momentum in two-phase flows, methods for determining pressure losses due to friction.

Results. The following were obtained: a differential equation for the temperature distribution of compression foam along the length of the hose line, and a third-degree algebraic equation for determining the foam flow rate depending on the length of the hose line and the ambient temperature.

Scientific novelty. A differential equation for the temperature distribution of compression foam along the hose line was obtained using a linear heat transfer coefficient for cylindrical surfaces, which reduces calculation errors by 4-5 %. For the first time, expressions were analytically derived for determining the foam velocity and its temperature at the aerator outlet. For the first time, an equation was obtained for determining the foam velocity in any section of the hose line, depending on its length and the foam temperature in that section.

Practical significance. The conducted studies allow us to analytically determine the consumption of compression foam supplied to the fire zone, taking into account the influence of temperature and the length of the hose line.

Keywords: compression foam; temperature influence; aerator calculation; heat exchange processes; pressure losses.

For citation: Kiryan A. P., Peftibay G. I., Galukhin N. A. The influence of low temperature on the flow parameters of compression foam moving in a hose line. *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 7-18. EDN YHSVRQ

УДК 622.822:[614.841:533.6]

*Евгений Александрович Головченко, канд. техн. наук, зам. нач. института;
e-mail: ennio_80@mail.ru*

*Олег Петрович Пашковский, инж., нач. отд.; e-mail: o.pashkovskiy@80.mchs.gov.ru
Федеральное государственное казенное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»
283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел. +7 (949) 340-97-96, +7 (949) 352-41-93*

*Геннадий Анатольевич Гусар, канд. техн. наук, доцент; e-mail: gusargan@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования*

*«Донецкий национальный технический университет»
283001, г. Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: +7 (949) 350-86-75*

*Андрей Николаевич Гришин, инж., нач. части; e-mail: vgshchlnr@list.ru
Федеральное государственное казенное учреждение*

*«Военизированная горноспасательная часть Луганской Народной Республики»
291493, г. Луганск, пгт. Юбилейное, ул. Артема, д. 4. Тел.: +7 (857) 235-29-80*

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОЖАРООПАСНОСТИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА С УЧЕТОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕГО ФИЛЬТРАЦИИ

Цель. Оценка вероятности возникновения пожаров в выработанных пространствах выемочных участков с учетом специфики аэродинамики фильтрационных потоков.

Метод. Аналитические исследования горнотехнических и горно-геологических условий выемочных участков угольных шахт с учетом фильтрационных потоков в выработанном пространстве.

Результаты. Проведенные исследования позволяют количественно оценить пожароопасность выработанного пространства и эффективность профилактических мероприятий и вентиляции для снижения пожароопасности выемочных участков.

Научная новизна. Установлены зависимости вероятности возникновения эндогенного пожара в выработанном пространстве от начальной скорости фильтрации и длины отработанной части выемочного столба, позволяющие оценить пожароопасность выемочного участка.

Практическая значимость. Количественная оценка пожароопасности выработанного пространства является важным положительным фактором при оперативном управлении вентиляцией угольных шахт. Использование полученных результатов на стадии проектирования вентиляции выемочных участков, разрабатывающих пласты, склонные к самовозгоранию, позволит своевременно прогнозировать наиболее неблагоприятные ситуации и повысить пожаробезопасность ведения горных работ.

Ключевые слова: пожароопасность; выработанное пространство; фильтрационные потоки; количественная оценка; аэродинамика; выемочный участок.

Для цитирования: Головченко Е. А., Пашковский О. П., Гусар Г. А., Гришин А. Н. Количественная оценка пожароопасности выработанного пространства с учетом аэродинамических показателей его фильтрации // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 19–26. – EDN YGGCXO

Постановка проблемы. Одним из основных факторов, обуславливающих развитие процессов самонагрева и самовозгорания угля в выработанном пространстве очистных забоев, являются утечки воздуха, которые в свою очередь, зависят от режимов проветривания выемочных участков.

Особенностью самонагрева угля в выработанном пространстве действующих очистных забоев является то обстоятельство, что физические условия эндотермических процессов подвержены значительным изменениям во времени и в пространстве. Призабойная часть очистного забоя характеризуется довольно

интенсивным проветриванием за счет струи воздуха в лаве, а скопления угля в глубине выработанного пространства часто оказываются практически изолированными в тепловом и аэродинамическом отношении от окружающей шахтной среды.

Оценка пожароопасности выработанных пространств аэродинамическими методами предупреждения эндогенных пожаров является актуальной научной задачей для повышения пожарной безопасности выемочных участков угольных шахт.

Анализ последних исследований. Одной из основных проблем аэродинамики выработанных пространств в части предупреждения и профилактики эндогенных пожаров является необходимость разработки научно обоснованных методов расчета утечек в зоне обрушения выработанного пространства выемочных участков.

В работах [1, 2] пожароопасность выработанного пространства при столбовой системе разработки характеризуется шириной зоны интенсивного проветривания. При этом многочисленными наблюдениями за температурой пород в выработанном пространстве установлено, что в зоне интенсивного проветривания обрушившейся толщи горных пород призабойного пространства не наблюдается повышение температуры угольного скопления.

В исследованиях [2–4] приведены статистические данные, полученные на шахтах Донецкого угольного бассейна, свидетельствующие о том, что эндогенные пожары в выработанном пространстве происходят не в призабойной части выемочного участка, а лишь в зоне, удаленной от фронта обрушения горных пород на 20 м и более.

Авторы [4, 5] предложили рассматривать пожароопасность тех или иных участков ведения горных работ лишь на основе исследования распределения концентрации кислорода в выработанном пространстве с учетом ряда горнотехнических факторов, влияющих на эндогенную пожароопасность.

Цель исследования. Оценка вероятности возникновения пожаров в выработанных пространствах выемочных участков с учетом специфики аэродинамики фильтрационных потоков.

Материалы и результаты исследований. В качестве количественной оценки пожароопасности выработанного пространства выемочного участка рассмотрим отношение объема пожароопасных зон выработанного пространства W_n , м³ (или площади пожароопасной зоны S_n , м²) к объему выработанного пространства в зоне фильтрационного течения воздуха W , м³ (или соответствующей площади S , м²).

$$\frac{W_n}{W} = \frac{S_n}{S} . \quad (1)$$

Вероятность возникновения пожара в выработанном пространстве определяется совокупностью факторов, каждый из которых в той или иной степени влияет на эту вероятность. Общая вероятность пожара может быть рассмотрена как совокупность вероятностей воздействия отдельных факторов на процесс возникновения и развития пожара. Возникновение пожара возможно при наличии трех факторов: угля, склонного к самовозгоранию, достаточного притока кислорода и соответствующего инкубационного периода самовозгорания угля.

Обозначим общую вероятность возникновения пожара P_n , тогда выражение для её определения имеет вид:

$$P_n = P_y \cdot P_{an} \cdot P_t, \quad (2)$$

где P_y – вероятность наличия достаточного количества угля, склонного к самовозгоранию, 1;

P_{an} – вероятность благоприятного аэродинамического режима, определяющая приток кислорода к углю и накопление тепла, 1;

P_t – вероятность нахождения угля в зоне S_n в пределах инкубационного периода, 1.

Величина P_{an} отражает влияние только аэродинамических условий на возникновение пожара и прямым образом связана с соотношением (1). Например, при $S_n = S$ имеет место полная вероятность притока кислорода в необходимом количестве к любой частице угля, находящегося в выработанном пространстве, при $S_n = 0$ такая вероятность полностью отсутствует, а при $0 < S_n < 1$ только определенное количество частиц угля доступно для притока кислорода.

Рассматривая совокупность большого числа частиц угля, распределенных равномерно в выработанном пространстве, можем полагать, что относительное количество частиц, доступных для притока кислорода, представляет собой вероятность нахождения частицы в пожароопасной зоне. Так как количество рассматриваемых частиц пропорционально объему или площади пожароопасной зоны, отношение S_n/S представляет собой не что иное, как вероятность P_{an} . Таким образом, величина

$$P_{an} = \frac{S_n}{S} \quad (3)$$

является также и вероятностью пожароопасности выработанного пространства.

В отличие от вероятностей P_y и P_t в формуле (2), которые количественным образом точно определить трудно и которые в меньшей степени могут быть изменены различными практическими воздействиями, вероятность пожароопасности P_{an} при прочих равных условиях может быть изменена с помощью выполнения ряда технических мероприятий. По этой причине вопросам профилактики подземных пожаров аэродинамическими (вентиляционными) методами всегда уделялось существенное внимание в плане определения относительной пожароопасности тех или иных режимов вентиляции.

Введенная в анализ рассматриваемого процесса вероятность пожароопасности P_{an} существенно расширяет возможности оценки пожароопасности, так как величина P_{an} учитывает специфику пространственного фильтрационного потока, которая играет важную роль в формировании пожароопасных условий с аэродинамической точки зрения.

Согласно [4, 6] величина пожароопасной зоны S_n зависит от условий фильтрации (скорость фильтрации V_0 , м/с), параметров выработанного пространства (длина лавы L , м, длина штрека X , м) и аэродинамических свойств выработанного пространства (коэффициент c , ед.). Специфика аэродинамики фильтрационного потока в выработанном пространстве выражается в численных значениях эмпирических коэффициентов, зависящих от горнотехнических и горно-геологических условий выемочного участка [6].

Используя данные по шахтам Донецкого угольного бассейна (табл.) для условий выработанных пространств выемочных участков пологого падения с прямооточной

схемой проветривания с последовательным разбавлением вредностей и отводом исходящей струи в направлении выработанного пространства, определим зависимость вероятности аэродинамической пожароопасности выработанного пространства $P_{ан}$ от начальной скорости фильтрации V_0 , м/с и длины отработанной части выемочного столба (рис.). Установленные зависимости дают представление об общем характере динамики вероятности $P_{ан}$.

Таблица

Данные по шахтам Донецкого угольного бассейна

Шахта, пласт	Нагрузка на забой, т/сут	Размеры выработанного пространства		Расход воздуха, подаваемого в забой, м ³ /с
		длина, м	ширина, м	
Им. Н. П. Баракова, k_5^H	1500	1400	250	21,4
«Самсоновская – Западная», k_2 ,	2200	1700	230	24,2
«Суходольская – Восточная», i_3^1	2500	1900	230	26,3
«Молодогвардейская», k_2	950	1500	220	21,0
Им. 50-летия СССР, i_3^1	750	1500	200	20,5
«Должанская – Капитальная», l_3	1750	2500	250	26,5

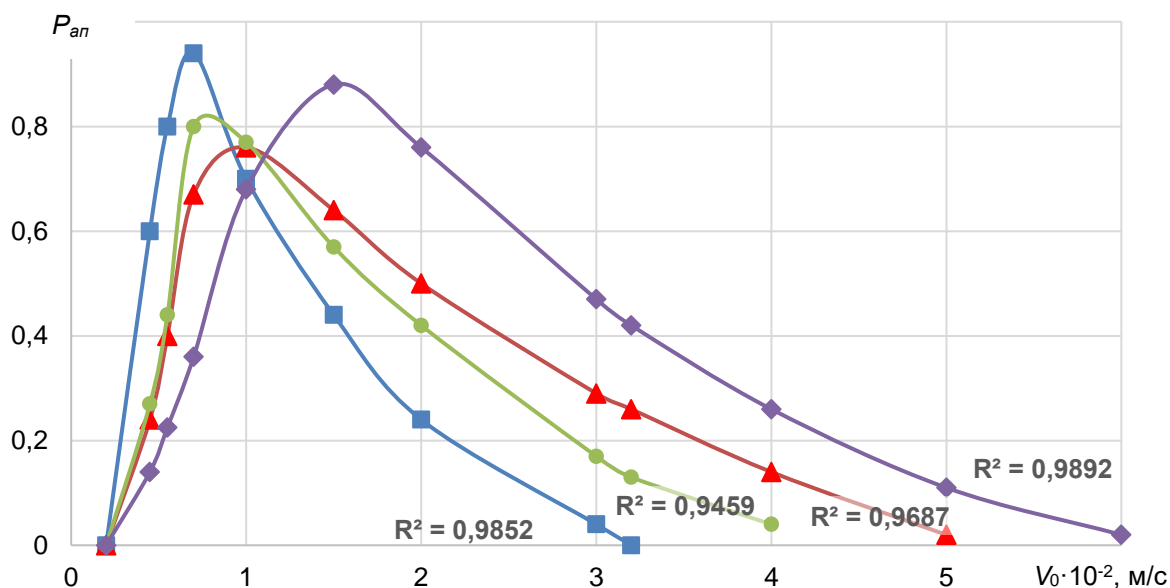


Рис. Зависимость вероятности аэродинамической пожароопасности выработанного пространства $P_{ан}$ от начальной скорости фильтрации V_0 , м/с при длине отработанной части столба:

■ – 300 м; ● – 500 м; ▲ – 700 м; ◆ – 900 м

Для выработанных пространств различного объема изменение вероятности пожароопасности выработанного пространства $P_{ан}$ от начальной скорости фильтрации V_0 характеризуется резким повышением величины $P_{ан}$ в области нижнего диапазона пожароопасных скоростей и относительно плавным её снижением в зоне высоких скоростей. Пожароопасные скорости фильтрации,

которым соответствуют высокие значения вероятности P_{an} находятся в диапазоне от $0,4 \cdot 10^{-2}$ до $2,0 \cdot 10^{-2}$ м/с для выработанных пространств разных объемов. Значения вероятности P_{an} находятся при этом в пределах 0,70–0,95 и являются весьма высокими.

Полученные зависимости вероятности пожароопасности выработанного пространства P_{an} имеют значение не только с точки зрения оценки пожароопасности выработанного пространства, но и с точки зрения оценки эффективности различного рода профилактических мероприятий и вентиляции выемочных участков, осуществляемых для снижения значений величины P_{an} .

В сущности, все профилактические мероприятия направлены на снижение начальной скорости фильтрации V_0 , так как изменение аэродинамического сопротивления выработанных пространств или выработок и депрессии участков, в конечном итоге, приводят к снижению величины V_0 .

Установленные зависимости позволяют практически оценить эффект снижения пожароопасности, который при различных исходных режимах вентиляции может изменяться. Снижение величины утечек воздуха через выработанные пространства, например, при исходных режимах вентиляции с начальной скоростью фильтрации $V_0 \geq 2,0 \cdot 10^{-2}$ м/с может привести к положительному, нулевому или даже отрицательному эффекту в зависимости от степени уменьшения величины V_0 и объема выработанного пространства. С другой стороны, незначительное снижение скорости фильтрации при исходных режимах с начальной скоростью фильтрации $V_0 \leq 0,7 \cdot 10^{-2}$ м/с всегда приводит к значительному снижению пожароопасности выработанного пространства.

При проектировании новых выемочных участков целесообразно проводить сравнение показателей действующих выемочных участков с данными зависимостей вероятности пожароопасности выработанного пространства P_{an} от начальной скорости фильтрации V_0 . Это сравнение показывает, что в условиях повышения интенсивности ведения горных работ (увеличения суточной нагрузки на забой) будет наблюдаться рост значений пожароопасности P_{an} , что связано с увеличением активно проветриваемой зоны выработанного пространства в пределах выемочного участка. Например, увеличение суточной нагрузки на забой с 750 до 1000 т/сут повысит значение вероятности пожароопасности выработанного пространства P_{an} в 1,4–2,6 раза.

В этих условиях оперативное регулирование вентиляции становится основным фактором снижения пожароопасности выработанного пространства. В целом данный фактор не следует рассматривать как жесткое ограничение при оперативном ее регулировании, однако, важно иметь в виду, что в большинстве случаев снижение количества воздуха, подаваемого на участок, в 1,5–2,5 раза способствует понижению показателя P_{an} в 1,2–1,8 раза.

Оценка вероятности пожароопасности выработанного пространства P_{an} является количественным параметром, однозначно определяющим возможность возникновения эндогенного пожара с учетом условий вентиляции выработанных пространств, а следовательно, и выемочных участков в целом. Возможность такой оценки столь сложного процесса является важным положительным фактором при оперативном управлении вентиляцией. Использование этого фактора необходимо осуществлять уже на стадии проектирования вентиляции шахт, разрабатывающих

пласты, склонные к самовозгоранию, путем расчетов вероятностей P_{an} для прогнозирования наиболее неблагоприятных, с данной точки зрения, ситуаций.

В условиях оперативного управления вентиляцией вероятность пожароопасности P_{an} должна выполнять функцию ограничения возможностей регулирования при изменяющихся горнотехнических и горно-геологических условиях. При этом можно исходить из практически целесообразной классификации выработанных пространств по фактору $P_{ап}$. Основой такой классификации является не только значения величины $P_{ап}$, но и возможности ее изменения.

С учетом проведенных исследований представляется целесообразным классифицировать пожароопасность выработанных пространств выемочных участков по аэродинамическим параметрам на три группы.

К первой группе относятся выработанные пространства, для которых вероятность пожароопасности выработанного пространства $P_{an} < 0,2$. При этом значение P_{an} может быть практически сведена к нулю за счет изменения режима вентиляции в сторону уменьшения или увеличения количества воздуха в рамках тех возможностей (25–30 % по количеству воздуха, подаваемого на участок), которые в большинстве случаев имеют место в практических условиях эксплуатации. Выработанные пространства первой группы можно рассматривать как малоопасные.

Ко второй группе следует отнести выработанные пространства, вероятность пожароопасности выработанного пространства которых находится в пределах $0,2 < P_{an} < 0,6$. На данных выемочных участках за счет управления вентиляцией пожароопасность может быть снижена, но не исключается полностью. Для обеспечения полной (или близкой к таковой) пожаробезопасности необходимы дополнительные мероприятия по повышению аэродинамического сопротивления. Выработанные пространства второй группы рассматриваются как опасные по фактору аэродинамических условий самовозгорания.

К третьей группе – повышенной пожароопасности – следует отнести выработанные пространства, для которых $0,6 \leq P_{an} \leq 1,0$. Обеспечение полной пожаробезопасности для таких выработанных пространств представляет сложную проблему. Для решения данной проблемы необходимо использовать комплекс известных и применяемых в настоящее время инженерно-технических средств. Борьба с эндогенными пожарами на выемочных участках с вероятностью пожароопасности выработанного пространства $P_{an} > 0,6$ должна проводиться по пути снижения всех составляющих вероятностей в формуле (2), т. е. включать также и мероприятия по понижению химической активности углей к окислению, снижению потерь угля и повышению интенсивности подвигания очистных забоев.

Выводы. Проведенные исследования позволяют количественно оценить пожароопасность выработанного пространства и эффективность различного рода профилактических мероприятий и вентиляции выемочных участков, осуществляемых для снижения пожароопасности выемочных участков.

Использование полученных результатов на стадии проектирования вентиляции выемочных участков, разрабатывающих пласты, склонные к самовозгоранию, позволит своевременно прогнозировать наиболее неблагоприятные ситуации и повысить пожаробезопасность ведения горных работ.

Список литературы / References

1. Аксенов, С. Г. Особенности эндогенных пожаров / С. Г. Аксенов, Э. С. Насырова, Л. А. Храмцова // Сборник трудов 63-й Международной научной конференции Астраханского государственного технического университета, посвященной 25-летию Астраханского государственного технического университета, Астрахань, 22–26 апреля 2019 года. – Астрахань, 2019. – С. 59–60.

Aksenov, S. G., Nasyrova, E. S., Khramtsova, L. A. *Osobennosti endogennykh pozharov* [Features of endogenous fires]. Proceedings of the 63rd International Scientific Conference of Astrakhan State Technical University dedicated to the 25th anniversary of Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 2019, April 22-26. Astrakhan, 2019, pp. 59-60. (In Russian)

2. Горин, Р. Ю. Современные методы прогнозирования эндогенных пожаров / Р. Ю. Горин // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2017. – № S4. – С. 28–32.

Gorin, P. Yu. *Sovremennye metody prognozirovaniya endogennykh pogarov* [Modern methods of forecasting endogenous fires]. Mining information and analytical bulletin (Scientific and Technical Journal). 2017, no. S4, pp. 28-32. (In Russian)

3. Голубев, Д. Д. Влияние комбинированных схем проветривания выемочного участка на эндогенную пожароопасность высокопроизводительных угольных шахт / Д. Д. Голубев // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2019. – № S6. – С. 66–74.

Golubev, D. D. *Vliyanie kombinirovannykh skhem provetrivaniya viemochnogo uchastka na endogennuyu pogaroopasnost visokoproizvoditelnykh ugolnykh shakht* [The influence of combined ventilation schemes of the excavation site on the endogenous fire hazard of high-performance coal mines]. Mining information and analytical bulletin (Scientific and Technical Journal). 2019, no. S6, pp. 66-74. (In Russian)

4. Оценка эндогенной пожароопасности при подземной разработке угольных пластов / П. А. Шлапаков, А. И. Фомин, С. В. Черданцев, А. Ю. Ерастов // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». – Кемерово, 2017. – С. 91–94.

Shlapakov, P. A., Fomin, A. I., Cherdantsev, S. V., Erastov, A. Yu. *Oценка endogennoy pogaroopasnosti pri podzemnoy razrabotke ugolnykh plastov* [Assessment of endogenous fire hazard in underground mining of coal seams]. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Modern Trends and Innovations in Science and Production», Kemerovo, 2017, pp. 91-94. (In Russian)

5. Оценка эндогенной пожароопасности выемочных участков / В. Б. Попов, Ли Хи Ун, О. В. Тайлаков, В. В. Соболев, С. Н. Кравченко // Уголь. – 2022. – №7 (1156). – С. 56–59.

Popov, V. B., Li Hi Un, Taylakov, O. V., Sobolev, V. V., Kravchenko, S. N. *Oценка endogennoy pogaroopasnosti viemochnykh uchastkov* [Assessment of the endogenous fire hazard of excavation sites]. Coal, 2022, no.7 (1156), pp. 56-59. (In Russian)

6. Торро, В. О. Аэродинамика выемочных полей на мощных пологих пластах / В. О. Торро, А. В. Ремезов, Г. Н. Ройт // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – №3 (115) – С. 21–30.

Torro, V. O., Remezov, A. V., Rout, G. N. *Aerodinamika viemochnih poley na moshchnih pologih plastah* [Aerodynamics of excavation fields on powerful shallow formations]. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016, no. 3 (115), pp. 59-60. (In Russian)

Дата поступления рукописи 08.12.2025
Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым

Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, *Cand. of Tech. Sci., Deputy Head of the Institute;*
e-mail: ennio_80@mail.ru

Oleg Petrovich Pashkovskiy, *Eng., Head of Department; e-mail: o.pashkovskiy@80.mchs.gov.ru*
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artyoma St., 157, Phone: +7 (856) 252-78-83

Gennady Anatolievich Gusar, *Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: gusargan@mail.ru*
Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Donetsk national technical university»
283001, Donetsk, Artema St., 58. Phone: +7 (949) 350-86-75

Andrey Nikolaevich Grishin, *Eng., Head of the Rescue Unit; e-mail: vgshchlnr@list.ru*
Federal State Institution «Paramilitary Mountain Rescue Unit of the Lugansk People's Republic»
291493, Lugansk, urban village Yubileynoe, Artema st., 4. Phone: +7 (857) 235-29-80

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE FIRE HAZARD OF MINED-OUT SPACE TAKING INTO ACCOUNT THE AERODYNAMIC INDICATORS OF ITS FILTRATION

Objective. Investigation of the probability of fires in the developed spaces of excavation sites, taking into account the specifics of the aerodynamics of filtration flows.

Methods. Analytical studies of statistical data on mining and geological conditions of coal mine excavation sites, taking into account filtration flows in the worked-out space.

Results. The conducted studies make it possible to quantify the fire hazard of the developed space and the effectiveness of various types of preventive measures and ventilation of excavation sites carried out in order to reduce the fire hazard of excavation sites.

Scientific novelty. The dependences of the probability of aerodynamic fire hazard of the exhausted space on the initial filtration rate and the length of the spent part of the excavation column are obtained, which make it possible to assess the fire hazard of the exhausted space.

Practical value. A quantitative assessment of the aerodynamic fire hazard of the generated space is an important positive factor in the operational management of coal mine ventilation. The use of this factor at the design stage of ventilation of excavation sites developing formations prone to spontaneous combustion will allow timely response to the most unfavorable situations from this point of view and increase the fire safety of mining operations.

Keywords: *fire hazard; developed space; filtration flows; quantitative assessment; aerodynamics; excavation site.*

For citation: Golovchenko Ye. A., Pashkovskiy O. P., Gusar G. A., Grishin A. N. Quantitative assessment of the fire hazard of mined-out space taking into account the aerodynamic indicators of its filtration. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 19-26. EDN YGGCXO

УДК 622.822:[622.413.3+622.41]:536.24

Александр Владиславович Агарков, канд. техн. наук, зам. нач. института;

e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 332-78-39

Виталий Леонидович Ефименко, канд. техн. наук, нач. каф.; *e-mail: vitaliy.yefimenko.74@mail.ru*

Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования

«Донецкий институт государственной противопожарной службы МЧС России»

283050, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 34А. Тел.: +7 (949) 300-37-29

Алексей Леонидович Кавера, канд. техн. наук, доц., зав. каф.; *e-mail: alexey.kavera@ro.ru*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Донецкий национальный технический университет»

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: +7 (949) 334-89-06

Дмитрий Сергеевич Евтеев, ст. преп. каф.; *e-mail: d.evteev@academygprs.ru*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Академия государственной противопожарной службы МЧС России»

129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4. Тел.: +7 (495) 617-27-27

ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ АВАРИЙНЫХ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПРИ ПОЖАРАХ

Цель. Проведение теоретических исследований тепломассообменных процессов в горных выработках аварийных участков угольных шахт при пожарах и сравнение полученных данных с результатами экспериментальных исследований по изучению динамики развития подземных пожаров в условиях экспериментальной штольни.

Методы. Используются аналитические, теоретические и экспериментальные методы исследования процессов тепломассопереноса с обработкой результатов использованием пакетов прикладных компьютерных программ Microsoft Office, Mathcad, Origin и других.

Результаты. Установлены аналитические зависимости температуры и концентраций газов для нестационарных и стационарных процессов распространения тепла и газов в зависимости от условий проветривания с учетом геометрических размеров горных выработок аварийных участков угольных шахт, а также коэффициентов тепло- и массопереноса в условиях подземного пожара.

Научная новизна. Разработана математическая модель тепломассообменных процессов в аварийных участках угольных шахт при пожарах с учетом геометрических размеров горных выработок, условий их проветривания, коэффициентов тепло- и массопереноса, которая позволяет определять динамику пожарных газов вдоль выработок.

Практическая значимость. Получение достоверных данных о газовой динамике на всем протяжении аварийных горных выработок с источниками газовыделения при пожарах позволит повысить уровень безопасности труда горноспасателей и эффективности ведения работ по ликвидации последствий аварий.

Ключевые слова: горноспасательная служба; угольная шахта; аварийный участок; горная выработка; подземные пожары экзогенного и эндогенного происхождения; тепломассообменные процессы; теоретические и экспериментальные исследования.

Для цитирования: Агарков Ал. В., Ефименко В. Л., Кавера А. Л., Евтеев Д. С. Тепломассообменные процессы в горных выработках аварийных участков угольных шахт при пожарах // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 27–37. – EDN WMFYOV

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Несмотря на ежегодное повышение уровня безопасности труда работников и промышленной безопасности угольных шахт,

добыча угля практически всегда сопровождается различными авариями: подземными пожарами, взрывами газовоздушной смеси и угольной пыли, внезапными выбросами угля, породы и газа, обрушениями горных пород, затоплениями горных выработок [1].

Подземные пожары – наиболее распространенный вид (около 50 % от общего количества) аварий, которые наносят угольной отрасли существенный материальный ущерб и сопровождаются большим риском для жизни и здоровья людей. Ликвидация пожаров сопряжена с высокой вероятностью взрыва газовоздушной смеси и возникновением других условий, опасных для жизни горноспасателей. Соответственно, получение достоверных данных о составе шахтной среды на аварийных участках угольных шахт путем прогнозирования и оценки газовой обстановки (температуры и концентраций газов) в горных выработках в течение всего периода ликвидации аварии – одно из главных условий безопасного и эффективного ведения горноспасательных работ.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ проведенных теоретических и экспериментальных исследований [2–9] позволил установить, что предлагаемые авторами методы прогнозирования газовой обстановки при пожарах в шахтах не позволяют достоверно осуществлять оценку динамики температуры и концентраций пожарных газов (оценку температурного поля и поля концентраций пожарных газов) с учетом геометрических размеров горных выработок, условий их проветривания, коэффициентов теплопереноса, наличия источников газо- и тепловыделения в условиях пожара и других параметров. Отсутствуют зависимости скорости распространения пожарных газов (концентраций газов и температуры) для стационарных и нестационарных процессов теплообмена в горных выработках аварийных участков угольных шахт.

Соответственно, математическое моделирование процессов теплопереноса и установление аналитических зависимостей температуры и концентраций газов для получения данных о газовой обстановке в аварийных горных выработках с источниками газовой выделенности при пожарах – актуальная научно-техническая задача, имеющая важное практическое значение.

Цель исследования – проведение теоретических исследований теплообменных процессов в горных выработках аварийных участков угольных шахт при пожарах и сравнение полученных данных с результатами экспериментальных исследований по изучению динамики развития подземных пожаров в условиях экспериментальной штольни.

Результаты исследований. При рассмотрении вопросов общего загазования горных выработок угольных шахт при пожарах для описания процессов теплопереноса используем нестационарное уравнение диффузии газа в потоке воздуха (уравнение нестационарной конвективной диффузии газов) [7, 8] в виде

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \frac{\partial (u\tilde{C})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) - j\tilde{C}, \quad (1)$$

где \tilde{C} – средняя по сечению выработки концентрация газа, кг/м³;

t – время с момента начала отсчета, с;

u – проекция скорости воздуха на ось координаты x , м/с;

x – продольная координата в горной выработке шахты, м;

D_x – коэффициент турбулентной диффузии газов по выработке, м²/с;
 j – коэффициент интенсивности поглощения различных газов, 1/с.

Для решения уравнения (1) необходимо использовать численный конечно-разностный метод: для первой производной – схема с центральными разностями, для второй – комбинированная схема с удельным весом p . Согласно модифицированной схеме с центральными разностями предлагается метод расчета газовых режимов в аварийном участке шахты, переноса газов в выработке при возникновении в ее начале источника газовой выделении с начальным и граничными условиями:

$$\tilde{C}(x, 0) = 0; \quad \tilde{C}(0, t) = 1; \quad \frac{\partial \tilde{C}(L, t)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где L – длина выработки, м.

Принимаем, что источники газовой выделении по длине выработки отсутствуют. Необходимо выполнить сравнение результатов расчета загазования выработки при постоянно действующем источнике газовой выделении по разностной схеме с аналитическим решением уравнения (1) при начальном и граничных условиях (2):

$$C(x, t) = 0,5 \left\{ 1 + \Phi \frac{\partial ut - x}{\partial \sqrt{D_x t}} + \exp \left[-\frac{\partial x}{\partial D_x} \right] \left[1 - \Phi \frac{\partial ut + x}{\partial \sqrt{D_x t}} \right] \right\}, \quad (3)$$

где C – концентрация газа, кг/м³;
 Φ – интеграл вероятности, 1.

При отсутствии проветривания горной выработки (скорость $u = 0$) решение (3) принимает вид

$$C(x, t) = 1 - \Phi \frac{\partial x}{\partial \sqrt{D_x t}} \quad (4)$$

Результаты численного моделирования и аналитических расчетов чистой диффузии газов в проветриваемой и непроветриваемой горных выработках представлены на рис. 1.

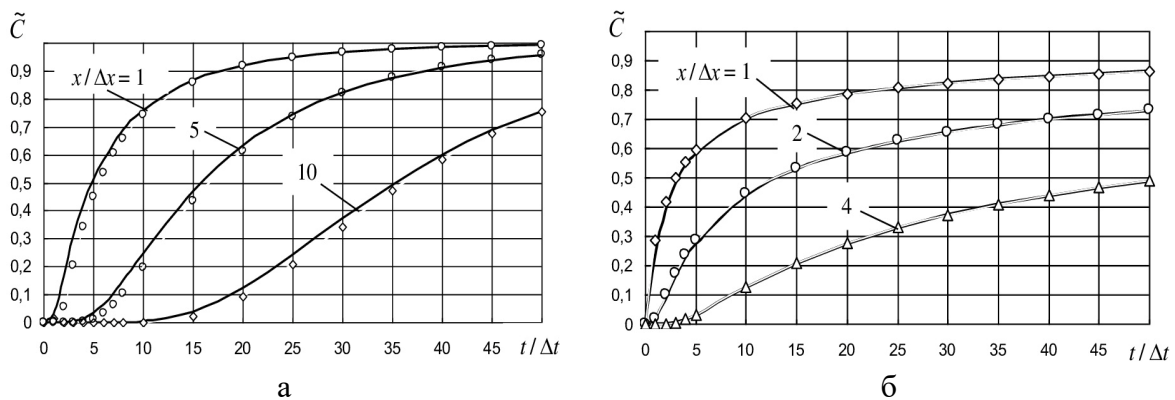


Рис. 1. Результаты численного моделирования (маркеры \diamond , \circ , Δ) и аналитические зависимости концентрации метана от времени на различных расстояниях от источника газовой выделении в проветриваемой (а) и непроветриваемой (б) горных выработках

Исходя из результатов сравнения численных расчетов с точными данными, предлагаемая схема достоверно отражает процессы загазования выработки, как при ее проветривании, так и при чистой диффузии газов. Исследуя вопрос загазования горной выработки при действии мгновенного источника газовой выделении в каком-либо месте, начальные и граничные условия:

$$\tilde{C}(x_i, 0) = 1; \quad \tilde{C}(0, t) = 0; \quad \tilde{C}(L, t) = 0, \quad (5)$$

где x_i – место действия мгновенного источника газовой выделении, м.

Зависимости концентрации метана в различных сечениях выработки от времени при действии мгновенного источника газовой выделении в начале выработки (на расстоянии $x_i = 4\Delta x$, где Δx – шаг по пространственной координате, м) представлены на рис. 2. При расчетах приняты схемные числа Куранта $Cu = 0,5$ и Пекле $Pe = 1/3$.

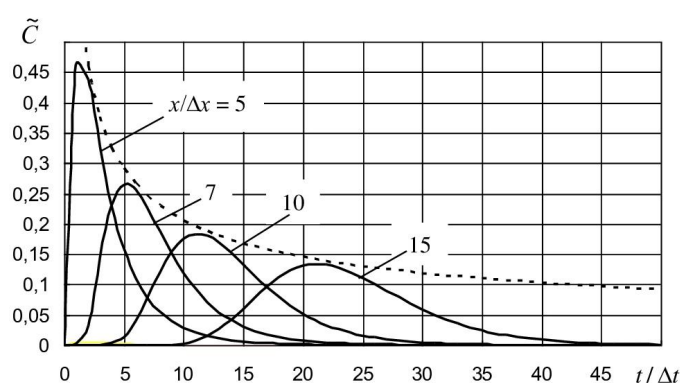


Рис. 2. Зависимости концентрации метана от времени в различных сечениях выработки при действии мгновенного источника газовой выделении

Таким образом, установлены аналитические зависимости скорости распространения пожарных газов для нестационарных процессов массообмена в зависимости от условий проветривания горных выработок с учетом их геометрических размеров и коэффициентов массопереноса. Соответственно, предлагаемая расчетная схема (3) и (4) позволяет получать численным методом достоверные данные о нестационарных процессах переноса газов в горных выработках с источниками газовой выделении при пожарах.

Для теоретического исследования температурного поля в горной выработке при пожаре рассмотрим квазистационарный процесс горения [2, 7], когда можно пренебречь изменениями во времени и изучить распределение средней по сечению выработки температуры. Уравнение при стационарном переносе тепла, аналогичное уравнению (1), вдоль выработки имеет вид

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \quad (6)$$

где T – температура воздуха в горной выработке, К;

v, w – проекции скорости воздуха на оси координат y и z , м/с;

y, z – вертикальная и поперечная координаты в горной выработке, м;

a – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с;

q – плотность источника выделения тепла, К/с.

Тогда средняя по сечению горной выработки температура перед зоной горения может быть определена по формуле

$$T(x) = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left(-\frac{\tilde{u}}{2a} + \sqrt{\frac{\tilde{u}^2}{4a^2} + \frac{a_{уд}}{a}}\right) x \quad (7)$$

а за зоной горения – по формуле

$$T(x) = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left(-\frac{\tilde{u}}{2a} - \sqrt{\frac{\tilde{u}^2}{4a^2} + \frac{a_{уд}}{a}}\right) x \quad (8)$$

где T_0 – температура воздуха при нормальных условиях, К;

T_1 – температура воздуха в зоне горения, К;

\tilde{u} – средняя по сечению горной выработки скорость воздуха, м/с;

$a_{уд}$ – удельный коэффициент теплообмена со стенками выработки, 1/с.

Задав исходные параметры, можно по формулам (7) и (8) установить распределение температур по всей длине горной выработки с очагом пожара. Распределение относительных температур перед и за очагом пожара при скорости движения воздуха 1 м/с в выработке, сечением 4 м², представлено на рис. 3.

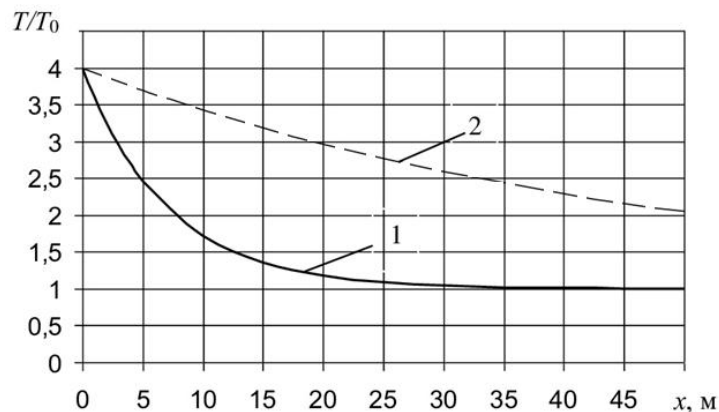


Рис. 3. Распределение относительных температур воздуха перед (1) и за (2) очагом пожара в горной выработке шахты

Соответственно, предложенные расчетные формулы позволяют определять изменение температурного поля в горной выработке при пожаре.

При исследовании поля концентраций газов, в частности – оксида углерода, в горной выработке с очагом пожара, используем уравнение сохранения компоненты газовой смеси за пределами очага пожара, аналогичное уравнению (8), имеет вид

$$r \frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Z}{D} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Z}{D} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{Z}{D} \right) \quad (9)$$

где r – плотность газа, кг/м³;

Z – концентрация одного из пожарных газов (оксида углерода), %;

t – время с момента возникновения пожара, с;

D – коэффициент турбулентной диффузии пожарного газа, м²/с.

В условиях развившегося пожара, когда градиент концентрации пожарного газа вдоль выработки становится постоянным, а процесс переноса – стационарным, концентрация газа, как за зоной горения ($\tilde{u} > 0$), так и перед зоной ($\tilde{u} < 0$), может быть определена по формуле

$$Z(x) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \exp\left(\frac{\tilde{u}}{2\tilde{D}} - \sqrt{\frac{\tilde{u}^2}{4\tilde{D}^2} + \frac{g}{\tilde{D}}}\right)x, \quad (10)$$

где Z_0 – концентрация пожарного газа на стенках выработки, %;

Z_1 – концентрация пожарного газа в зоне горения, %;

$\tilde{D} = rD / r_0$ – приведенный коэффициент турбулентной диффузии газа, м²/с;

r_0 – плотность воздуха, кг/м³;

$g = 4\tilde{D} / Dy^2$ – коэффициент газообмена со стенками выработки, 1/с.

Профили относительной концентрации оксида углерода на различных расстояниях перед и за очагом пожара при средних скоростях движения воздуха $\tilde{u} = 0,6$ м/с и $\tilde{u} = 1,2$ м/с и приведенном коэффициенте турбулентной диффузии пожарного газа $\tilde{D} = 5$ м²/с представлены на рис. 4. По оси ординат отложена безразмерная концентрация пожарного газа Z . Поэтому представленные зависимости применимы к газам (метан, оксид и диоксид углерода, водород), генерируемым при возникновении очага пожара (за исключением кислорода). Соответственно, представленные зависимости позволяют определять стационарный уровень распространения газов по горной выработке при пожаре.

Для определения достоверности результатов теоретических исследований использованы данные, полученные при изучении динамики развития подземного пожара в условиях экспериментальной штольни ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России», в которой для загорания крепи поджигали сложенные в начале выработки костры. Температура газов изменялась с течением времени и определялась по показаниям термопар, установленным по длине и высоте штольни. Изменение концентраций пожарных газов с течением времени исследовалось путем дистанционного отбора проб по трубопроводам, установленным по длине штольни, и дальнейшего их газового анализа [10, 11].

Установлены зависимости распределения температуры и концентраций пожарных газов, позволяющие определять характер и кинетику их распространения вдоль горной выработки. Изменение средней температуры пожарных газов во времени по длине штольни представлено на рис. 5.

Результаты экспериментальных исследований (зависимости) и результаты расчета (маркеры ●, ▲, ■) представлены в виде профилей распределения температуры пожарных газов по длине выработки на рис. 6.

Результаты экспериментальных исследований по измерению концентраций газов (оксида углерода и метана) во времени на различных расстояниях по длине выработки от очага пожара и расчетные кривые представлены на рис. 7, 8. Расчеты выполнены согласно формуле (3). Обработка результатов осуществлялась при использовании пакетов прикладных компьютерных программ Microsoft Office, Mathcad, Origin и других [12].

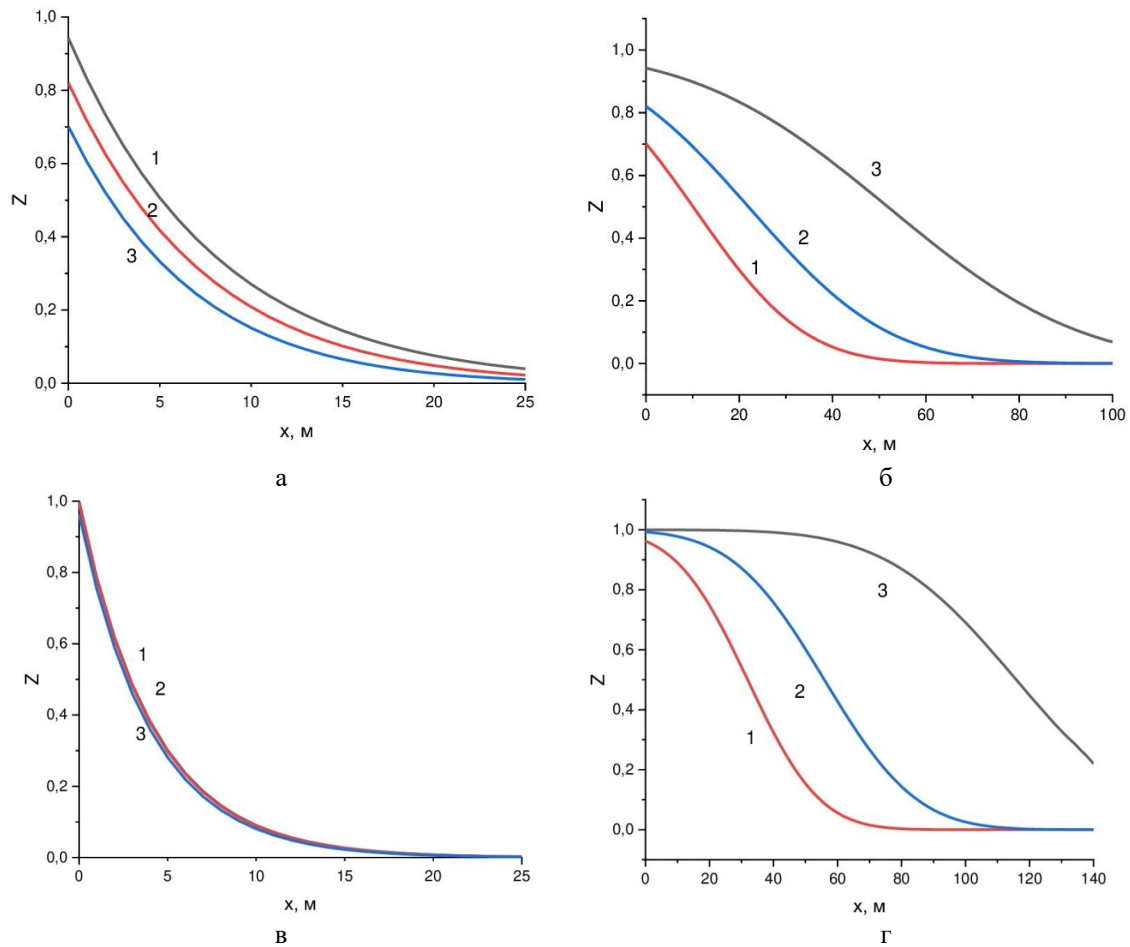


Рис. 4. Распределение относительной концентрации пожарного газа (оксида углерода) по длине выработки перед (а, в) и за (б, г) очагом пожара по направлению вентиляционной струи при скорости движения воздуха 0,6 м/с (а, б) и 1,2 м/с (в, г): 1 – через 30 с после начала возгорания, 2 – через 50 с, 3 – через 100 с

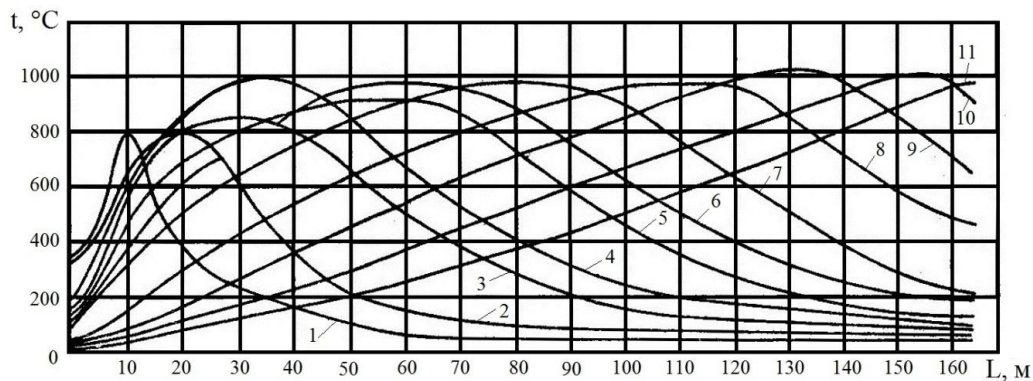


Рис. 5. Изменение средней температуры пожарных газов во времени: 1 – в начале эксперимента; 2 – через 20 мин; 3 – 40 мин; 4 – 1 ч.; 5 – 1 ч. 20 мин; 6 – 1 ч. 40 мин; 7 – 2 ч.; 8 – 2 ч. 20 мин; 9 – 2 ч. 40 мин; 10 – 3 ч.; 11 – 3 ч. 20 мин

Результаты экспериментов направлены на определение закономерностей распространения газов по длине штольни. Сравнение теоретических данных с результатами экспериментальных исследований позволило подтвердить

достоверность математических моделей переноса тепла и газов, и установить, что максимальная относительная погрешность не превышает 15 %.

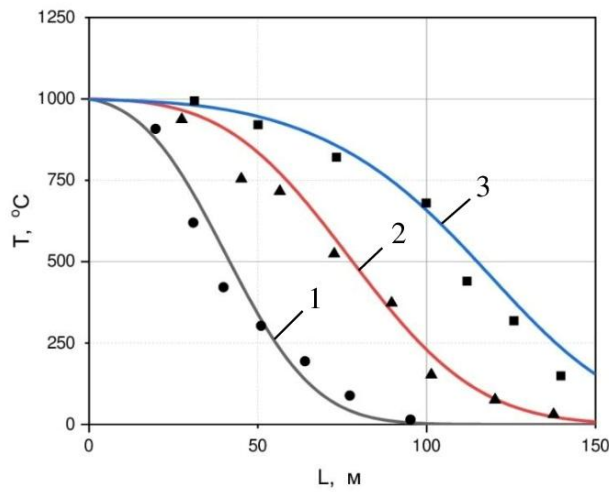


Рис. 6. Динамика температуры пожарных газов по длине выработки: 1 – через 1 ч с момента возгорания; 2 – через 2 ч; 3 – через 3 ч

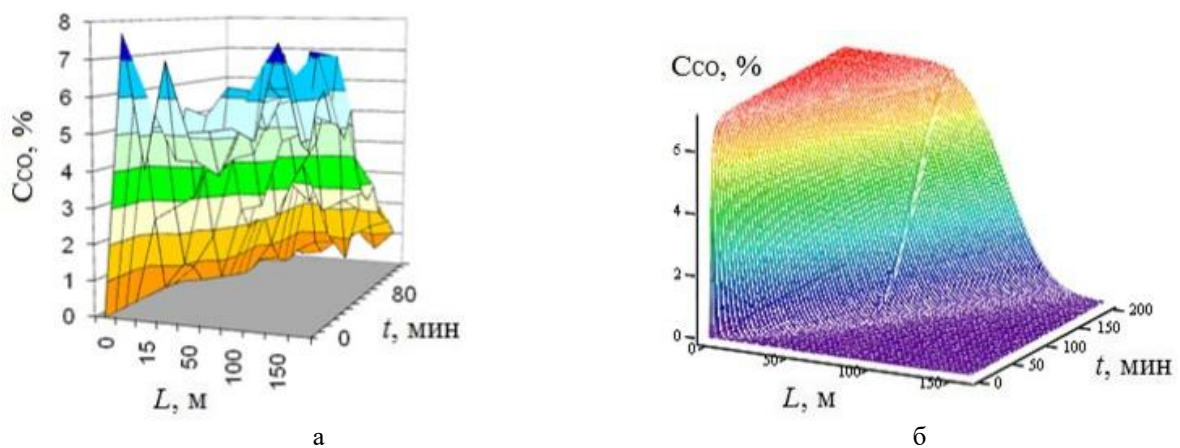


Рис. 7. Зависимость концентраций оксида углерода от времени и расстояния от очага пожара: а) экспериментальные данные; б) теоретические данные (результат расчета)

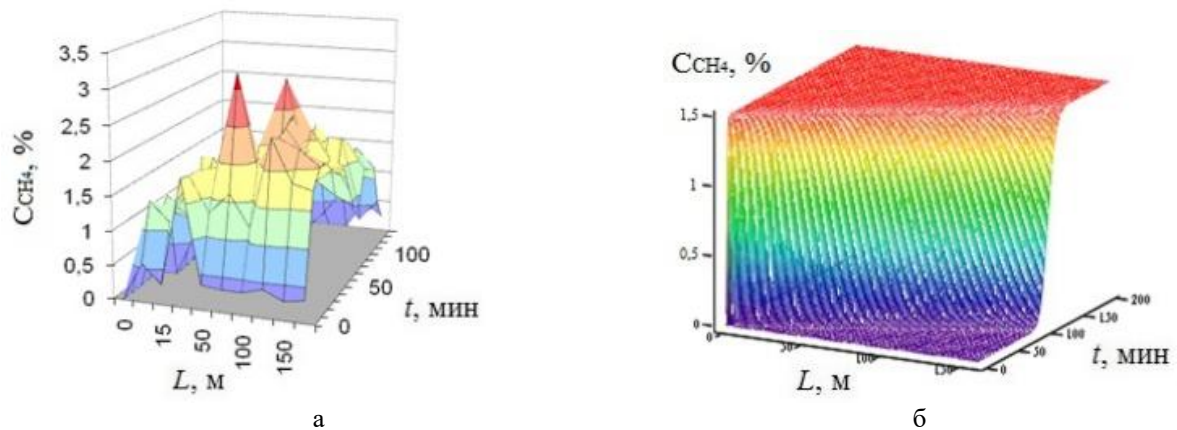


Рис. 8. Зависимость концентраций метана от времени и расстояния от очага пожара: а) экспериментальные данные; б) теоретические данные (результат расчета)

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Таким образом, установлены аналитические зависимости температуры и концентраций газов для нестационарных и стационарных процессов распространения тепла и газов в зависимости от условий проветривания с учетом геометрических размеров горных выработок аварийных участков угольных шахт, а также коэффициентов тепломассопереноса в условиях пожара.

Перспективное направление дальнейших исследований – разработка трехмерных математических моделей тепломассообменных процессов в горных выработках угольных шахт и рудников при различных видах аварий и аварийных ситуаций, а также сравнение полученных данных с результатами экспериментальных исследований при изучении динамики развития аварий и аварийных ситуаций в условиях опытных полигонов и горных предприятий.

Список литературы / References

1. Коликов, К. С. Аварийность и травматизм на предприятиях угольной отрасли / К. С. Коликов, В. Ю. Гришин, О. Г. Ишкхнели // Охрана труда и социальное страхование. – 2020. – № 6. – С. 34–44.

Kolikov, K. S., Grishin, V. Yu., Ishkhneli, O. G. *Avariynost i travmatizm na predpriyatiyakh ugolnoy otrasli* [Accidents and injuries in the coal industry]. Occupational safety and social security. 2020, no. 6, pp. 34-44. (In Russian)

2. Пузач, С. В. Математическое моделирование тепломассообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности / С. В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 150 с.

Puzach, S.V. *Matematicheskoe modelirovanie teplomassoobmena pri reshenii zadach požarovzryvobezопасности* [Mathematical modeling of heat and mass transfer in solving fire and explosion safety problems]. Moscow: SFA of EMERCOM of Russia Publ., 2003, 150 p. (In Russian)

3. Ушаков, К. З. Газовая динамика шахт / К. З. Ушаков. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 481 с.

Ushakov, K. Z. *Gazovaya dinamika shakht* [Gas dynamics of mines]. Moscow : Moscow State Mining University Publ., 2004, 481 p. (In Russian)

4. Пашковский, П. С. Опасность образования конвективных потоков при подземных пожарах в шахтах. Математическое моделирование и расчет параметров / П. С. Пашковский, Н. М. Кравченко, М. В. Кравченко // XXIV Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам пожарной безопасности: тез. докл., ч. 3. – М.: ВНИИПО, 2012. – С. 387–390.

Pashkovskij, P. S., Kravchenko, N. M., Kravchenko, M. V. *Opasnost obrazovaniya konvektivnyh potokov pri podzemnyh požarah v shahtah. Matematicheskoe modelirovanie i raschet parametrov* [The danger of convective currents during underground mine fires. Mathematical modeling and parameter calculation]. XXIV International Scientific and Practical Conference on Fire Safety Issues: abstracts of the report, part 3. – Moscow: VNIPO EMERCOM of Russia Publ., 2012, pp. 387-390. (In Russian)

5. Брюм, В. З. Методика расчета параметров подземного пожара по данным мониторинга / В. З. Брюм // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. – 2014. – № 51. – С. 106–115.

Bryum, V. Z. *Metodika rascheta parametrov podzemnogo požara po dannym monitoringa* [Methodology for calculating the parameters of an underground fire based on monitoring data]. Mining rescue work: collection of scientific papers, 2014, no. 51, pp. 106-115. (In Russian)

6. Греков, С. П. Формирование встречных потоков пожарных газов / С. П. Греков, И. Н. Зинченко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2016. – № 2 (53). – С. 25–32.

Grekov, S. P., Zinchenko, I. N. [Formation of counter-current flows of fire gases]. Scientific bulletin of NIIGD «Respirator», 2016, no. 2(53), pp. 25-32. (In Russian)

7. Пашковский, П. С. Единый подход к решению задач теплогазообмена при пожарах на различных объектах / П. С. Пашковский, С. П. Греков, И. Н. Зинченко // *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. – 2016. – Т. 44, № 4. – С. 83–88. – DOI 10.12845/bitp.44.4.2016.6. – EDN YMDA0V

Pashkovskij, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. [Combined Approach to Solving Issues of Heat and Gas Exchange Caused by Fires in Different Locations]. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*, 2016, vol. 44, no. 4, pp. 83-88. (In Russian)

8. Агеев, В.Г. Научные основы создания способов и средств локализации ударных волн при ведении горноспасательных работ по изоляции пожаров в шахтах : специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Агеев Владимир Григорьевич. – Донецк, 2016. – 417 с. Место защиты: Государственное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный технический университет».

Ageev, V.G. *Nauchnye osnovy sozdaniya sposobov i sredstv lokalizacii udarnyh voln pri vedenii gornospasatelnykh работ по izolyacii pozharov v shakhtakh* [Scientific foundations for the creation of methods and means of shock wave localization during mining rescue operations to isolate fires in mines : 05.26.03 «Fire and Industrial Safety» (construction) specialty : Doctor of Technical Sciences dissertation / Ageev Vladimir Grigor'evich]. Donetsk, 2016, 417 p. Place of thesis defence: State Educational Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University». (In Russian)

9. О методе оценки объёмов загазования взрывоопасной метановоздушной смесью горных выработок угольных шахт / Ю. М. Говорухин, А. Н. Домрачев, В. Г. Криволапов, Д. Ю. Палеев // *Безопасность технологических процессов и производств : Труды III Международной научно-практической конференции*, Екатеринбург, 26 мая 2021 года. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 13–18. – EDN FVEHPS.

Govorukhin, Yu. M., Domrachev, A. N., Krivolapov, V. G., Paleev, D. Yu. [A method of assessing the gassed volumes of coal mines entries with an explosive methane-air mixture]. *Safety of technological processes and productions: proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*. Yekaterinburg: Ural State Mining University Publ., 2021, pp. 13-18. (In Russian)

10. Мамаев, В. В. Испытания усовершенствованной системы дистанционного отбора проб пожарных газов в условиях лаборатории и подземного полигона / В. В. Мамаев, А. В. Агарков // *Проблемы управления рисками в техносфере*. – 2020. – № 4 (56). – С. 31–39.

Mamaev, V. V., Agarkov, A. V. [Tests of the advanced system of remote sampling of fire gases in the conditions of a laboratory and underground range]. *Problems of technosphere risk management*, 2020, no. 4 (56), pp. 31-39. (In Russian)

11. Симонов, А. М. Экспериментальные исследования дистанционного контроля шахтной среды в условиях штольни и подземного полигона / А. М. Симонов, А. В. Агарков // *Вестник Академии гражданской защиты*. – 2021. – № 2 (26). – С. 74–83.

Simonov, A. M., Agarkov, A. V. [Experimental studies on remote control of the mining environment in the conditions of the shuttle and underground range]. *Civil Defence Academy Journal*, 2021, no. 2 (26), pp. 74-83. (In Russian)

12. Мавроди, А. В. Программное обеспечение горноспасательных работ / А. В. Мавроди, В. В. Захлебн // *Научный вестник НИИГД «Респиратор»*. – 2020. – № 1 (57). – С. 86–94.

Mavrodi, A. V., Zakhlebin, V. V. [Software for mine-rescue operations]. *Scientific bulletin of NIIGD «Respirator»*, 2020, no. 1 (57), pp. 86-94. (In Russian)

Дата поступления рукописи 19.01.2026

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Е. А. Головченко

Aleksandr Vladislavovich Agarkov, *Cand. of Tech. Sci., Deputy Head of the Institute;*
e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru

Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artyoma St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-39

Vitaly Leonidovich Efimenko, *Cand. of Tech. Sci., Head of the Department;*
e-mail: vitaliy.yefimenko.74@mail.ru

Federal State Educational Institution of Higher Education
«Donetsk Institute of State Fire Service EMERCOM of Russia»
283050, Donetsk, Rosa Luxembourg St., 34A. Phone: +7 (949) 300-37-29

Alexey Leonidovich Kavera, *Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Head of the Department;*
e-mail: alexey.kavera@ro.ru

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Donetsk national technical university»

283001, Donetsk, Artema St., 58. Phone: +7 (949) 334-89-06

Dmitry Sergeevich Evteev, *Senior Lecturer; e-mail: d.evteev@academygps.ru*

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia»

129366, Moscow, Borisa Galushkina St., 4. Phone: +7 (495) 617-27-27

HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN MINING WORKINGS OF EMERGENCY SECTIONS OF COAL MINES IN CASE OF FIRES

Purpose. Conducting theoretical studies of heat and mass exchange processes in mine workings of emergency sections of coal mines during fires and comparing the data obtained with the results of experimental studies to study the dynamics of underground fire development under conditions of experimental adit.

Methods. Used analytical, theoretical and experimental research methods with processing results using application software packages Microsoft Office, Mathcad, Origin and others.

Results. Analytical dependencies of temperature and concentrations of gases for non-stationary and stationary processes of heat and gases propagation are established depending on ventilation conditions taking into account geometrical dimensions of mine workings of emergency sections of coal mines, as well as coefficients of heat and mass transfer in conditions of underground fire.

Scientific novelty. A mathematical model of heat and mass exchange processes in emergency sections of coal mines during fires has been developed, which differs from the known ones by taking into account the geometric dimensions of mine workings, the conditions of their ventilation, heat and mass transfer coefficients, and allows determining the dynamics of fire gases along the working.

Practical value. Obtaining reliable data on gas dynamics along the entire length of emergency mine workings with sources of gas release during fires will increase the level of labor safety of mine rescuers and the effectiveness of work to eliminate the consequences of accidents.

Keywords: *mine rescue service; a coal mine; emergency section; mining; underground fires of exogenous and endogenous origin; heat and mass exchange processes; theoretical and experimental studies.*

For citation. Agarkov A. V., Efimenko V. L., Kavera A. L., Evteev D. S. Heat and mass transfer processes in mining workings of emergency sections of coal mines in case of fires. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 27-37. EDN WMFYOV

УДК 614.841.412

*Сергей Геннадьевич Алексеев, канд. хим. наук, доцент, ст. науч. сотр.; e-mail: 3608113@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-инженерный центр
«Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральского отделения РАН
620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54-а. Тел.: +7 (343) 374-16-82*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ ПИРИДИНА И АЛКИЛПИРИДИНОВ

Цель. Выбор наиболее оптимального метода расчета температуры вспышки алкилпиридинов для обеспечения пожаровзрывобезопасности объектов, на которых обращаются производные пиридина.

Методы. Аналитические методы исследования, приведенные в ГОСТ 12.1.044-2018, в работах Valenzuela и др., Keshavarz и др., метод углеродной цепи.

Результаты. Преобразование уравнения (1) из ГОСТ 12.1.044-2018 в формулу (1а) позволяет применять его для определения температуры вспышки пиридинов с алкильными заместителями в различных положениях гетероциклического цикла. Метод углеродной цепи (уравнение 4) может быть рекомендован для определения температуры вспышки алкилпиридинов. Уравнения (2) и (3) уступают в точности прогнозирования температуры вспышки алкилпиридинов по сравнению с формулами (1а) и (4).

Научная новизна. Уравнение (1) из ГОСТ 12.1.044-2018 адаптировано для расчета температуры вспышки пиридинов. Расширена область применения метода углеродной цепи на примере прогнозирования температуры вспышки пиридина и его алкильных производных.

Практическая значимость. Результаты исследования позволят более эффективно планировать и рационально осуществлять мероприятия по пожаровзрывобезопасности объектов, на которых обращаются производные пиридина.

Ключевые слова: температура вспышки; температура кипения; пиридин; пожаровзрывоопасность; прогноз.

Для цитирования: Алексеев С. Г. Прогнозирование температуры вспышки пиридина и алкилпиридинов // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 38–46. – EDN YKSBWN

Постановка проблемы. Пиридин и его производные широко применяют в качестве сырья для производства широкого круга продуктов, включая лекарственные препараты, красители, агрохимикаты, резинотехнические изделия и других полезных продуктов [1–3]. Обеспечение пожаровзрывобезопасности объекта, на котором обращаются производные пиридина, невозможно без учета их показателей взрывопожароопасности. Температура вспышки является одним из ключевых показателей взрывопожароопасности, поэтому развитие методов определения температуры вспышки, включая расчетные способы, является актуальной задачей.

Анализ последних исследований. В предыдущих исследованиях показано:

1. Температуру вспышки в закрытом тигле можно вычислить с помощью формулы (1) из ГОСТ 12.1.044-2018¹:

$$t_{\text{всп}} = 0,659t_{\text{кип}} - 73,14 + \sum_{j=2}^n (a_j l_j), \quad (1)$$

¹ ГОСТ 12.1.044-2018. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения [Электронный ресурс]: (введен в действие Приказом Росстандарта от 05.10.2018 № 717-ст, (ред. от 13.08.2024)). Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс.

где $t_{\text{кип}}$ – температура кипения жидкости, °С;

a_j – структурный дескриптор,

l_j – число структурных групп.

2. Предложены частные уравнения для расчета температуры вспышки пиридинов с одним алкильным заместителем нормального строения в зависимости от их положения в пиридиновом цикле, которые не пригодны для производных пиридина с несколькими алкильными радикалами [4, 5].

3. Для определения температуры вспышки органических соединений, включая производные пиридина, предложено уравнение [6]:

$$\frac{T_{\text{всп}}}{T_{\text{кип}}} = 0,819 - 7,476 \cdot 10^{-4} \frac{H_{\text{гор}}}{H_{\text{пар}}} - 0,0243n_1 - 0,0073n_2 + 0,0072n_3 + 0,0156n_4, \quad (2)$$

где $T_{\text{всп}}$, $T_{\text{кип}}$ – температуры вспышки и кипения жидкости, К;

$H_{\text{гор}}$, $H_{\text{пар}}$ – высшая теплота горения и теплота парообразования, кДж/моль;

n_1 – n_4 – число групп CH_3 , $>\text{CH}_2$, $>\text{CH}$ – и $>\text{C}<$ [6].

4. Для расчета температуры вспышки алкилпиридинов использовано уравнение [7]:

$$T_{\text{всп}} = 208,8 + 23,43m_{\text{C}} - 7,363m_{\text{H}} + 49,41n_{\text{N}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{всп}}$ – температура вспышки, К;

m_{C} , m_{H} , m_{N} – число атомов С, Н и N в молекуле [7].

5. Метод углеродной цепи (далее – МУЦ) успешно апробирован на различных классах соединений [8–10]. Основные положения данного метода заключаются в следующем:

– свойства ближайших 2-3 членов гомологического ряда химических соединений изменяются по линейному закону;

– свойства изомерных соединений можно предсказать по их линейным гомологам путем ввода поправочных коэффициентов непосредственно для длины углеродной цепи в молекуле;

– каждая метильная группа в боковой цепи увеличивает основную углеродную цепь молекулы не на 1, а на 0,5;

– перемещение по углеродной цепи молекулы алкильного заместителя или функциональной группы не приводит к существенным изменениям пожароопасных свойств молекулы [8].

Цель работы. Выбор наиболее оптимального метода расчета температуры вспышки алкилпиридинов для обеспечения пожаровзрывобезопасности объектов, на которых обращаются производные пиридина.

Объект исследования. Пожаровзрывоопасные свойства пиридина и алкилпиридинов.

Исходные данные. Справочные данные по температурам кипения и вспышки пиридинов в закрытом тигле определены с помощью поисковой системы «A Smart Chem-Search Engine»² и базы данных GESTIS Substance Database³ и ACD/Lab 2014 [11, 12], а также справочной литературы [13, 14].

² A Smart Chem-Search Engine [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chemsrc.com/en/> (дата обращения 05.11.2025)

³ GESTIS Substance Database [Электронный ресурс]. URL: <https://gestis-database.dguv.de/> (дата обращения 06.11.2025)

Средние значения температур вспышки и кипения пиридинов представлены в табл. 1 (жирным шрифтом выделены аномальные значения, которые не учитывались в данном исследовании).

Таблица 1

Температуры кипения и вспышки пиридинов

№	Заместители	$T_{\text{кип}}^{1)}$	$T_{\text{всп}}^{1)}$	$H_{\text{исп}}^{2)}$	$H_{\text{гор}}^{2)}$	N_C
1	нет	388	292	35,09	2519,26	0
2	2-метил	402	300	36,17	3180,32	0,25
3	2,6-диметил	417	306	37,46	3841,39	0,5
4	3-метил	417	310	37,35	3180,32	1
5	4-метил	417	313	37,51	3180,32	1
6	2,3-диметил	435	322	39,08	3841,39	1,25
7	2,4-диметил	432	320	38,53	3841,39	1,25
8	2,5-диметил	431	321	37,84	3841,39	1,25
9	2-этил	422	312	37,12	3841,39	1,25
10	2,3,6-триметил	450	321	39,95	4502,45	1,5
11	2,4,6-триметил	445	330	39,87	4502,45	1,5
12	2-метил-6-этил	431	316	37,83	4502,45	1,5
13	2-изопропил	433	296	38,01	4502,45	1,75
14	3,4-диметил	437	324	39,99	3841,39	2
15	3,5-диметил	443	325	39,46	3841,39	2
16	3-этил	439	323	38,57	3841,39	2
17	4-этил	441	322	38,97	3841,39	2
18	2,3,4-триметил	394	335	41,12	4502,45	2,25
19	2,3,5-триметил	457	332	40,62	4502,45	2,25
20	2-пропил	443	329	39,54	4502,45	2,25
21	2-метил-5-этил	450	338	38,69	4502,45	2,25
22	2- <i>m</i> -бутил	449	338	39,55	5163,52	2,25
23	2-метил-6-пропил	454	330	39,6	5163,52	2,5
24	2,6-диэтил	450	328	39,97	5163,52	2,5
25	4-изопропил	450	328	39,65	4502,45	2,5
26	2- <i>v</i> -бутил	451	311	40,14	5163,52	2,75
27	3,4,5-триметил	485	344	40,14	5163,52	3
28	3-пропил	460	338	42,97	4502,45	3
29	2-бутил	465	342	40,56	4502,45	3
30	4-пропил	458	338	40,53	4502,45	4

№	Заместители	$T_{\text{кип}}^{1)}$	$T_{\text{всп}}^{1)}$	$H_{\text{исп}}^{2)}$	$H_{\text{гор}}^{2)}$	N_C
31	2,5-диэтил	467	340	41,28	5163,52	3,25
32	4-изобутил	473	342	41,84	5163,52	3,5
33	2-изопропил-5-этил	481	347	42,59	5824,58	3,75
34	2-пент-3-ил	469	324	41,39	5824,58	3,75
35	3-бутил	479	352	42,55	7146,71	4
36	4-бутил	480	355	42,37	5163,52	4
37	3,4-диэтил	479	348	42,45	5163,52	4
38	2- <i>m</i> -бутил-6-изопропил	481	342	42,52	5163,52	4
39	2-амил	483	352	42,84	5824,58	4,25
40	5-бутил-2-метил	491	359	43,57	5824,58	4,25
41	2,4,6-триэтил	494	350	43,9	6485,65	4,5
42	2-амил-6-метил	496	355	42,66	7807,77	4,5
43	2,6-ди(<i>m</i> -бутил)	482	345	44,04	6485,65	4,5
44	4-пент-3-ил	492	352	43,67	5824,58	4,5
45	3-амил	499	370	44,25	5824,58	5
46	2-гексил	501	372	45,35	6485,65	5,25
47	2-амил-4-метил	509	364	44,58	6485,65	5,25
48	2,6-ди(<i>m</i> -бутил)-4-метил	506	357	45,06	8468,84	5,5
49	3-гексил	515	383	45,97	6485,65	6
50	4-гексил	519	386	46,35	6485,65	6
51	2-амил-5-этил	527	473	47,14	7146,71	6,25
52	3,5-дибутил	451	395	50,22	7807,77	8
53	2,4,6-трибутил	602	416	54,93	10452,03	10,5

Примечания. ¹⁾ Температура кипения и вспышки приведена в К.

²⁾ Теплота парообразования и горения представлена в кДж/моль.

Высшая теплота сгорания ($H_{\text{гор}}$) вычислена по уравнению Менделеева [15]. Теплота парообразования ($H_{\text{пар}}$) пиридинов определена из базы данных ACD/Lab 2014 [11, 12], а в случае отсутствия показателей – рассчитана с помощью программного комплекса ACD/Lab 2014 (табл. 1).

Методы исследования:

Предварительные расчеты температуры вспышки пиридинов 1–17, 19–26, 28, 29, 31–51 по формуле (1) показывают, что средняя абсолютная ошибка Δ составляет 71,3 °С, поэтому уравнение (1) было преобразовано в зависимость (1а), что позволяет уменьшить эту ошибку Δ до 4,3 °С. Данная модификация использована в настоящем исследовании:

$$t_{\text{всп}} = 0,659t_{\text{кип}} - 1,84 + \sum_{j=2}^n (a_j l_j) \quad (1a)$$

Температуру вспышки органических соединений определяли по формулам (2) и (3).

Анализ результатов (табл. 1) показывает, что МУЦ работает в ряду пиридинов. Способ определения условной углеродной цепи (N_C) подробно описан в ранее опубликованных работах [8, 9], но при этом установлено, что необходимо внесение дополнительной поправки на влияние атома азота на длину боковой углеродной цепи во 2-м и 6-м положениях пиридинового цикла. Путем подбора определено, что она составляет $-0,9$. Для удобства применения МУЦ выведено уравнение:

$$T_{всп} = 11,94N_C + 303,3 \quad (r^2 = 0,9531) \quad (4)$$

Результаты и обсуждение исследования. Прогноз температуры вспышки пиридинов по уравнениям (1а), (2) – (4) представлен в табл. 2. Статистическая обработка результатов расчета показывает, что для определения температуры алкилпиридинов предпочтительно использовать уравнения (1а) и (4). Дополнительным преимуществом уравнения (4) является отсутствие в нем какого-либо физико-химического параметра.

Таблица 2

Прогноз температуры вспышки пиридинов

№	Уравнение (1а)	Уравнение (2)	Уравнение (3)	Уравнение (4)
1	287	297	339	303
2	297	293	347	304
3	307	289	356	306
4	306	305	347	315
5	307	305	347	315
6	319	303	356	316
7	317	301	356	316
8	316	299	356	316
9	310	300	356	316
10	329	298	365	318
11	325	294	365	318
12	316	291	365	318
13	317	298	365	322
14	320	305	356	327
15	324	309	356	327
16	321	313	356	327
17	323	315	356	327
18	–	–	365	328
19	333	303	365	328
20	329	305	365	328
21	324	307	365	328
22	328	298	373	328

№	Уравнение (1a)	Уравнение (2)	Уравнение (3)	Уравнение (4)
23	329	296	373	330
24	331	299	373	330
25	329	312	365	333
26	329	304	373	334
27	339	315	373	340
28	–	–	365	339
29	335	321	365	339
30	–	–	365	339
31	340	309	373	340
32	344	321	373	345
33	349	310	382	346
34	342	309	382	347
35	350	286	399	347
36	348	318	373	351
37	348	327	373	351
38	349	327	373	351
39	351	321	382	352
40	356	318	382	352
41	358	303	391	353
42	351	274	408	353
43	360	313	391	353
44	357	326	382	357
45	361	333	382	363
46	368	323	391	364
47	363	325	391	364
48	367	273	417	365
49	372	336	391	375
50	375	339	391	375
51	380	327	399	376
52	–	–	408	399
53	–	–	443	425
Средняя абсолютная ошибка Δ	4,2	28,6	33,2	4,3
Дисперсия σ	5,313	33,536	35,432	5,312
Средняя ошибка SE	0,801	4,999	5,062	0,767

Выводы:

1. Преобразование уравнения (1) из ГОСТ 12.1.044-2018 в формулу (1a) позволяет его применять для определения температуры вспышки пиридинов с алкильными заместителями в различных положениях гетероциклического цикла.
2. Метод углеродной цепи может быть рекомендован для определения температуры вспышки алкилпиридинов.
3. Уравнения (2) и (3) уступают в точности прогнозирования температуры вспышки алкилпиридинов по сравнению с формулами (1a) и (4).

Список литературы / References

1. Филиппова, Н. А. Синтез пиридинов под действием кристаллических и аморфных алюмосиликатов: специальность 1.4.12 «Нефтехимия»: дис. ... канд. техн. наук / Филиппова Надежда Александровна; Институт нефтехимии и катализа Уфимского федерального исследовательского центра РАН. – Уфа, 2022. – 132 с. Место защиты: Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Filippova, N. A. *Sintez piridinov pod deistviem kristallicheskih i amorfnykh alyumosilikatov* [Synthesis of Pyridins under the Action of Crystalline and Amorphous Aluminosilicates: Specialty 1.4.12 «Petrochemistry»: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Nadezhda Aleksandrovna Filippova]. Institute of Petrochemistry and Catalysis of the Ufa Federal Research Center of RAS : Ufa, Place of Dissertation Defence: Ufa State Oil Technical University. (In Russian)
2. Zakharychev, V. V., Martsynkevich, A. M. Development of Novel Pyridine-Based Agrochemicals: A Review. *Advanced Agrochem.* 4 (2025): 30-48. DOI: 10.1016/j.aac.2024.10.002. (In English)
3. Sahu, D., Sreekanth, P. S. R., Behera, P. K., Pradhan, M. K., Patnaik, A., Salunkhe, S., Cep, R. Advances in Synthesis, Medicinal Properties and Biomedical Applications of Pyridine Derivatives: A Comprehensive Review. *European Journal of Medicinal Chemistry Reports.* 12 (2024): 100210. DOI: 10.1016/j.ejmcr.2024.100210. (In English)
4. Сорокина Ю. Н. Оценка температуры вспышки производных пиридина / Ю. Н. Сорокина, Е. Г. Макаров // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы.* – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 851–853. – EDN VOHHJY
Sorokina, Yu. N., Makarov, E. G. *Otsenka temperatury vspyshki proizvodnykh piridina* [Pyridine Derivatives Flash Point Estimation]. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy*, 2018, vol. 1, no. 9, pp. 851-853. EDN VOHHJY (In Russian)
5. Сорокина, Ю. Н. Аналитическая оценка параметров пожаровзрывобезопасности вспышки азотсодержащих органических соединений, обращающихся в производстве нефтепродуктов / Ю. Н. Сорокина, А. В. Калач, Ф. В. Демехин // *Проблемы управления рисками в техносфере.* – 2021. – № 4 (60). – С. 101–106. – EDN CNZVYU
Sorokina, Yu. N., Kalach, A. V., Demekhin, F. V. *Analiticheskaya otsenka parametrov pozharovzryvobezopasnosti vspyshki azotsoderzhashchikh organicheskikh soedineniy, obrashchayushchikhsya v proizvodstve nefteproduktov* [Analytical Assessment of the Flash Point of Nitrogen-Containing Organic Compounds Circulating in the Production of Petroleum Products]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2021, no. 4 (60), pp. 101-106. EDN CNZVYU (In Russian)
6. Valenzuela, E. M., Vázquez-Román, R., Patel, S., Mannan, M. S. Prediction Models for the Flash Point of Pure Components. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 24 (2011): 753-757. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.04.010 (In English)
7. Keshavarz, M. H., Moradi, S., Madram, A. R., Pouretedal, H. R., Esmailpour, K., Shokrolahi, A. Reliable Method for Prediction of the Flash Point of Various Classes of Amines on the Basis of Some Molecular Moieties for Safety Measures in Industrial Processes. *Journal of Loss*

Prevention in the Process Industries. 26 (2013): 650-659. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.01.005 (In English)

8. Alexeev, K. S., Alexeev, S. G., Barbin, N. M. Correlation of Fire Hazard Characteristics with Chemical Structure. XXII. Dialkylcarbonates. Butlerov Communications. 45. (2016): 93-100. DOI: jbc-02/16-45-1-93 (In English)

9. Алексеев, С. Г. Прогнозирование пожарной опасности ионных жидкостей для литийионных аккумуляторов / С. Г. Алексеев // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 9. – С. 68–71. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-9-68-71.

Alexeev, S. G. *Prognozirovanie pozharnoy opasnosti ionnykh zhidkostey dlya litijionnykh akkumulyatorov* [Fire Hazard of Ionic Liquids for Lithium-Ion Batteries]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2025, no 9, pp. 68–71. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-9-68-71. (In Russian)

10. Алексеев, С. Г. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XXI. Прогнозирование температуры вспышки 3-алкил-2,3-дигидро-7,8-дифтор-4Н-[1,4]бензоксазинов методом углеродной цепи / С.Г. Алексеев, Н. М. Барбин // Техносферная безопасность. – 2015. – № 3 (8). – С. 14–19. – EDN UNWHHP.

Alexeev, S. G., Barbin, N. M. *Svyaz pokazateley pozharnoy opasnosti s khimicheskim stroeniem. XXI. Prognozirovanie temperatury vspyshki 3-alkil-2,3-digidro-7,8-diftor-4H-[1,4]benzoksazinov metodom uglerodnoy tsepi* [Correlation of Fire Hazard Characteristics with Chemical Structure. XXI. Predicting The flash point of the 3-alkyl-2,3-Dihydro-7,8-Difluoro-4H-[1,4]Benzoxazines by the Method of Carbon Chain]. *Texnosfernaya bezopasnost'*, 2015, no 3 (8), pp. 14-19. EDN UNWHHP. (In Russian)

11. ACD/Labs software. Version 2014 for Microsoft Windows. Installation Guide Installing and Registering ACD/Labs Software. Toronto: Advanced Chemistry Development, Inc., 2014. 52 p. (In English)

12. ACD/Boiling point. Version for Microsoft Windows. User's Guide Calculating the Boiling Point, Vapor Pressure, and Related Properties. Toronto: Advanced Chemistry Development, Inc., 2013. 29 p. (In English)

13. Корольченко, А. Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник. / А. Я. Корольченко, Д. А. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2004. – Ч. 1. – 713 с.; Ч. 2. – 774 с.

Korol'chenko, A. Ya., Korol'chenko, D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya. Spravochnik* [Fire and Explosion Hazard of Substances and Materials and Means of Extinguishing Them. Handbook]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004, Pt. 1, 713 p.; Pt. 2, 774 p. (In Russian)

14. Stephenson, R. M. Flash Points of Organic and Organometallic Compounds. N.Y.: Elsevier Science Publishing Co., Inc, 1987, 300 p. (In English)

15. Коробейникова, Е. Г. Теоретические основы процессов горения и тушения: учебник / Е. Г. Коробейникова, Д. Ф. Кожевин, Н. Ю. Кожевникова. – СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – 436 с.

Korobeinikova, E. G., Kozhevin, D. F., Kozhevnikova, N. Yu. *Teoreticheskie osnovy protsessov goreniia i tusheniia: uchebnik* [Theoretical Basis of Combustion and Extinguishing Processes: Textbook]. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia Publ., 2022, 436 p. (In Russian)

Дата поступления рукописи 22.12.2025
Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В. В. Лебедевой

Sergey Gennad'evich Alexeev, *Cand. of Chem. Sci., Associate Professor, Senior Researcher;*
e-mail: 3608113@mail.ru
Science and Engineering Center «Reliability and Safety of Large Systems and Machines»
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
620049, Yekaterinburg, Studencheskaya St., 54-a. Phone: +7(343) 374-16-82

PYRIDINE AND ALKYL PYRIDINE FLASH POINT PREDICTION

Objective. Choosing the most optimal method for calculating the flash point of alkyl pyridines.

Methods. Analytical methods of investigation, as given in GOST 12.1.044-2018, in the works of Valenzuela et al., Keshavarz et al., and the carbon chain method.

Results. The transformation of equation (1) from GOST 12.1.044-2018 into formula (1a) allows it to be applied for determining the flash point of pyridines with alkyl substituents in different positions of the heterocyclic cycle. The carbon chain method (equation 4) can be recommended for determining the flash point of alkyl pyridines. Equations (2) and (3) are less accurate in predicting the flash point of alkyipyridines than formulas (1a) and (4).

Scientific novelty. Equation (1) from GOST 12.1.044-2018 adapted for calculating the flash point of pyridines. The application of the carbon chain method has been extended to include the prediction of the flash point of pyridine and its alkyl derivatives.

Practical significance. Taking into account the results of the study will allow more effective planning and rational implementation of activities on fire-protection of facilities that use pyridine derivatives.

Key words: *flash point; boiling temperature, pyridine, fire alarm; prediction.*

For citation: Alexeev S. G. Pyridine and alkyl pyridines flash point prediction. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 38-46. EDN YKSBWN

УДК 614.841.245

Юлия Сергеевна Козлова, канд. техн. наук, доцент, e-mail: y_kozlova@ugrasu.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Югорский государственный университет»
628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16. Тел. +7(3467)-377-000

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК: ОТ НОРМАТИВНОГО РАСЧЕТА К ОЦЕНКЕ РЕАЛЬНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

Цель. Исследование тепловых процессов в нейтральном проводе для оценки пожарной опасности электроустановок при эксплуатации нелинейных нагрузок.

Методы. Сравнительное математическое моделирование двух режимов работы линии на основе уравнений теплового баланса. Проектный режим рассчитан по стандартной методике. Параметры реального режима (несимметричная нагрузка с высшими гармониками) определены на основе результатов экспериментальных исследований.

Результаты. Установлено принципиальное отличие реального режима от проектного: при наличии нелинейных нагрузок с высоким содержанием высших гармоник в нейтральном проводе протекает ток, превышающий фазный. Это приводит к неучтенному проектом нагреву нейтрали до значений, в полтора раза превышающих допустимый предел для изоляции. Расчеты подтвердили возникновение критического износа изоляции из-за суточных термических циклов, многократно сокращающего ее ресурс и формирующего скрытую пожарную опасность.

Научная новизна. Впервые установлены и обобщены критические взаимосвязи между перегрузкой нейтрали, температурным режимом и ресурсом изоляции, что позволило сформулировать конкретные критерии перехода в опасное состояние для оценки безопасной эксплуатации электроустановок.

Практическая значимость. Результаты обосновывают необходимость систематического сравнения расчетных и фактических параметров, позволяющего выявить потенциально опасные режимы работы.

Ключевые слова: тепловые процессы; пожарная опасность; нейтральный провод; высшие гармоники тока; перегрев; математическое моделирование.

Для цитирования: Козлова Ю. С. Тепловые процессы в элементах электроустановок: от нормативного расчета к оценке реальной пожарной опасности // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 47–54. – EDN WFTKCM

Постановка проблемы. Пожары в электроустановках в большинстве случаев связаны с тепловыми процессами в проводах и кабелях [1, 2], когда превышение рабочей температуры изоляции ведет к ее деградации [3, 4]. Особенностью таких ситуаций часто является их скрытый характер – система может длительно работать в предаварийном режиме без видимых признаков опасности.

Современные электроустановки претерпевают существенные изменения в структуре и характере электрических нагрузок. Массовое внедрение энергоэффективных технологий, таких как светодиодное освещение и импульсные источники питания, привело к качественному преобразованию спектра токов потребления [5, 6]. Одновременно наблюдается устойчивый рост энерговооруженности объектов различного назначения [7], сопровождающийся увеличением как установленной мощности, так и плотности размещения электрооборудования на единицу площади, что создает дополнительные требования к пропускной способности и тепловым режимам кабельных линий.

Не менее важным аспектом является значительный разброс характеристик используемого электрооборудования от различных производителей. Однотипные устройства могут иметь существенно отличающиеся коэффициенты гармонических искажений, коэффициенты мощности и другие параметры, влияющие на режимы работы распределительной сети. В проектной документации, как правило, используют усредненные или типовые значения, которые могут не отражать реальный состав и характеристики конкретного устанавливаемого оборудования. Это приводит к тому, что фактические эксплуатационные параметры часто существенно отличаются от расчетных.

При проектировании низковольтных электроустановок ключевым этапом является выбор сечений проводников и номиналов защитных аппаратов на основе расчета длительно допустимого тока нагрузки. Данный расчет, регламентированный действующими нормативными документами, учитывает комплекс поправочных коэффициентов: на температуру окружающей среды, на группирование проводов в пучке, на несинусоидальность нагрузки и др. Таким образом, проектная документация определяет формально корректные параметры сети, гарантирующие, с точки зрения требований нормативов, безопасную эксплуатацию при проектной нагрузке. Однако на практике возникает систематическое противоречие между расчетными проектными показателями и реальным тепловым режимом электроустановки, особенно – в части нулевого рабочего проводника.

Цель работы. Исследование тепловых процессов в нейтральном проводе для оценки пожарной опасности электроустановок при эксплуатации нелинейных нагрузок.

Методология проведения исследования. Исходной гипотезой выступает утверждение о том, что основной причиной данной ситуации является невозможность учета в проекте специфики реальных нагрузок – существенной несимметрии по фазам и высокой доли нелинейных потребителей, генерирующих высшие гармоники тока.

На основе имитационного моделирования в специализированном программном комплексе MATLAB/Simulink разработана схема сети электроустановки общественного здания с режимом функционирования с 10 до 22 ч, параметры которой соответствуют нормативному расчету (рис. 1).

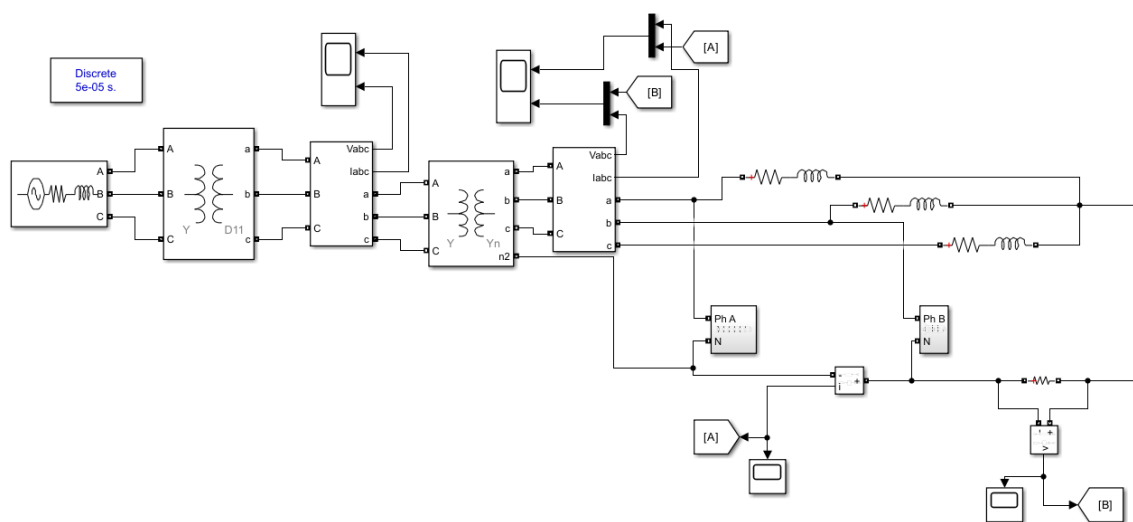


Рис. 1. Имитационная модель исследуемой сети

В рамках данной модели задают режимы нагрузки, характерные для современных объектов, а именно неравномерное распределение однофазных нагрузок по фазам и наличие значительной доли нелинейных потребителей с определенным спектром гармоник [8]. Ключевым этапом является прямое сопоставление результатов двух сценариев по критерию температуры изоляции нулевого проводника. Риск пробоя изоляции оценивают на основе фиксации превышения температуры жилы над допустимым значением для данного типа изоляции и установлении корреляции между величиной этого превышения и скоростью термического старения изоляции.

Сравнительный анализ позволяет количественно оценить степень соответствия проектных решений фактическим эксплуатационным условиям. Особую важность представляет исследование динамических характеристик тепловых процессов, поскольку установившиеся расчеты могут не отражать реальную картину циклических нагрузок, характерных для большинства современных объектов. Суточные и недельные циклы работы электрооборудования создают сложный температурный режим, требующий комплексного анализа. Эту проблему усугубляет рост энерговооруженности объектов, увеличивая абсолютные значения токов и, соответственно, тепловыделение в проводниках.

Результаты и их обсуждение. В трехфазной четырехпроводной системе токи гармоник, кратных трем, не компенсируются в нейтральном проводнике, а арифметически суммируются, что может приводить к току в нуле \dot{I}_n , превышающему фазные:

$$\dot{I}_n = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C, \quad (1)$$

где \dot{I}_n – ток в нулевом проводе, А;

$\dot{I}_{A,B,C}$ – ток в фазном проводе, А.

Из известного уравнения теплового баланса, записанного для участка провода длиной 1 м, получаем уравнение тепловой динамики (2), используемое в дальнейших расчетах:

$$\tau \cdot \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = T_{\text{окр}} + P(t) \cdot R_t, \quad (2)$$

где τ – постоянная времени нагрева, с;

t – момент времени, с;

$T(t)$ – текущая температура проводника, °С;

$T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С;

$P(t)$ – мощность тепловыделения, Вт;

R_t – тепловое сопротивление, °С/Вт.

При стационарном режиме нагрева установившуюся температуру провода определим по формуле:

$$T_{\text{уст}} = T_{\text{окр}} + P \cdot R_t, \quad (3)$$

при нестационарном режиме уравнение нагрева имеет следующий вид:

$$T(t) = T_0 + (T_{\text{уст}} - T_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (4)$$

где T_0 – начальная температура, °С.

Расчет токов и мощностей потерь при использовании провода АПВ 4 проведен с использованием общеизвестных формул и имитационной модели, когда нагрузка была включена постоянно (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные параметры провода АПВ 4 в проектном и реальном режимах

Параметр	Режим	
	проектный	фактический
Фазный ток $I_{\text{ф}}$, А	16	23
Мощность тепловыделения $P_{\text{ф}}$, Вт	2,3	5,2
Ток в нулевом проводе $I_{\text{н}}$, А	0	31,8
Мощность тепловыделения $P_{\text{н}}$, Вт	0	9,1
Температура $T_{\text{уст}}$, °С	39,5	64,2 – фаза 97,4 – ноль

Расчеты по фиксированному току позволили оценить реальную возможность перегрева. Поскольку провод обладает тепловой инерцией, его температура не меняется мгновенно, необходим переход к суточному графику изменения токовых нагрузок. Это дает возможность рассчитать динамику изменения температуры проводников T_i (рис. 2).

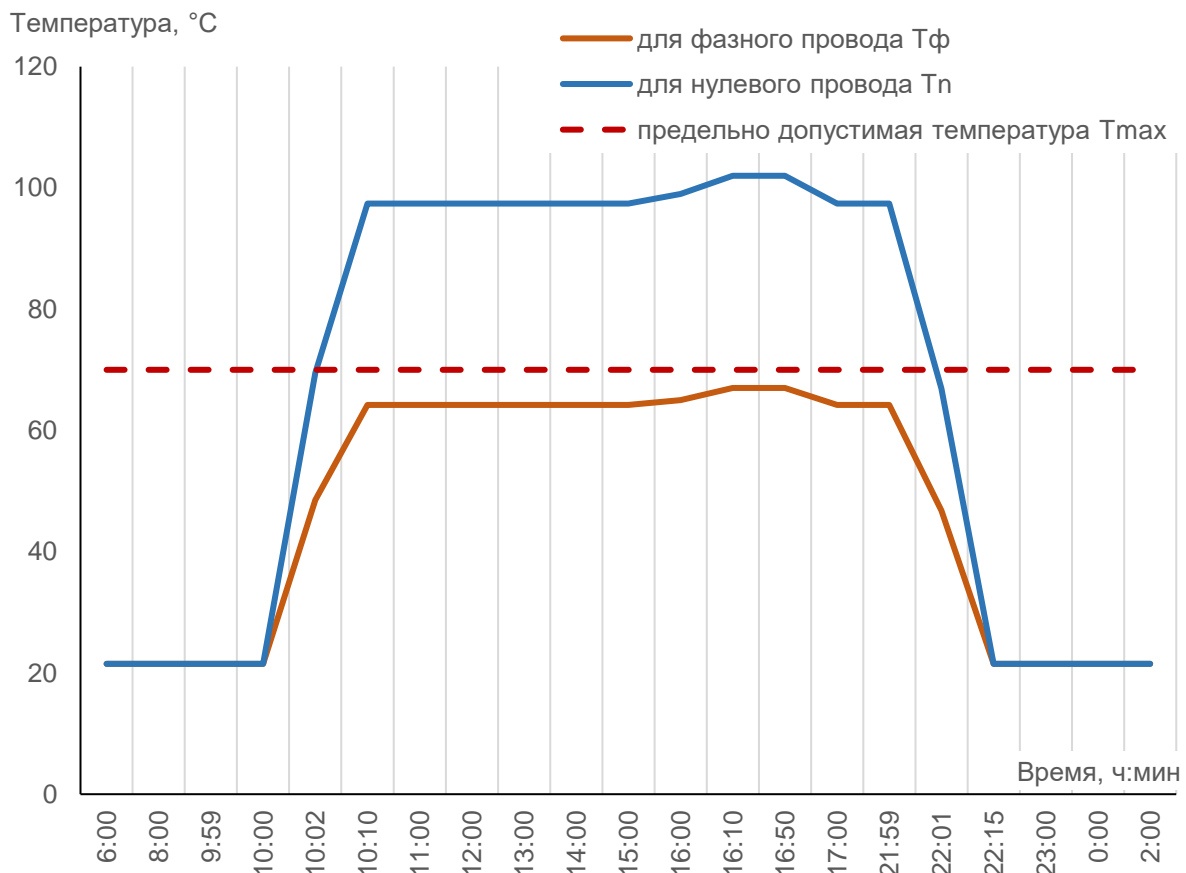


Рис. 2. Динамика изменения температуры проводников за период функционирования объекта

Связь между регулярным перегревом и возникновением замыканий носит кумулятивный характер. Так, при отсутствии механических повреждений основной причиной дугового замыкания является именно длительная деградации диэлектрика. Влияние температуры на физическое разрушение изоляции может быть выражено мгновенным индексом риска [9]:

$$R(t) = \left(\frac{T(t) - T_{нач}}{T_{max} - T_{нач}} \right)^n, \quad (5)$$

где $T_{нач}$ – базисная температура начала деградации материала изоляции, °С;

T_{max} – предельно допустимая температура для изоляции, °С;

n – показатель степени деградации, определяющий, насколько агрессивно накопленный термический износ переходит в физическое разрушение (пробой).

В качестве базисной температуры начала деградации $T_{нач}$ принято значение 50 °С, что соответствует порогу интенсификации термического разложения поливинилхлоридной изоляции согласно ИЕС 60216-5:2022.

Выбор значения n зависит от того, какую стадию деградации оценивают. В инженерной практике для ПВХ-изоляции ориентируются на следующие значения: $n = 4$ – для оценки общего износа, $n = 6$ – для оценки риска возникновения пробоя.

Накопленный термический износ D за цикл определяют по формуле:

$$D = \int_0^t R(t) dt. \quad (6)$$

Оценка мгновенного риска и накопления дефектов для ключевых отрезков времени позволяет прогнозировать время до возникновения дугового замыкания, поскольку реальный износ изоляции зависит от интегрального воздействия температуры за цикл (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные значения мгновенного риска и накопленного износа

Время	Мгновенный риск (относительно 70 °С)	Накопленный износ, эквивалентные часы	Краткая характеристика
10:00	0	0	Включение нагрузки
10:02	~0,9	0,02	Время выхода на установившийся режим
10:10	172	28	
13:00	172	544	
16:00	288	1060	Установившийся режим с незначительными коммутациями
21:00	172	1873	
22:00	172	2092	
22:01	0,36	2092	Выключение нагрузки, фаза остывания
22:15	0	2092	Дежурный режим

Проектный ресурс провода АПВ при 70 °С составляет 15 лет (131 400 ч), износ за 12-часовой рабочий день при 97,4 °С – 2 092 эквивалентных часа. Анализ результатов исследований свидетельствует, что ночное время и фаза остывания добавляют незначительный вклад, которым можно пренебречь. Отношение ресурса

к ежедневному износу позволяет прогнозировать критическое состояние изоляции нейтрали (в данном случае – 62 дня), т. е. при сохранении текущей нагрузки и режима работы объекта, критическое состояние наступит примерно через два календарных месяца.

Приняв параметр интенсивности отказов λ равным 10^{-5} ч^{-1} , вероятность пробоя определим по формуле:

$$P = 1 - e^{-\lambda D} = 0,73. \quad (7)$$

Выводы. Нормативная база предусматривает специальные коэффициенты для учета гармонических искажений при выборе сечений проводников. Однако практическое их применение требует верификации в реальных условиях эксплуатации, особенно с учетом разнородности электрооборудования и тенденции к росту энергопотребления.

Сравнительное исследование проектного и реального случаев наглядно демонстрируют, что фиксированное проектное состояние электроустановки является лишь условным и быстроустаревающим вариантом, не отражающим ее динамической природы. Характер и величина нагрузок на объектах защиты носят ярко выраженный стохастический и эволюционный характер: применение нового оборудования, изменение режимов работы техники, сезонные и суточные колебания потребления приводят к постоянной трансформации профиля нагрузки – уровня несимметрии и спектра гармонических искажений.

Следовательно, даже точный расчет, учитывающий гармоники на момент проектирования, не может гарантировать долгосрочную безопасность. Риск перегрева нейтрали и пробоя изоляции становится динамической величиной, зависящей от текущего эксплуатационного контекста, что делает традиционные методы периодического инструментального контроля недостаточными, так как они фиксируют параметры лишь в дискретные моменты времени.

В этой связи перспективным является переход к системам непрерывного мониторинга ключевых параметров, позволяющих прогнозировать термический износ изоляции, корректировать режимы работы для предотвращения перегрева.

Современные подходы к обеспечению пожарной безопасности электроустановок позволяют учитывать аспекты, связанные с динамическим тепловым моделированием и мониторингом состояния в реальном времени, однако их практическая реализация требует: в целом – совершенствования нормативной базы, в частности (для существующих объектов защиты) – решения задачи снижения стоимости и технической сложности создания точной, надежной системы в условиях существующей инфраструктуры. В текущих реалиях временным решением может быть систематическое сравнение расчетных и фактических параметров, позволяющие оценить потенциально опасные режимы работы и разработать эффективные меры по повышению надежности и безопасности с учетом реальных, а не предполагаемых характеристик оборудования.

Список литературы / References

1. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствия: информационно-аналитический сборник. – Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. – 80 с.

Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2024 g. Statistika pozharov i ikh posledstviya: informatsionno-analiticheskiy sbornik [Fires and Fire Safety in 2024. Fire Statistics and Their Consequences: Information and Analytical Collection]. Balashikha: FGBU VNIPO EMERCOM of Russia Publ., 2025, 80 p. (In Russian)

2. Thai H. D., Van Le N. B., Lee D., Huh J. H. A survey of Electrical Fire Causes Assessment Technology. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 1-17. – URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3437175> (In English)

3. Снижение пожарной опасности кабельных изделий с изоляцией и оболочками из ПВХ материалов / Г. И. Смелков, А. И. Рябиков, В. И. Ильин, Т. М. Дмитриева // *Пожарная безопасность*. – 2011. – № 2. – С. 66–72.

Smelkov, G. I., Ryabikov, A. I., Il'in, V. I., Dmitrieva, T. M. *Snizhenie pozharnoy opasnosti kabelnykh izdeliy s izolyatsiyey i obolochkami iz PVH materialov* [Reduction of Fire Hazard of Cable Products with Insulation and Sheaths Made of PVC Materials]. *Fire Safety*, 2011, no. 2, pp. 66-72. (In Russian)

4. Deng J., Lin Q., Li Y., Wang C. Effect of overload current values on the fire characteristics of polyethylene (PE) copper wires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, vol. 148, pp. 11695-11705. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12522-5> (In English)

5. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В / В. Н. Тульский, И. И. Карташев, Р. Р. Насыров, М. Г. Симуткин // *Промышленная энергетика*. – 2013. – № 5. – С. 39–44.

Tulskij, V. N., Kartashev, I. I., Nasyrov, R. R., Simutkin, M. G. *Vliyanie vysshikh garmonik toka na rezhimy raboty kabeley raspredelitel'noy seti 380 V* [The influence of current higher harmonics on the operation modes of cables in the 380 V distribution network]. *Industrial Power Engineering*, 2013, no. 5, pp. 39-44. (In Russian)

6. Алгоритм расчета потерь мощности, обусловленных высшими гармониками и интергармониками на основе вейвлет-преобразования / Д. С. Осипов, А. Г. Люtareвич, В. А. Ткаченко, Я. Ю. Логунова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 38–47. [Электронный ресурс]. – URL: <https://doi.org/10.14529/power230104>

Osipov, D. S., Lyutarevich, A. G., Tkachenko, V. A., Logunova, Ya. Yu. *Algoritm rascheta poter moshchnosti, obuslovlennykh vysshimi garmonikami i intergarmonikami na osnove veivlet-preobrazovaniya* [Algorithm for Calculating Power Losses Caused by Higher Harmonics and Interharmonics Based on Wavelet Transform]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 38-47. Available at: <https://doi.org/10.14529/power230104> (In Russian)

7. Минат, В. Н. Энергоэкономический фактор роста и развития промышленного производства некоторых стран мира / В. Н. Минат // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент*. – 2023. – № 13 (1). – С. 35–45. [Электронный ресурс]. – URL: <https://doi.org/10.21869/2223-1552-2023-13-1-35-45>

Minat, V. N. *Ehnergoehkonomicheskij faktor rosta i razvitiya promyshlennogo proizvodstva nekotorykh stran mira* [Energy and Economic Factor of Growth and Development of Industrial Production in Some Countries of the World]. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics. Sociology. Management*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 35-45. Available at: <https://doi.org/10.21869/2223-1552-2023-13-1-35-45> (In Russian)

8. Козлова, Ю. С. Факторы несимметрии и несинусоидальности в электрических сетях при обеспечении пожарной безопасности электроустановок / Ю. С. Козлова, В. И. Зыков, М. В. Крупин // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. – 2025. – № 4. – С. 118–124. – DOI : 10.25257/FE.2025.4.118-124.

Kozlova, Yu. S., Zykov, V. I., Krupin, M. V. *Faktory nesimmetrii i nesinusoidalnosti v ehlektricheskikh setyakh pri obespechenii pozharnoy bezopasnosti ehlektroustanovok* [Factors of

Asymmetry and Non-Sinusoidality in Electrical Networks in Ensuring Fire Safety of Electrical Installations]. *Fires and Emergencies: Prevention, Response*, 2025, no. 4, pp. 118-124. DOI 10.25257/FE.2025.4.118-124. (In Russian)

9. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965. – 524 с.

Gnedenko, B. V., Belyayev, Yu. K., Solovyev, A. D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz* [Mathematical Methods in Reliability Theory. Main Characteristics of Reliability and Their Statistical Analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 524 p. (In Russian)

Дата поступления рукописи 04.02.2026

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Р. А. Тишиным

*Yuliya Sergeevna Kozlova, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: y_kozlova@ugrasu.ru
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Yugra State University
628011, Khanty-Mansiysk, Chekhov St., 16. Phone: +7(3467)377-000*

THERMAL PROCESSES IN THE ELEMENTS OF ELECTRICAL INSTALLATIONS: FROM THE NORMATIVE CALCULATION TO THE ASSESSMENT OF THE REAL FIRE DANGER

Objective. Investigation of thermal processes in a neutral conductor to assess the fire hazard of electrical installations during operation of nonlinear loads.

Methods. A comparative mathematical modeling of the two operating modes of the line based on the equations of thermal balance is carried out. The design mode is calculated according to the standard methodology. The parameters of the real mode (asymmetric load with harmonic components) are determined based on experimental data.

Results. The fundamental difference between the real mode and the design mode has been established. In contrast to the design conditions, in the presence of nonlinear loads with a high content of higher harmonics, a current exceeding the phase current flows in the neutral wire. This leads to an unaccounted – for heating of the neutral conductor to values one and a half times higher than the permissible limit for insulation. Calculations have confirmed the occurrence of critical insulation wear due to daily thermal cycles, which significantly reduce its life and create a hidden fire hazard.

Scientific novelty. The novelty lies in the identification and generalization of critical relationships between neutral overload, temperature regime and insulation resource, which made it possible to formulate specific criteria for the transition to a dangerous state.

Practical value. The results justify the need for a systematic comparison of calculated and actual parameters to identify potentially dangerous operating modes.

Keywords: *thermal processes; fire hazard; neutral conductor; higher harmonics of current; overheating; mathematical modeling.*

For citation: Kozlova Yu. S. Thermal processes in the elements of electrical installations: from the normative calculation to the assessment of the real fire danger. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 47-54. EDN WFTKKM

II. Безопасность труда

УДК 622.867.324:62-974

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: v.mamaev@80.mchs.gov.ru

Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: lzborschik@yandex.ru

Руслан Сергеевич Плетенецкий, ст. науч. сотр.; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-01

РАБОТА ШАХТНОГО САМОСПАСАТЕЛЯ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Цель. Определение возможных конструктивных и иных усовершенствований самоспасателей, позволяющих применять их в условиях Крайнего Севера на основе установления зависимости времени начала активации регенеративной реакции от содержания влаги и температуры.

Методы. Аналитические методы исследования процессов регенерации газовой дыхательной смеси.

Результаты. Исследованы особенности конструктивных решений и химического состава кислородсодержащего продукта и пускового брикета, позволяющие использовать их при отрицательных температурах в условиях Крайнего Севера.

Научная новизна. Впервые обоснованы технические решения по активации воздействия на химически связанный кислород на основе получения щелочи на лобовом слое кислородсодержащего продукта, позволяющие обеспечить его работу при отрицательных температурах в условиях Крайнего Севера.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке новых моделей самоспасателей с улучшенными техническими характеристиками.

Ключевые слова: *дыхательный аппарат; средства индивидуальной защиты органов дыхания; самоспасатель; регенерация; сорбция; хемосорбция; регенеративный продукт; кислородсодержащий продукт; отрицательные температуры.*

Для цитирования: *Мамаев В. В., Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С. Работа шахтного самоспасателя при отрицательных температурах // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 55–65. – EDN YGVEAK*

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Территория Российской Федерации расположена в основном в районах с умеренным и холодным климатом. Холодные климатические районы занимают более 85 % территории страны. В Арктической зоне России находятся значительные запасы природных ресурсов государства, обеспечивающие около 11 % его национального дохода, сосредоточено до 78 % объектов нефтегазовой отрасли. Температура окружающей среды на данной территории в зимний период может снижаться до экстремально низких значений (–50...–60 °С). При этом не снимается задача обеспечения безопасных условий труда и ликвидации возможных аварий [1, 2, 3].

Анализ последних исследований и публикаций. Низкие отрицательные температуры воздуха затрудняют использование средств индивидуальной защиты органов дыхания, так как обычные типовые самоспасатели могут применяться только при температурах выше –20 °С [4], некоторые до –35 °С [5] (табл. 1, 2).

Изолирующий респиратор ИП-4МК (противогаз) применяется в интервале температур от –40 до +40 °С, снабжен лицевой частью в виде шлем-маски.

Таблица 1

Основные технические характеристики самоспасателей с химически связанным кислородом

Технические характеристики	Самоспасатель шахтный ШСС-1П	Самоспасатель изолирующий малогабаритный СИ-30	Самоспасатель изолирующий для газовой промышленности СИГ-1	Самоспасатель шахтный ШСС-Т	Портативное дыхательное устройство ПДУ-5	Самоспасатель изолирующий противопожарный СИП-3	Изолирующий ДА (противогаз) ИП-4МК
Температурный интервал эксплуатации, °С	-20... +40	-20... +60	-35... +40	-20... +60	-35... +60	-35... +60	-40... +40
Время защитного действия, мин, :							
– в режиме средней физической нагрузки	60,0	30,0	50,0	60,0	20,0	55,0	70,0
– в режиме тяжелой физической нагрузки	50,0	–	–	18,0	7	16,5	21,0
– в покое	260,0	90,0	–	до 300,0	70,0	165,0	180,0
Температура вдыхаемой газовой дыхательной смеси (при температуре окружающей среды (25 ± 2) °С, не более)	+55	+60	+60	+55	+50	+50	+50
Стойкость к воздействию температуры 200 °С в течение 60 с	Да	Да	–	Да	Да	Да	Да
Масса самоспасателя, кг,	3,0	2,35	3,4	2,7 ... 3,0	1,75	2,300	4,0
Масса рабочей части, кг,	–	–	–	2,4	1,3	2,0	3,5

Технические характеристики	Изолирующий ДА (противогаз) ИП-4МК	Самоспасатель изолирующий противопожарный СИП-3	Портативное дыхательное устройство ПДУ-5	Самоспасатель шахтный ШСС-Т	Самоспасатель изолирующий для газовой промышленности СИГ-1	Самоспасатель изолирующий малогобаритный СИ-30	Самоспасатель шахтный ШСС-1П	
Габаритные размеры, мм, не более	120 × 120 × 200	130 × 160 × 250	120 × 120 × 200	Ø 145 × 270	136 × 285	112 × 198 × 200	152 × 263	
Возможность ведения переговоров (речевого общения)	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	
Гарантийный срок хранения, лет	5	5	5	5,5	3	5	5	
Расположение дыхательного мешка относительно регенеративного патрона	Снизу	Снизу	Снизу	Сверху	Сверху	Сверху	Сверху	
Вместимость дыхательного мешка, дм ³	4,5	6,0	10,0	5,0	6,0	6,0	5,0–6,0	
Наличие пускового устройства	Имеется	Имеется 10,0	Имеется 10,0	Имеется 10,0	Имеется 6,0	Имеется 6,0	Имеется 6,0	
Лицевая часть	Маска МИА – ДМТ	Капюшон	Капюшон или маска	Загубник, носовой зажим	Шлем-маска ШИП-25 (к)	Загубник, носовой зажим	Загубник, носовой зажим	
Разработчик	ОАО «Корпорация «Росхимзащита»							
Изготовитель	ОАО «Донецкий завод горноспасательной аппаратуры»							
	АО «Гамбовмаш»							

Таблица 2

Основные технические характеристики дыхательных аппаратов изолирующих со сжатым кислородом

Технические характеристики	Респиратор изолирующий регенеративный		Дыхательный аппарат	Респиратор «Грамix»
	P-30	P-30 A		
Температурный интервал, °С	-20 ... +60	-40 ... +60	-20... +60	-15 ... +60
Источник кислорода для дыхания в респираторе	Кислород газобразный медицинский в баллоне под давлением 20 МПа	Сжатый кислород	Сжатый кислород в баллоне	Газовая смесь в баллоне 40 % O ₂ /60 % N ₂
Время защитного действия при работе средней тяжести, ч, не менее	4	4	4	2
Масса поглотителя химического известкового ХП-И, кг, не менее	2,0	2,0	Напронная известь. Нет данных	
Полезная вместимость дыхательного мешка, дм ³ , не менее	5,0	5,0	5,5	5,5
Габаритные размеры, мм	165 × 375 × 450	165 × 375 × 450	145 × 450 × 595	177 × 450 × 595
Масса в снаряженном виде, кг, не более	12,5	11,0	13,6	13,2
Наличие холодозащиты респиратора и его отдельных конструктивных узлов	Нет	Имеется. Защитные чехлы на шлангах, патроне с ХП-И	Нет	Нет
Изготовитель	Донецкий завод горноспасательной аппаратуры, ДНР	Имеется. Утеплительные чехлы из шерстяной ткани на шлангах и патроне с ХП-И	Нет данных	Нет
		ОАО «Завод горноспасательного оборудования», РФ, Екатеринбург		Германия, Dräger

Однако при пользовании им необходимо выполнить ряд операций вручную в определенной последовательности (сборку конструктивных узлов), что может привести к ошибкам и тяжелым последствиям в экстремальных условиях. Кроме того, аппарат неудобен при эксплуатации из-за значительных габаритов и его массы относительно других аналогичных аппаратов.

Самоспасатель ШСС-1 (ШСС-1Т) является универсальным газозащитным аппаратом, независимым от газового состава окружающей среды, поэтому он выбран в качестве базового образца при усовершенствовании.

Возможность обеспечить надежную защиту органов дыхания в условиях отрицательных температур снижена по нескольким причинам:

– образование конденсата в полумасках или фильтрующих элементах, в связи с чем повышается сопротивление входу и выдоху.

– при резких перепадах температуры подвижные части, такие как клапаны некоторых респираторов, прилипают или утрачивают функциональное назначение [6, 7].

Для арктических условий необходимы средства спасения, учитывающие воздействие таких низких отрицательных температур [8, 9]. В качестве мер обеспечения нормального функционирования дыхательных аппаратов при низких отрицательных температурах рекомендуют удалять влагу из клапанной коробки через 40–60 минут работы; применять для шлангов и регенеративных патронов теплозащитные чехлы, а также утеплительные манжеты для стекол масок; входить в непригодную для дыхания среду только после подогрева дыханием клапанной коробки, клапанов и поглотителя диоксида углерода ХПИ в регенеративном патроне [10].

Также можно утверждать, что практически решен вопрос защиты органов дыхания работников от воздействия непригодной для дыхания среды при температуре окружающей среды от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ – с помощью специальных автономных и изолирующих дыхательных аппаратов, не уступающих по своим показателям лучшим зарубежным моделям (табл. 1, 2).

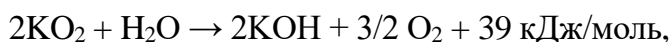
Для работы в условиях более низкой температуры до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ применение таких аппаратов проблематично. Поэтому исследование возможных путей конструктивных и иных усовершенствований самоспасателей, позволяющих расширить температурный диапазон применения, является актуальной задачей.

Цель исследования – определение возможных конструктивных и иных усовершенствований самоспасателей, позволяющих применять их в условиях Крайнего Севера на основе установления зависимости времени начала активации регенеративной реакции от содержания влаги и температуры.

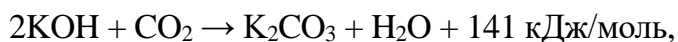
Результаты исследований. Одним из основных элементов конструкции изолирующего самоспасателя с химически связанным кислородом является регенеративный патрон, снаряженный кислородсодержащим веществом. В патроне протекает регенеративный процесс, при котором происходит очистка газовой дыхательной смеси (далее – ГДС) от водяных паров и диоксида углерода и обогащение ее выделившимся кислородом.

Этот процесс протекает по меньшей мере в две основные стадии:

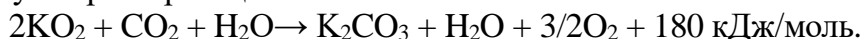
– гидролиз KO_2



– поглощение CO_2



– или по суммарной реакции



Возможно протекание и других химических реакций в зависимости от температуры процесса и соотношения $\text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O}$ [11]. В случае применения дыхательного аппарата, охлажденного до низких отрицательных температур, в начальный период его работы наблюдается повышение концентрации диоксида углерода во вдыхаемой ГДС из-за того, что водяные пары выдыхаемой ГДС конденсируются на холодных поверхностях воздухопроводной системы, резко уменьшается абсолютная влажность ГДС, поступающей в поверхностный слой регенеративного продукта. При этом на продукт попадает ничтожное количество влаги, которое является явно недостаточным для образования необходимого количества гидроксида калия для поглощения диоксида углерода.

В изолирующих самоспасателях с химически связанным кислородом также одним из основных элементов конструкции является пусковое устройство, состоящее из механизма и пускового брикета («свечи») на основе надпероксидов или хлоратов (перхлоратов) щелочных металлов. Назначение пускового устройства – обеспечение кислородом (не менее $6,0 \text{ дм}^3$) человека, включенного в аппарат в начальный период работы самоспасателя (около 1 мин), т.е. до тех пор, пока под действием влаги и теплоты брикетного газа, диоксида углерода и влаги выдыхаемого человеком воздуха кислородсодержащий продукт дыхательного аппарата начнет выделять кислород в количестве, необходимом для дыхания.

Пусковое устройство обеспечивает включенного в дыхательный аппарат человека кислородом в начальный период работы аппарата, так как регенеративный продукт как химический источник кислорода, которым снаряжен дыхательный аппарат, начинает выделять кислород не сразу, а через некоторое время после включения пользователя. Пусковой период работы дыхательного аппарата длится от одной до двух минут в зависимости от температуры окружающей среды, свойств регенеративного продукта и особенностей конструкции самоспасателя.

В отечественной практике применяют пусковые брикеты на основе надпероксидов (пероксидов) калия и натрия, содержащие дополнительно активирующие их разложение добавки. В качестве последних используют компоненты, генерирующие теплоту и влагу, а также различные наполнители, обеспечивающие прочность и стабилизирующие скорость выделения кислорода. Срок службы таких брикетов составляет не менее 8 лет, они стабильны при эксплуатации, термостойки при температуре $+110 \text{ }^\circ\text{C}$.

В зарубежных дыхательных аппаратах с химически связанным кислородом в начальный период работы аппарата используют преимущественно свечи на основе хлоратов KClO_4 (перхлоратов) щелочных металлов, содержащие ряд добавок, обеспечивающих активацию процесса и необходимую постоянную скорость генерирования кислорода. Для инициирования процесса генерирования кислорода применяют различные методы, позволяющие придать составу на основе KClO_4 начальную теплоту, например, электрическое нагревание (искра), трение и др.

Брикет-«свеча» на основе хлоратов (перхлоратов) при разложении не выделяет влагу, необходимую для активации регенеративного продукта на основе надпероксидов щелочных металлов, особенно в начальный период работы дыхательного аппарата. Значительно усложняет процесс производства и

эксплуатацию свечи необходимость использования специального инициирующего состава. Свечи в процессе разложения могут выделять хлор, присутствие которого в дыхательной смеси является совершенно недопустимым.

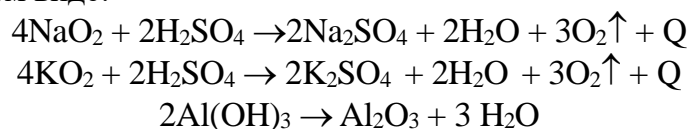
С точки зрения технологичности производства и экономичности, а также безопасности использования большинство известных хлоратных свечей уступают пусковым брикетам на основе надпероксидов, так как в их состав входит большое количество разнородных соединений (хлораты и пероксидные соединения).

В самоспасателе ШСС-1П применяют пусковой брикет ПБ-5, разработки НИИГД «Респиратор», имеющий следующие технические характеристики: масса 44–45 г, диаметр 44 мм, высота 24 мм, плотность в пределах 1550 кг/м³. Примерный состав брикета: KO₂ – 40 %, NaO₂ – 16 %, Al(OH)₃ – 40 %, Al (пудра) – 4 %.

При разложении пускового брикета выделяется около 6 г влаги. При использовании аппарата ШСС-1П при температурах от –20 °С до +40 °С такого количества влаги является достаточным для разогрева и запуска в работу продукта ОКЧ-3.

Для разложения пускового брикета применяют инициирующую жидкость в виде 33–37 % раствора серной кислоты (объемом 1,0...1,2 см³), которая не замерзает до температуры –70 °С.

Механизм реакции компонентов ПБ-5 с инициирующей жидкостью можно описать в следующем виде:



В результате химической реакции выделяются кислород для дыхания (6,0–8,0 дм³), теплота и влага для активации регенеративного продукта на основе надпероксида калия KO₂ (продукт ОКЧ-3). Время разложения пускового брикета при температуре положительной – не более 40 с, при температуре –20 °С – не более 60 с. Зависимость объема выделяемого пусковым брикетом кислорода от начальной температуры представлена на рис. 1, зависимость температуры замерзания серной кислоты от её концентрации – на рис. 2 [12].

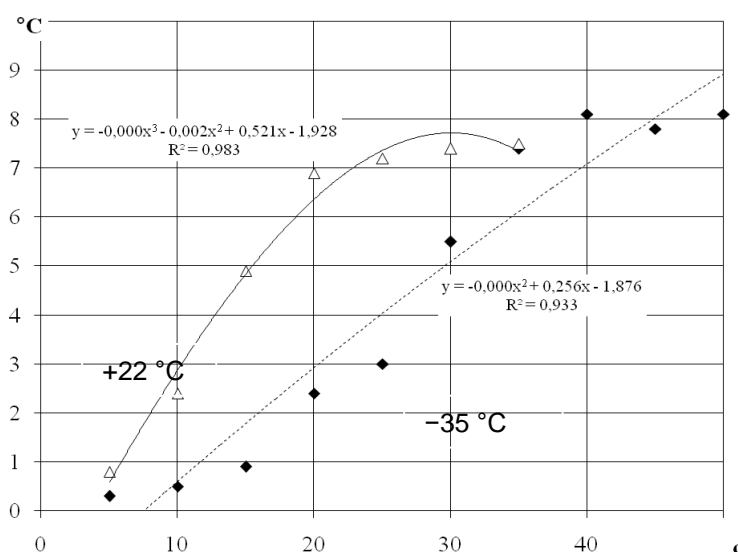


Рис. 1. Зависимость объема выделяемого пусковым брикетом кислорода от начальной температуры

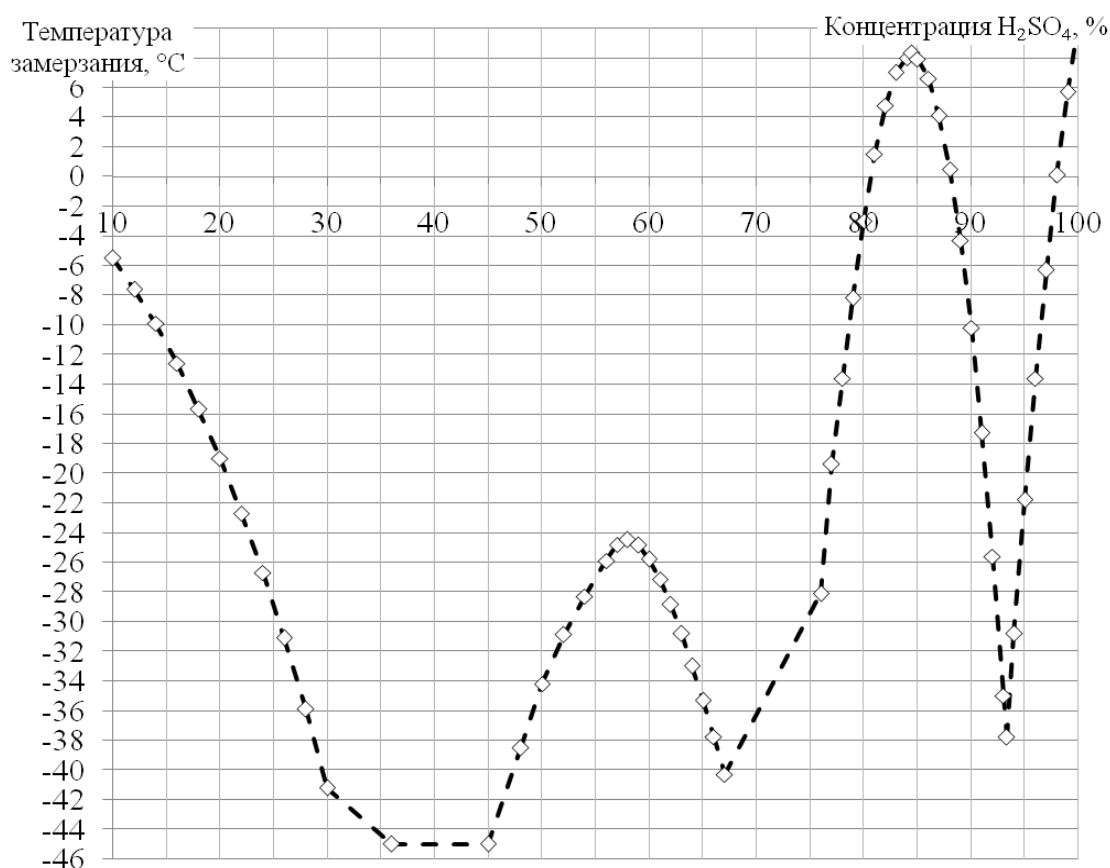


Рис. 2. Зависимость температуры замерзания серной кислоты от её концентрации

Для обеспечения нормального функционирования самоспасателя при низких отрицательных температурах НИИГД «Респиратор» разработан способ изготовления регенеративного патрона, заключающийся в предварительной подготовке (активации) «лобового» слоя путем обработки его дозированным количеством влаги (АС № 1298989, СССР, 1987 г.). В результате этого на поверхности гранул кислородсодержащего продукта образуется слой гидроксида калия, обеспечивающий снижение концентрации CO₂ во вдыхаемой ГДС в начальный период работы самоспасателя до нормируемого значения (объемная доля 3 %).

Таким образом, для обеспечения эффективной работы самоспасателя в пусковой период в указанных условиях кислородсодержащий продукт в патроне необходимо обрабатывать при изготовлении аппарата дополнительным дозированным количеством влаги с целью получения КОН. В результате такого способа изготовления регенеративного патрона пусковой период самоспасателя при низких отрицательных температурах не превышает времени разработки продукта самоспасателя при положительных температурах.

Быстрого разогрева кислородсодержащего продукта ОКЧ в патроне можно добиться также добавлением в лобовой слой патрона продукта на основе NaO₂, как в изолирующем противогазе ИП-4МК, но тогда может возрасти выше нормы температура вдыхаемой газовой дыхательной смеси (более 60 °C). Также в состав ОКЧ-3 вводят «пушонку» СаО. Возможно также увеличение массы пускового брикета и объема иницирующей жидкости.

Применение индивидуальной дыхательной аппаратуры при низких отрицательных температурах окружающей среды требует обязательного применения теплозащитных (утеплительных) чехлов на дыхательный шланг (гофртрубку) и патрон с пусковым брикетом. Это опробовано на практике при испытании самоспасателей СИГ-1 и респираторов со сжатым кислородом Р-30А для Астраханского газоконденсатного месторождения и серийно выпускаемом в настоящее время респираторе со сжатым кислородом «Урал-10».

Зарубежные производители рекомендуют хранение своих дыхательных аппаратов в состоянии, готовом к работе, и запуск в диапазоне от $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$; температуру окружающей среды (после запуска) от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, включаться в самоспасатели желательно в теплом помещении или в кабине боевого расчета пожарного автомобиля. Тогда кислородсодержащий продукт в патроне начнет работать в полную силу: поглощать диоксид углерода и влагу, выдыхаемые человеком, а проходящая через патрон газовая дыхательная смесь нагревается приблизительно до $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температура снаружи аппарата не будет влиять на работу самоспасателя даже в условиях Крайнего Севера.

Список литературы / References

1. Аварийно-спасательная техника, предназначенная для ликвидации ЧС в Арктической зоне России / Ш. Ш. Дагиров, М. В. Алешков, А. В. Плосконосов, О. В. Двоенко, И. А. Ольховский // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2015. – № 3. – С. 7–13. – DOI 10.25257/FE.2015.3.7-13 – EDN VENPJD

Dagirov, Sh. Sh., Aleshkov, M. V., Ploskonosov, A. V., Dvoenko, O. V., Olkhovsky, I. A. *Avariynno-spasatelnaya tekhnika, prednaznachennaya dlya likvidatsii CHS v Arkticheskoy zone Rossii* [Emergency-rescue appliances for eliminating emergencies in the Arctic zone of Russia]. Fire and emergencies: prevention, elimination. 2015, no. 3, pp. 7-13. DOI 10.25257/FE.2015.3.7-13 – EDN VENPJD (In Russian)

2. Соловьев, Д. Е. Прогноз температурного режима строящейся глубокой россыпной шахты / Д. Е. Соловьев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы XII Всероссийской науч.-практ. конф., посв. 65-летию ИГАБМ СО РАН, Якутск, 23–25 марта 2022 года. – Якутск: СВФУ им. М. К. Аммосова, 2022. – С. 632–636. – DOI 10.52994/9785751332846_2022_132 – EDN SHUZTA

Solovev, D. E. *Prognoz temperaturnogo rezhima stroyashcheysya glubokoy rossyynoy shakhty* [Forecast of the temperature regime of the deep placer mine under construction]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: Materialy XII Vserossiiskoi nauch.-prakt. konf., posv. 65-letiyu IGABM SO RAN*. Yakutsk: NEFU Publ., 2022, pp. 632-636. – DOI 10.52994/9785751332846_2022_132 – EDN SHUZTA (In Russian)

3. Зборщик, Л. А. Опыт применения дыхательной аппаратуры при отрицательных температурах / Л. А. Зборщик, Р. С. Плетенецкий, В. И. Францев // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: Материалы IX Международной заочной научно-практической конференции «Предупреждение и ликвидация ЧС: методы, технологии, проблемы и перспективы», Светлая Роцца, 25 июля 2025 г. – Светлая Роцца: Филиал ИППК, 2025. – С. 90–92.

Zborshchik, L. A., Pleteneckiy, R. S., Francev, V. I. *Opyt primeneniya dykhatelnoy apparatury pri otricatelnykh temperaturakh* [Experience in the use of breathing equipment at negative temperatures]. *Preduprezhdenie i likvidaciya chrezvychajnykh situaciy: Materialy IX Mezhdunarodnoy zaочноy nauchno-prakticheskoy konferencii «Preduprezhdenie i likvidaciya CHS: metody, tekhnologii, problemy i perspektivy»*. Svetlaya Roshcha, Filial IPPK Publ., 2025, pp. 90-92.

4. Галкин, А. Ф. Тепловой режим рудников криолитозоны / А. Ф. Галкин // Записки Горного института. – 2016. – Т. 219. – С. 377–381. – EDN WWWWOR

Galkin, A. F. *Teplovoy rezhim rudnikov kriolitozony* [The thermal condition of the mines in cryolite zone]. Journal of mining institute. 2016, no. 219, pp. 377-381. – EDN WWWWOR (In Russian)

6. Гудимов, Д. В. К вопросу разработки средств индивидуальной защиты органов дыхания для использования в отрицательных температурах / Д. В. Гудимов, Е. Н. Чемезов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 344–347. – EDN SMMHJB

Gudimov, D. V., Chemezov, E. N. [Development of personal respiratory protection for use in subzero temperatures]. Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2014, no. 9, pp. 344-347. – EDN SMMHJB (In Russian)

7. Савчук, О. Н. Обеспечение безопасности пожарных-спасателей Арктической зоны при тушении пожара в торгово-развлекательных центрах / О. Н. Савчук // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, 2023. – С. 82-86. – EDN ZGANFF

Savchuk, O. N. [Ensuring the safety of firefighters-rescuers of the arctic zone when extinguishing a fire in shopping and entertainment centers]. *Pozharnaya bezopasnost: sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya*. FSBEI HE Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ, 2023. pp. 82-86. – EDN ZGANFF (In Russian)

8. Яровой, В. Ю. О необходимости применения изолирующих самоспасателей при эвакуации пассажиров из салона воздушного судна / В. Ю. Яровой, С. Н. Молодец // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. – 2023. – № 3(11). – С. 54–60. – DOI 10.34987/2712-9233.2023.16.30.010 – EDN GYBNRC

Yarovoi, V. Yu., Molodets, S. N. [On the need to use insulating self-rescuers when evacuating passengers from the aircraft cabin]. Actual Security Problems in the Technosphere. 2023, no. 3(11), pp. 54-60. – DOI 10.34987/2712-9233.2023.16.30.010 – EDN GYBNRC (In Russian)

9. Худякова, А. Ю. Результаты проведения практических мероприятий, апробации методик и методических рекомендаций, техники и технических средств, технологий, программного обеспечения Межведомственного опытно-исследовательского учения сил и средств единой гос. системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне РФ («Безопасная Арктика – 2023») / А. Ю. Худякова, З. Д. Меретуков // Науч.-метод. сопровождение проведения межведомственного опытно-исследовательского учения сил и средств единой гос. системы предупреждения и ликвидации ЧС в Арктической зоне РФ «Безопасная Арктика – 2023». – Москва: Всероссийский НИИ по проблемам ГО и ЧС МЧС России, 2024. – С. 144–162. – EDN OBPJPG

Khudyakova, A. Yu., Meretukov, Z. D. *Rezultaty provedeniya prakticheskikh meropriyatiy, aprobatsii metodik i metodicheskikh rekomendatsiy, tekhniki i tekhnicheskikh sredstv, tekhnologiy, programmnogo obespecheniya Mezhhvedomstvennogo opytно-issledovatel'skogo ucheniya sil i sredstv edinoy gos. sistemy preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychainykh situatsiy v Arkticheskoy zone RF («Bezopasnaya Arktika – 2023»)*. Nauch.-metod. soprovozhdenie provedeniya mezhvedomstvennogo opytно-issledovatel'skogo ucheniya sil i sredstv edinoy gos. sistemy preduprezhdeniya i likvidatsii CHS v Arkticheskoy zone RF «Bezopasnaya Arktika – 2023». Moscow: VNI GOChS (FC) Publ., 2024, pp. 144-162. – EDN OBPJPG (In Russian)

10. Особенности работы в СИЗОД при отрицательных температурах [Электронный ресурс]. – URL: <https://zdorov.todaytimes.ru/osobennosti-raboty-v-sizod-pri-otritsatelnyh-temperaturah-okruzhayushey-sredy> (дата обращения: 01.10.2025).

Osobennosti raboty v SIZOD pri otritsatelnykh temperaturakh. Available at: <https://zdorov.todaytimes.ru/osobennosti-raboty-v-sizod-pri-otritsatelnyh-temperaturah-okruzhayushey-sredy> (accessed: 01.10.2025). (In Russian)

11. Диденко, Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ / Н.С. Диденко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1990. – 160 с.

Didenko, N. S. *Regenerativnyye respiratory dlya gornospasatelnykh rabot.* 2nd ed. Moscow: Nedra Publ., 1990, 160 p. (In Russian)

12. Перельман, В.И. Краткий справочник химика / Сост. В.И. Перельман; Под общ. ред. сост. Б.В. Некрасова. – 7-е изд. – Москва ; Ленинград : Химия, 1964. – 624 с.

Perelman, V.I. *Kratkiy spravochnik khimika.* Edt. B.V. Nekrasova. 7 ed. Moscow, Leningrad, Chemistry Publ. 1964, 624 p. (In Russian)

Дата поступления рукописи 02.12.2025

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук П. Е. Мухиным

Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. of Tech. Sci., Main Researcher; e-mail: v.mamaev@80.mchs.gov.ru

Lyubov Alekseyevna Zborshchik, Senior Researcher; e-mail: lzborschik@yandex.ru

Ruslan Sergeevich Pletenetskiy, Senior Researcher; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru

Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»

283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-01

OPERATION OF MINE SELF-RESCUER AT NEGATIVE TEMPERATURES

Objective. Identification of possible design and other improvements of self-rescuers, allowing their use in the Far North based on the establishment of the dependence of the time of activation of the regenerative reaction on the moisture content and temperature.

Methods. Analytical methods for the study of the processes of regeneration of the gaseous respiratory mixture.

Results. Peculiarities of structural solutions and chemical composition of oxygen-containing product and starting briquette, allowing their use at negative temperatures in conditions of the Far North, were investigated.

Scientific novelty. For the first time, technical solutions were substantiated to activate the effect on chemically bound oxygen based on the production of alkali on the frontal layer of the oxygen-containing product, which make it possible to ensure its operation at negative temperatures in the Far North.

Practical significance. The research results obtained can be used in the development of new models of self-rescuers with improved technical characteristics.

Key words: *breathing apparatus; personal respiratory protection equipment; self-rescuer; regeneration; sorption; chemisorption; regenerative product; an oxygen-containing product; negative temperatures.*

For citation: Mamayev V. V., Zborshchik L. A., Pletenetskiy R. S. Operation of mine self-rescuer at negative temperatures. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 55-65. EDN YGVEAK

УДК 622.281.42:666.971.16

Владимир Григорьевич Агеев, д-р техн. наук, вед. научн. сотр.; e-mail: v.ageev@80.mchs.gov.ru
Виктория Валентиновна Лебедева, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: v.lebedeva@80.mchs.gov.ru
Олег Владимирович Храпоненко, ст. науч. сотр.; e-mail: o.hraponenko@80.mchs.gov.ru
Федеральное государственное казенное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»
283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-55

БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЙ СОСТАВ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ПОСЛОЙНЫМ НАНЕСЕНИЕМ

Цель. Разработка быстротвердеющего состава с ранним набором прочности и сокращением сроков его схватывания для возведения в шахтах взрывоустойчивых перемычек послойным нанесением (аддитивным способом).

Методы. Определение нормальной густоты и подвижности раствора методом расплыва усеченного мини-конуса. Стандартные методы определения сроков схватывания раствора, предела прочности при изгибе и сжатии отвержденного материала.

Результаты. Установлено наиболее рациональное содержание модифицирующих добавок – пластификатора и метакаолина в цементно-шлаковой смеси, принимая в качестве значимых оценочных критериев: показатель диаметра расплыва, время начала и окончания схватывания раствора, предел прочности при сжатии через 5...6 ч твердения.

Научная новизна. Разработана рецептура цементно-шлакового состава, физико-механические свойства которого позволяют использовать его для послойного возведения в шахтах взрывоустойчивых перемычек.

Практическая значимость. Свойства разработанного состава позволяют рассматривать его как один из эффективных вариантов получения быстротвердеющего материала для возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек аддитивными технологиями, когда ранний набор прочности и сокращение сроков схватывания являются главными технологическими условиями.

Ключевые слова: аддитивные технологии; диаметр расплыва; механическая прочность; модифицирующие добавки; подвижность раствора; сроки схватывания раствора; цементно-шлаковая смесь.

Для цитирования: Агеев В. Г., Лебедева В. В., Храпоненко О. В. Быстротвердеющий состав для возведения взрывоустойчивых перемычек послойным нанесением // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 66–72. – EDN XMZCIQ

Постановка проблемы. В настоящее время аддитивные технологии широко применяют в машиностроении, строительстве, авиакосмической отрасли, судостроении, нефтегазовом секторе и других сферах производства.

Снижение материально-технических затрат и минимизация риска производственного травматизма обуславливают научно-практический интерес к технологиям послойного возведения взрывоустойчивых перемычек, близких к аддитивным. Возможность реализации такого технологического подхода зависит от влияния различных факторов (рис. 1).

Эффективность процесса возведения и качество готовой перемычки в значительной степени зависят от используемого материала. Компонентный состав материала обеспечивает реологические и прочностные свойства, необходимые для послойной технологии изготовления и повышенной устойчивости готовой перемычки к воздействию взрывной волны.

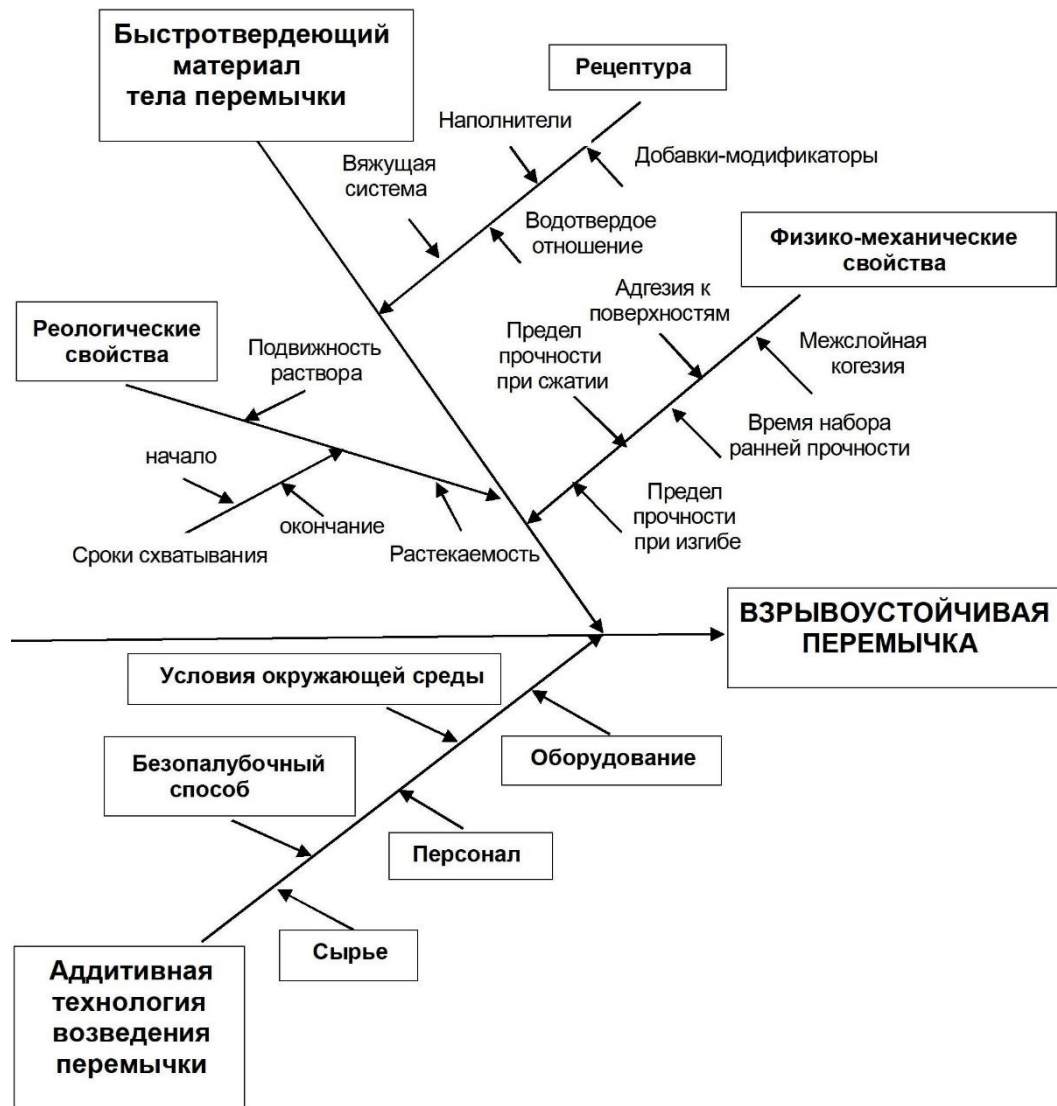


Рис. 1. Факторы, влияющие на возведение перемычки аддитивным (послойным) способом

Анализ последних исследований и публикаций. Преимущества аддитивных технологий в горнодобывающей отрасли в части создания насосов, фильтров, деталей шахтных подъемников, запасных частей для горных машин, которые не производятся в массовом масштабе, подробно рассмотрены в работах [1–3]. Методика определения параметров крепления элементов горных выработок торкретбетоном и торкретфибробетоном послойным нанесением для различных горнотехнических условий разработана исследователями [4–6]. Однако сведений относительно составов для возведения шахтных перемычек аддитивными технологиями недостаточно. Во многом это связано с особенностями применяемых материалов, методов исследований и требований к конструкции шахтных перемычек. В связи с этим, разработка быстротвердеющего состава для возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек аддитивным способом представляет актуальную научно-практическую задачу.

Цель работы – разработка быстротвердеющего цементно-шлакового состава с ранним набором прочности и сокращением сроков схватывания для возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек послойным нанесением.

Методика эксперимента. В исследованиях использованы материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н;
- доменный отвальный шлак Донецкого металлургического завода;
- ускоритель процесса раннего твердения;
- пластификатор;
- метакаолин.

} модифицирующие добавки

Экспериментальные исследования включали оценку параметров – нормальной густоты, подвижности, сроков схватывания растворов, а также прочности на изгиб и сжатие отвержденных образцов. В лабораторных условиях реологические характеристики определяли методом расплыва мини-конуса. Значение диаметра расплыва в пределах 72...76 мм соответствовало нормальной густоте раствора. Сроки схватывания раствора определяли в соответствии с ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема». Прочность при изгибе и сжатии образцов определяли в соответствии с требованиями действующего стандарта ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». В случае отрицательных результатов по оценке изменения реологических свойств раствора испытания образцов на изгиб и сжатие не проводили.

Результаты исследований. Оценочными критериями приведенных выше параметров быстротвердеющего состава приняты:

- диаметр расплыва раствора, $d_{\text{распл}}$, мм;
- время начала и окончания схватывания раствора, ч-мин;
- время твердения раствора, $\tau_{\text{ТВ}}$, ч-мин;
- предел прочности образцов при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$, МПа, и сжатии $\sigma_{\text{сж}}$, МПа, после 4 ч, 5 ч, 6 ч и 24 ч твердения раствора.

Влияние содержания пластификатора в диапазоне 0,5...2 масс. % от массы цемента в цементно-шлаковой смеси с ускорителем твердения на подвижность и сроки схватывания раствора исследовали при водоцементном отношении (ВЦ) – 0,36, 0,37 и 0,43 (табл. 1).

Таблица 1

Рецептуры растворных смесей и результаты экспериментов

ВЦ	Содержание пластификатора в растворной смеси, масс. %	Диаметр расплыва раствора $d_{\text{распл}}$, мм	Время твердения раствора $\tau_{\text{ТВ}}$, ч-мин
0,43	0	73	2-40
	0,5	79,5	3-20
	1,0	137	3-50
	1,5	161	4-10
0,37	0,5	71	3-45
	1,0	72	3-00
	1,5	73	3-00
	2,0	75,5	3-05
0,36	0,5	70	2-40
	1,0	71	2-50
	1,5	71	2-50

Увеличение содержания пластификатора в смеси от 0,5 масс. % до 1,5 масс. % при ВЦ = 0,43 привело к существенному росту значений $d_{\text{распл}}$ и $\tau_{\text{ТВ}}$. Поэтому дальнейшие исследования состава с содержанием пластификатора 2 масс. % и ВЦ = 0,43 считали нецелесообразными ввиду слишком низкой вязкости раствора. Для ВЦ = 0,37 значения $d_{\text{распл}}$ растворов, содержащих 1 масс. % и 1,5 масс. % пластификатора уменьшились примерно в два раза по сравнению с $d_{\text{распл}}$ при ВЦ = 0,43. Увеличение содержания пластификатора до 2 масс. % не повлияло на сроки схватывания раствора – значение $\tau_{\text{ТВ}}$ практически не изменилось, а $d_{\text{распл}}$ – увеличился до 75,5 мм.

Для ВЦ = 0,36 получены значения $d_{\text{распл}}$ раствора в интервале 70...71 мм, что не соответствовало нормальной густоте раствора.

Таким образом, введение 1,5 масс. % пластификатора в цементно-шлаковую смесь способствовало снижению ВЦ с 0,43 до 0,37 при сохранении рационального значения $d_{\text{распл}}$. Вместе с тем, $\tau_{\text{ТВ}}$ растворной смеси оставалось довольно большим, что для технологии послойного возведения перемишки неприемлемо.

Для сокращения $\tau_{\text{ТВ}}$ растворной смеси в экспериментальных исследованиях использована модифицирующая добавка на основе кальцинированного каолина – метакеолин, свойства которого позволяют интенсифицировать процесс гидратации цементного вяжущего и сформировать более однородную структуру твердеющего материала [7, 8]. При замещении части портландцемента на метакеолин содержание пластификатора в исследуемых составах было одинаково и составило 1,5 масс. % от массы вяжущего.

На основании результатов экспериментальных исследований получены зависимости изменения $\sigma_{\text{сж}}$ образцов от содержания метакеолина в смеси, соответствующего степени замещения им портландцемента в диапазоне концентраций 5...15 масс. % от массы цемента (рис. 2).

Значения водовяжущего отношения воды затворения к суммарному содержанию портландцемента и метакеолина для исследуемых составов приведены в таблице 2.

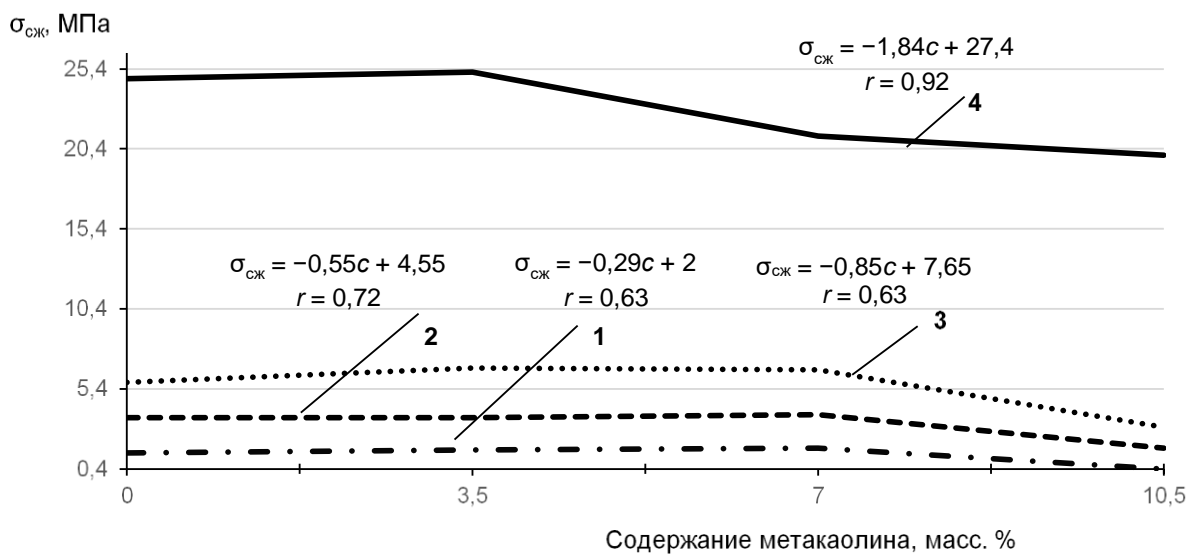


Рис. 2. Кинетика набора прочности на одноосное сжатие образцами через время твердения: 1) 4 ч; 2) 5 ч; 3) 6 ч; 4) 24 ч

Замещение части портландцемента высокоактивным метаксаолином на 5 % и 10 % (состав 1 и 2 соответственно) ускорило процесс начала и окончания схватывания, а также положительно повлияло на прочность образцов через 5 ч и 6 ч твердения по сравнению с составом без метаксаолина (табл. 2).

Таблица 2

Результаты экспериментов

Показатель	Номер состава				
	без метаксаолина	1	2	3	
Степень замещения цемента метаксаолином (от массы цемента), масс. %	0	5	10	15	
Предел прочности при сжатии / изгибе, МПа, через время твердения	4 ч	1,4 / 0,6	1,7 / 0,7	1,6 / 0,7	0,4 / -
	5 ч	3,6 / 1,6	3,8 / 1,7	3,6 / 1,6	1,7 / 0,6
	6 ч	5,8 / 1,9	6,7 / 2,3	6,6 / 2,4	3,0 / 1,1
	24 ч	24,8 / 4,2	25,2 / 4,3	21,2 / 4,1	20,0 / 3,6
Сроки схватывания, ч-мин	начало	1-48	1-34	1-25	1-14
	конец	3-29	2-31	2-00	1-54
Водовязущее отношение	0,36	0,37	0,38	0,40	

Необходимость повышения водовязущего отношения с 0,36 до 0,40 в сериях эксперимента (табл. 2) объясняется высокой водопотребностью смесей, содержащих метаксаолин с удельной поверхностью 1700 м²/кг [9]. Увеличение степени замещения цемента метаксаолином до 15 масс. % вызвало снижение эффекта повышения ранней прочности образцов со временем твердения от 4 ч до 24 ч.

Прочность при сжатии материала с максимальной степенью замещения портландцемента метаксаолином (состав 3) примерно в 2...3,5 раза ниже прочности образцов без метаксаолина после 4 ч, 5 ч и 6 ч твердения. Пределы прочности при изгибе и сжатии для составов 1 и 2 через 4 ч твердения практически одинаковы и немного выше по сравнению с аналогичными показателями для состава без добавки метаксаолина. Среди исследованных образцов наиболее короткие сроки схватывания и наименьшие значения прочности установлены для состава 3. Такие характеристики не позволяют использовать состав 3 для послойной укладки в шахтах взрывоустойчивой перемычки.

Можно отметить, что подвижность, сроки схватывания и прочностные показатели в ранние сроки твердения состава 2 позволяют использовать его для послойного возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек.

Результаты экспериментальных исследований показали:

- сокращение времени твердения и повышение ранней прочности одновременно могут быть достигнуты при замещении в цементно-шлаковой смеси портландцемента метаксаолином на 10 %;

- продолжительность и характер процесса структурообразования определяются концентрацией пластификатора и метаксаолина в цементно-шлаковой смеси;

- совместное действие пластификатора и метаксаолина на ранних сроках твердения раствора имеет преимущество как в пластичности (текучести), так

и в высокой ранней прочности, что важно при возведении шахтных взрывоустойчивых перемычек.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено рациональное содержание пластификатора и метакаолина в цементно-шлаковом составе. Реологические и прочностные характеристики модифицированного состава позволяют рассматривать его как один из эффективных вариантов получения быстротвердеющего материала для возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек, когда ранний набор прочности и сокращение сроков схватывания являются главными условиями аддитивной технологии.

Дальнейшие исследования предполагают изучение влияния армирующих добавок – базальтового и полипропиленового волокна на повышение ранней прочности модифицированного цементно-шлакового состава.

Список литературы / References

1. Применение аддитивных технологий в горной промышленности / Г. Реджепова, С. Аташов, О. Тойлыев, Г. Аманов // Символ науки. – 2024. – №11-1-2. – С. 36–37.

Redzhepova, G., Atashov, S., Toylyuev, O., Amanov, G. *Primeneniye addi-tivnykh tekhnologiy v gornoy promyshlennosti* [Application of additive technologies in the mining industry]. A symbol of science, 2024, no. 11-1-2, pp. 36-37. (In Russian)

2. Feng, X., Carvelli, V. Additive manufacturing technology in mining engineering research // Deep Underground Science and Engineering, 2022; 1:15-24. (accessed 07.09.2022). (In English)

3. Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., Han, B. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. Compos Part A-Appl S. 2019; 125:105533. DOI: 10.1002/dug2.12014. (accepted 01.07. 2019). (In English)

4. Голембо, О. Д. Аддитивная технология строительства вертикальных стволов горных предприятий / О. Д. Голембо // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № S3. – С. 3–14.

Golembo, O. D. *Additivnaya tekhnologiya stroitelstva vertikalnykh stvolov gornyykh predpriyatiy* [Additive technology for the construction of vertical shafts at mining enterprises]. Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal), 2024; no. S3, pp. 3-14. (In Russian)

5. Плешко, М. С., Голембо, О. Д. Методика определения параметров торкрет-бетонного крепления шахтных стволов, пройденных способом бурения / М. С. Плешко, О. Д. Голембо // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 2. – С. 403–415.

Pleshko, M. S., Golembo, O. D. *Metodika opredeleniya parametrov tor-kret-betonnogo krepneniya shakhtnykh stvolov, proydennykh sposobom bu-reniya*. [Methodology for determining the parameters of shotcrete reinforcement of mine shafts drilled by the drilling method]. Proceedings of Tula State University. Earth Sciences, 2024; no. 2, pp. 403-415. (In Russian)

6. Голембо, О. Д. Определение параметров торкрет-бетонной крепи ствола, пройденного способом бурения / О. Д. Голембо // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № S3. – С. 15–24.

Golembo, O. D. *Opredeleniye parametrov tor-kret-betonnay krepni stvola. proydennogo sposobom bureniya* [Determination of the parameters of the shotcrete concrete lining of a borehole drilled by the method of]. Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal), 2024; no. S3, pp. 15-24. (In Russian)

7. Лебедева, В. В. Влияние метакаолина на свойства быстротвердеющего материала взрывоустойчивых перемычек / В. В. Лебедева, О. В. Храпоненко, О. Н. Щербакова // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 58–63. – EDN PHMDUK

Lebedeva, V. V., Khraponenko, O. V., Shcherbakova, O. N. *Vliyaniye metakaolina na svoystva bystrotverdeyushchego materiala vzyvoustoychivyykh peremychek* [The effect of metakaolin on the properties of fast-hardening explosive-resistant laps]. Scientific bulletin of the NI «Respirator», 2025; no. 4(62), pp. 58-63. EDN PHMDUK (In Russian)

8. Об опыте применения метакаолина в качестве структурирующей добавки в цементных композитах / Г. И. Яковлев, Г. Н. Первушин, И. А. Пудов, И. С. Полянских, С. З. Саидова // Вестник ВСГУТУ. – 2021. – № 2(81). – С. 58–68.

Yakovlev, G. I., Pervushin, G. N., Pudov, I. A., Polyanskikh, I. S., Saidova, S. Z. *Ob opyte primeneniya metakaolina v kachestve strukturiruyushchej dobavki v cementnykh kompozitakh* [On the experience of using metakaolin as a structuring additive in cement composites]. Vestnik VSGUTU, 2021; no. 2(81), pp. 58-68. (In Russian)

9. Платова, Р. А. Влияние дисперсности каолина месторождения Журавлиный лог на пуццолановую активность метакаолина / Р. А. Платова, Т. М. Аргынбаев, З. В. Стафеева // Строительные материалы. – 2012. – № 2. – С. 75–79.

Platova, R. A., Argyntbaev, T. M., Stafeyeva, Z. V. *Vliyanie dispersnosti kaolina mestorozhdeniya Zhuravlinyj log na puccolanovuyu aktivnost' metakaolina* [Influence of the dispersity of kaolin from the Zhuravliny Log deposit on the pozzolanic activity of metakaolin]. Construction Materials. 2012; no. 2. pp. 75-79. (In Russian)

Дата поступления рукописи 08.12.2025

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым

Vladimir Grigorievich Ageev, Dr. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: v.ageev@80.mchs.gov.ru
Victoria Valentinovna Lebedeva, Cand. of Tech. Sci., Head of Dep; e-mail: v.lebedeva@80.mchs.gov.ru
Oleg Vladimirovich Khraponenko, Senior Researcher; e-mail: o.khraponenko@80.mchs.gov.ru
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artyoma St., 157, Phone: +7 (856) 252-78-55

FAST-SETTING COMPOSITION FOR BUILDING EXPLOSION-RESISTANT JOINTS BY LAYER APPLICATION

Objective. Development of a rapid-hardening composition with early strength gain and reduced setting time for the layer-by-layer (additive) construction of explosion-proof bulkheads in mines.

Methods. Determination of the normal consistency and mobility of the mortar using the truncated mini-cone method. Standard methods for determining the setting time of the mortar and the bending and compressive strength of the cured material.

Results. The most rational content of modifying additives – plasticizer and metakaolin – in the cement-slag mixture has been established, taking as significant evaluation criteria: the slump diameter, the initial and final setting times of the mortar, and the compressive strength after 5-6 hours of hardening.

Scientific novelty. A cement-slag composition formulation has been developed, the physical and mechanical properties of which allow its use for the layer-by-layer construction of explosion-resistant bulkheads in mines.

Practical significance. The properties of the developed composition allow it to be considered as one of the effective options for obtaining a fast-hardening material for the construction of mine explosion-resistant barriers using additive technologies, when early strength development and reduced setting times are the main technological conditions.

Keywords: *additive technologies; spreading diameter; mechanical strength; modifying additives; mortar mobility; mortar setting time; cement-slag mixture.*

For citation: Ageev V. G., Lebedeva V. V., Khraponenko O. V. Fast-hardening composition for constructing explosion-resistant lintels by layer-by-layer application. *Scientific bulletin of the NI «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 66-72. EDN XMZCIQ

УДК 622.53:622.82.7

Александр Владиславович Агарков, канд. техн. наук, зам. нач. института;

e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru

Дмитрий Алексеевич Политучий, нач. отд.; e-mail: poletuchi@mail.ru

Дмитрий Сергеевич Буряк, ст. науч. сотр.; e-mail: buryak_ds@mail.ru

Дарья Федоровна Балта, ст. науч. сотр.; e-mail: balta_darya@mail.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-39

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОРМАТИВНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАХТНОГО ВОДООТЛИВА

Цель. Исследование гидравлических процессов при совместной работе шахтного водоотлива и противопожарного водоснабжения для определения в расчетных точках пожарно-оросительного трубопровода необходимого расхода воды для пожаротушения и величины гидравлического напора.

Методы. Применен аналитический метод исследования неустановившегося движения воды в сети трубопроводов с переменным сечением с использованием фундаментальных законов гидродинамики, с обработкой результатов с помощью пакетов прикладных компьютерных программ.

Результаты. Получены зависимости, позволяющие определять расход и напор воды в точках отбора воды на пожаротушение при совместной работе шахтного водоотлива и сети противопожарного водоснабжения горных выработок.

Научная новизна. Разработана методика расчета гидравлических параметров при совместной работе шахтного водоотлива и противопожарного водоснабжения, отличающаяся от известных учетом параметров применяемого гидравлического оборудования, а также характеристики сети шахтных трубопроводов.

Практическая значимость. Результаты исследований позволят повысить эффективность тушения пожаров в шахтах при использовании двух систем водоснабжения (противопожарной системы и водоотлива).

Ключевые слова: угольная шахта; аварийный пожарный участок; горная выработка; подземные пожары экзогенного и эндогенного происхождения; шахтный водоотлив; противопожарное водоснабжение; гидравлический расчет.

Для цитирования: Агарков Ал. В., Политучий Д. А., Буряк Д. С., Балта Д. Ф. Обеспечение нормативных гидравлических параметров противопожарного водоснабжения с использованием шахтного водоотлива // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 73–82. – EDN ZGERQJ

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Несмотря на ежегодное повышение уровня промышленной безопасности и противопожарной защиты угольных шахт, подземные пожары остаются наиболее распространенным видом аварий (около 50 % подземных аварий), которые наносят отрасли существенный материальный ущерб и сопровождаются большим риском для жизни и здоровья шахтеров и горноспасателей [1]. Согласно анализу данных ФГУП «ВГСЧ» МЧС России, за 13-летний период произошло 603 аварии, из них – 288 подземных пожаров, а также пожаров на поверхностном комплексе шахт (в среднем – 22 пожара в год). По частоте возникновения пожары экзогенного и эндогенного происхождения в угольных шахтах составляют 45 % всех подземных аварий.

Самым дешевым и доступным средством для тушения пожаров в настоящее время является вода. Питание противопожарного водоснабжения угольных шахт

осуществляют от поверхностных пожарных резервуаров, которые заполняют от городских водопроводов [2].

Тем не менее, несмотря на все преимущества использования воды для пожаротушения, на планете с каждым годом расширяется дефицит пресной воды, который усугубляется повсеместно из-за негативного антропогенного воздействия [3]. Существующая тенденция нуждается в поиске эффективных решений устойчивого обеспечения водоснабжения населения и производства, как на глобальном, так и на государственном отраслевом уровне.

В угольных шахтах воду используют для производственных нужд и противопожарного водоснабжения. Шахты, имеющие большие притоки подземных вод, могут использовать их в качестве дополнительного источника противопожарного водоснабжения, либо полностью перекрыть потребности в обеспечении воды для пожаротушения. Использование шахтной воды позволит решить несколько актуальных в настоящее время технических задач: снять нагрузку с водоотливного комплекса по выдаче ее на поверхность, уменьшить использование пресной воды с поверхностных источников, обеспечить запас пожарного водоснабжения непосредственно в горных выработках, что представляет актуальное направление прикладных научных исследований.

Анализ последних исследований и публикаций. Возможность использования водосборников водоотливных установок горизонтов в качестве резерва пожарного запаса воды для подземного пожаротушения предусмотрено в проектах противопожарной защиты угольных шахт [2]. Эти водосборники должны иметь постоянный контролируемый запас воды. Если запланировано использование насосов водоотливных установок для подачи воды в пожарно-оросительную сеть, их гидравлические характеристики должны соответствовать характеристике сети. На практике использование шахтных вод вызывает затруднения в связи с возможностью возникновения поломки одной из систем из-за сложности обеспечения их правильной работы и учета всех функциональных связей задействованного оборудования. Основным препятствием к использованию шахтных вод для пожарного водоснабжения шахт является их значительная минерализация, общая загрязненность взвешенными частицами угля и породы, высокая агрессивность в отношении материала труб и арматуры [4].

Перед использованием шахтной воды для целей пожаротушения необходимо выполнить ее очистку отстаиванием и фильтрованием от взвешенных частиц [5, 6]. При использовании водоотлива для пожаротушения необходимо предусматривать устройство стационарных узлов переключения [7, 8].

Выбор того или иного варианта подачи воды для пожаротушения с использованием шахтного водоотлива должен быть определен исходя из горно-геологических условий, обеспечения нормативных значений давления и расхода в пожарных кранах и подтвержден результатами гидравлического расчета, что является актуальной теоретической задачей исследований.

Цель – исследование гидравлических процессов при совместной работе шахтного водоотлива и противопожарного водоснабжения для определения в расчетных точках пожарно-оросительного трубопровода необходимого расхода воды для пожаротушения и величины гидравлического напора.

Результаты исследований. Сеть пожарно-оросительных трубопроводов в горных выработках состоит из магистральных и участковых линий. Диаметр

магистральных линий, независимо от расчета на пропускную способность, не менее 150 мм, а участков – не менее 100 мм [2].

Давление воды на выходе из пожарных кранов должно составлять при нормируемом расходе воды на подземное пожаротушение 0,6...1,5 МПа, а в трубопроводах – ограничивается их прочностью. На участках трубопроводов, где давление превышает 1,5 МПа, перед пожарным краном устанавливают редуцирующие устройства. Участки трубопровода шахтного водоотлива, используемые при подаче воды в пожарно-оросительную сеть, не оборудуются пожарными кранами.

Неустановившееся движение воды в напорных трубопроводах объединенной сети шахтного водоотлива и противопожарного водоснабжения вызывает формирование участков резкого изменения давления (гидравлический удар). Возникающие при росте или падении давления гидравлические удары приводят к развитию аварийных ситуаций за счет повреждений трубопроводов, насосных систем, соединительных элементов и арматуры.

В зависимости от условий прокладки трубопровода наиболее практичными и простыми в оборудовании являются следующие способы защиты от гидравлического удара:

- секционирование напорного трубопровода обратными клапанами (применяют для участков трубопровода небольшой протяженности, снижая силу гидравлического удара за счет сокращения длины его прохождения и уменьшения объема воды);

- защитные системы с гидравлическим диодом вихревого типа, которые снижают скорость потока воды благодаря своим конструктивным особенностям (используют в угольных шахтах с умеренной загрязненностью взвешенными веществами);

- оборудование обводной линии, позволяющее погасить энергию гидравлического удара за счет сброса воды в сливную канавку горной выработки.

Расчет гидравлических параметров противопожарного водоснабжения – трудоемкая задача, требующая учета многих факторов. Так, в реальных условиях подача воды осуществляется по наклонным выработкам, точный угол наклона которых не всегда указан, сети могут монтироваться из трубопроводов различных диаметров и т. д. Кроме того, отбор (подача) воды из пожарно-оросительной сети при пожаре может осуществляться в различных точках (пожарных кранах). При этом гидравлические параметры (напор и расход воды) конкретной точки отбора зависят от всех ранее задействованных. Поскольку не представляется возможным учесть степень открытия конечных и промежуточных точек отбора воды, а также местные сопротивления, расчет целесообразно осуществлять по упрощенной методике для одной точки отбора (подачи) воды.

Для расчета необходимы следующие исходные данные:

- параметры «защищаемых» выработок (функциональное назначение, сечение, степень огнестойкости и применяемые системы пожаротушения водой);
- протяженность и диаметры участков трубопровода;
- геодезические отметки подземных резервуаров воды, которые используют в качестве источника водоснабжения, а также всех узловых и конечных точек пожарно-оросительного трубопровода;

- величины расхода и напора воды на пожаротушение для каждой расчетной точки;
- характеристика применяемого оборудования (регулирующей арматуры и насосов).

Общий напор воды в расчетной точке H_p , м, определяем согласно формуле:

$$H_p = H_{\Pi} + H_c + H_d, \quad (1)$$

где H_{Π} – напор воды для преодоления сопротивления в поворотах трубопровода, м;
 H_c – напор воды для преодоления сопротивления по длине трубопровода, м;
 H_d – дополнительные значения напора воды, м, которые можно определить по формуле:

$$H_d = H_T + H_{ВВ} + H_H, \quad (2)$$

где H_T – разница геодезических отметок между точками подачи и отбора воды, м;
 $H_{ВВ}$ – высота горной выработки, м;
 H_H – требуемые значения напора воды для эффективной работы пожарного оборудования (пожарный ствол, установка для создания водяной завесы и т. п.), м.

Разницу геодезических отметок между точками подачи и отбора воды рассчитываем по формуле:

$$H_T = l_n \times \sin a, \quad (3)$$

где l_n – протяженность наклонной горной выработки, м;
 a – угол наклона горной выработки, градус.

Потерю давления воды по длине трубопровода определим по формуле:

$$H_c = k_M \times \sum_{i=1}^n A_i \times l_i \times Q^2, \quad (4)$$

где k_M – коэффициент, учитывающий потери давления на местные сопротивления и повороты, принимаем равным 1,1;

A_i – удельное гидравлическое сопротивление i -го участка трубопровода, определяем согласно таблице, $\text{с}^2/\text{м}^6$;

l_i – длина i -го участка трубопровода, м;

Q – нормативный расход воды для тушения пожара, $\text{м}^3/\text{с}$.

Подставим зависимости (2) – (4) в формулу (1) и получим общий вид выражения для определения напора воды в расчетной точке:

$$H_p = H_{\Pi} + k_M \times \sum_{i=1}^n A_i \times l_i \times Q^2 + l_n \times \sin a + H_{ВВ} + H_H. \quad (5)$$

Если при подаче возникают значительные потери напора воды на преодоление гидравлического сопротивления в трубопроводе, необходимо выполнить расчет по закольцованным системам трубопровода. При этом уменьшается гидравлическое сопротивление и увеличивается значение расхода и напора воды.

Таблица

Расчетные значения потерь напора воды на сопротивление для трубопроводов с диаметрами 100 мм, 150 мм и 200 мм

Длина трубопровода, м	Расход воды, м ³ /ч	Потери напора по длине трубопровода, м		
		Æ 100 мм	Æ 150 мм	Æ 200 мм
10	50	0,35	0,06	0,01
	80	0,9	0,16	0,04
	100	1,40	0,25	0,06
100	50	3,50	0,62	0,14
	80	8,97	1,59	0,36
	100	14,01	2,48	0,56
1000	50	35,00	6,20	1,40
	80	89,70	15,90	3,60
	100	140,10	24,80	5,60

Для определения сопротивления двух закольцованных между собой выработок используем формулу:

$$S_{\kappa} = \frac{S_1}{(1 + \sqrt{S_1/S_2})^2}, \quad (6)$$

где S_{κ} – сопротивление кольца трубопровода из двух ветвей, с²/м⁵;

S_1, S_2 – сопротивление ветвей кольца трубопровода, с²/м⁵.

Обеспечить необходимые расчетные гидравлические параметры при совместной работе шахтного водоотлива и противопожарного водоснабжения возможно только с применением насосного оборудования. Характеристику центробежного насоса определяют по формуле [9]:

$$H_{\text{нс}} = H_0 + A \times Q - B \times Q^2, \quad (7)$$

где $H_{\text{нс}}$ – напор воды, создаваемый центробежным насосом, м;

H_0 – напор воды при нулевом расходе воды, м;

A, B – постоянные коэффициенты, зависящие от типа насоса, 1.

При подаче с помощью центробежных насосов значения расхода и напора воды в точке потребления напрямую зависят от характеристики трубопровода.

Уравнение характеристики сети трубопроводов имеет вид:

$$H_{\text{xc}} = h_c + \sum_{i=1}^n A_i \times X_i \times Q^2, \quad (8)$$

где H_{xc} – напор воды в трубопроводе (в зависимости от характеристики сети), м;

h_c – необходимый напор воды в точке отбора, м.

Рабочие параметры центробежного насоса можно определить по совмещенным графикам характеристик насоса и сети трубопроводов [7, 8]. Рабочей точкой является

пересечение кривых характеристик, по которой определяют напор, расход, потребляемую электрическую мощность и коэффициент полезного действия центробежного насоса при подаче в сеть трубопроводов заданной длины и с определенным диаметром. Следует учитывать, что при изменении расхода воды в процессе работы центробежного насоса рабочая точка тоже смещается.

В случае необходимости увеличения расхода воды, центробежные насосы объединяют в единую систему по параллельной схеме подключения. Для определения рабочих параметров параллельно соединенных насосов необходимо на одном графике совместить характеристику насосов и характеристику сети трубопроводов. Построение характеристики параллельной работы нескольких насосов осуществляют путем сложения подач этих насосов при одинаковых напорах. Таким образом, главным ограничением по объединению насосов в параллельную схему является разница в значениях развиваемых напоров.

Для нахождения рабочей точки при работе двух одинаковых насосов необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} H_{nc} = H_0 + 2A \times Q - 4B \times Q^2 \\ H_{xc} = h_c + 4 \sum_{i=1}^n A_i \times Q^2 \end{cases}, \quad (9)$$

в соответствии с которой значение расхода воды определяют согласно:

$$\begin{cases} Q = \frac{2A + \sqrt{4A^2 - 16B \times (H_0 - H_{nc})}}{8B} \\ H_{xc} = h_c + 4 \sum_{i=1}^n A_i \times Q^2 \end{cases}. \quad (10)$$

Для насосов с разными подачами воды выражение (10) имеет вид:

$$\begin{cases} Q = \frac{2A_1 + \sqrt{4A_1^2 - 16B_1 \times (H_0 - H_{nc})}}{8B_1} + \frac{2A_2 + \sqrt{4A_2^2 - 16B_2 \times (H_0 - H_{nc})}}{8B_2} \\ H_{xc} = h_c + 4 \sum_{i=1}^n A_i \times Q^2 \end{cases}. \quad (11)$$

Если подставить значение расхода воды из первого уравнения системы (11) во второе, то получим зависимость для определения напора воды:

$$H_{xc} = h_c + 4 \sum_{i=1}^n A_i \times \frac{(2A + \sqrt{4A^2 - 16B \times (H_0 - H_{nc})})^2}{64B^2}. \quad (12)$$

Преобразуем зависимость (12) относительно параметра H_{nc} и, подставив его в первое уравнение системы (10), получим значения рабочих параметров параллельно объединенных насосов.

При тушении пожаров активным способом используют пожарные рукава, присоединяемые к пожарным кранам пожарно-оросительного трубопровода. При поломке пожарных кранов, установленных на действующем пожарно-оросительном трубопроводе, длина прокладки рукавных линий значительно

возрастает. Так, для горизонтальных выработок расстояние между пожарными кранами составляет 200 м, а в случае поломки одного из промежуточных и невозможности подойти к очагу пожара с обоих концов выработки, увеличивается до 400 м. Поэтому для обеспечения расчетных значений расхода и напора учитывают потери в пожарных рукавах.

На величину напора у пожарного ствола влияют величины напора воды в точке подключения рукавной линии к трубопроводу (либо насосному оборудованию), параметры рукавной линии (диаметр и гидравлическое сопротивление внутренней поверхности пожарного рукава), количество головок соединительных пожарных, разность геодезических отметок начальной и конечной точек, диаметр ручного пожарного ствола, местные сопротивления.

Для обеспечения требуемого напора воды в точке подключения пожарных рукавов необходимо выполнение следующего неравенства:

$$0 \leq H_{\text{тп}} - 1,05k_{\text{пр}}l_{\text{р}}Q_{\text{р}}^2 + l_{\text{ур}}\sin b - l_{\text{пр}}\sin c - H_{\text{пс}} - H_{\text{гс}} < H_{\text{рд}}, \quad (13)$$

где $H_{\text{тп}}$ – напор воды в точке подключения рукавной линии, м;

$k_{\text{пр}}$ – удельное сопротивление пожарных рукавов, $(\text{с}/\text{дм}^3)^2$;

$l_{\text{р}}$ – длина рукавной линии, м;

$Q_{\text{р}}$ – расход воды по рукавной линии, $\text{дм}^3/\text{с}$;

$l_{\text{ур}}$ – длина рукавной линии, проложенной по уклону горной выработки, м;

b – угол уклона горной выработки, градус;

$l_{\text{пр}}$ – длина рукавной линии, проложенной по подъему выработки, м;

c – угол положительного наклона горной выработки, градус;

$H_{\text{пс}}$ – напор воды перед пожарным стволом, обеспечивающий дальность полета струи с учетом сопротивления ручного пожарного ствола, м;

$H_{\text{гс}}$ – напор воды для преодоления сопротивления головок соединительных пожарных, м. Указанным значением можно пренебречь при прокладке линий на небольшие расстояния;

$H_{\text{рд}}$ – напор воды, приводящий к разрыву пожарного рукава, м.

Неравенство (13) не выполняется в следующих случаях:

– напор воды в точке подключения меньше необходимого для преодоления гидравлического сопротивления по всей длине рукавной линии;

– напор воды в точке подключения недостаточный для преодоления подъема горной выработки и обеспечения необходимых параметров струи для пожарного ствола;

– рукавная линия проложена на значительную длину по уклонной горной выработке, что приводит к нарастанию давления воды;

– напор воды в точке подключения превышает разрывное давление пожарных рукавов.

Недостаток давления воды в точке подключения можно компенсировать прокладкой рукавов в две или более параллельных линий. Расчет напора воды, $H_{\text{пс}}$, м, для параллельной схемы соединения пожарных рукавов от единой точки подключения с последующим соединением ветвей на один пожарный ствол выполняют по формуле:

$$H_{\text{пс}} = \mathop{\mathbf{a}}_{i=1}^n \left(Q_{i_{\text{р}}} \sqrt{k_{i_{\text{р}}} \lambda_{i_{\text{р}}}} \right)^2, \quad (14)$$

где Q_{ip} – расход воды по i -й параллельной рукавной линии, $\text{дм}^3/\text{с}$;
 k_{ip} – удельное сопротивление i -й параллельной рукавной линии, $(\text{с}/\text{дм}^3)^2$;
 l_{ip} – протяженность i -й параллельной рукавной линии, м;
 n – количество параллельных линий, 1.

При прокладке в параллельных линиях пожарных рукавов одного диаметра удельные гидравлические сопротивления в них будут равны между собой ($k_1 = k_2 = \dots = k_n = k_{\text{п}}$) и формула (14) примет вид:

$$H_{\text{пс}} = nQ^2 k_{\text{п}} l_{\text{пп}}, \quad (15)$$

где $l_{\text{пп}}$ – протяженность всех параллельных ветвей рукавной линии, м.

Использование параллельной схемы прокладки пожарных рукавов приводит к увеличению их количества в два раза. Для определения оптимального количества рукавов при параллельном соединении перепишем неравенство (13) в следующем виде:

$$0 \leq H_{\text{тп}} - 1,05Q^2(k_{\text{пс}} l_{\text{пс}} - nQ^2 k_{\text{п}} l_{\text{пп}}) + l_{\text{уп}} \sin b - l_{\text{пр}} \sin c - H_{\text{пс}} - H_{\text{гс}} < H_{\text{рд}}, \quad (16)$$

где $k_{\text{пс}}$ – гидравлическое сопротивление участка пожарного рукава при последовательном соединении, $(\text{с}/\text{дм}^3)^2$;

$l_{\text{пс}}$ – протяженность участка рукавной линии при последовательном соединении, м.

Приравнявая к нулю среднюю часть неравенства (16), определяем длину линии пожарных рукавов, проложенных по параллельной схеме подключения:

$$l_{\text{пп}} = \frac{(1,05Q^2 k_{\text{пс}} l_{\text{пс}} - H_{\text{тп}} - l_{\text{уп}} \sin b + l_{\text{пр}} \sin c + H_{\text{пс}} + H_{\text{гс}})}{1,05nQ^2 k_{\text{п}}}. \quad (17)$$

Расход и напор воды следует принимать исходя из значений для самой удаленной или наиболее высоко расположенной расчетной точки защищаемого участка пожарно-оросительного трубопровода.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Процессы, протекающие при совместной работе шахтного водоотлива и противопожарного водоснабжения, представляют собой сложное сочетание различных гидравлических параметров. Одновременно необходимо учитывать возможность гидравлического удара [10], возникновения разрыва струи, особенности совместной работы насосного оборудования и большой протяженности сети шахтных пожарно-оросительных трубопроводов.

Кроме того, из-за ведения горных работ на нескольких горизонтах, существует большая вариативность маршрутов подачи воды. Выбор того или иного варианта определяют исходя из горно-геологических условий, обеспечения нормативных значений давления и расхода воды в пожарных кранах.

Указанные особенности учитывают при расчете гидравлических параметров объединенной сети шахтного водоотлива и противопожарного водоснабжения.

Список литературы / References

1. Федоренко, Е. И. Проблема подземных пожаров и их тушение на больших глубинах в угольных шахтах / Е. И. Федоренко, С. С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. – 2011. – № 8. – С. 197–207.

Fedorenko, E. I., Kobylkin, S. S. *Problema podzemnykh pozharov i ikh tushenie na bolshikh glubinakh v ugolnykh shakhtakh* [The problem of underground fires and their extinguishing at great depths in coal mines]. Mining information and Analytical Bulletin, 2011, no. 8, pp. 197-207. (In Russian)

2. Противопожарная защита угольных шахт: Сборник документов. Серия 5. Вып. 1 / А. И. Субботин [и др.]. – М. : Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 144 с.

Subbotin, A. I., Chigrin, V. D., Gusev, E. I., Obidov, S. V., Shalaev, V. S., Vinogradov, I. N., Krylov, V. A., Pecherkin, A. S. *Protivopozharnaya zashchita ugolnykh shakht* [Fire protection of coal mines: A collection of documents]. State Unitary Enterprise Scientific and Technical Center for Industrial Safety of Gosgortekhnadzor of Russia Publ., 2002, 144 p. (In Russian)

3. Гусев, Н. Н. Эколого-экономическая оценка вовлечения шахтных вод в хозяйственный оборот / Н. Н. Гусев // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. – 2010. – № 7. – С. 245–248.

Gusev, N. N. *Ekologo-ekonomicheskaya ocenka вовlecheniya shakhtnykh vod v hozyajstvennyy oborot* [Ecological and economic assessment of the involvement of mine waters in economic turnover]. Mining information and analytical Bulletin, 2010, no. 7, pp. 245-248. (In Russian)

4. Лунева, О.В. Решение проблемы деминерализации шахтных вод – альтернативный подход / О. В. Лунева // Молодежное поколение в науке без границ: материалы VI научно-практической конференции в рамках молодежного научного форума. – Донецк, 2012. – С. 96–100.

Luneva, O. V. *Reshenie problemy demineralizacii shakhtnykh vod – alternativnyy podkhod* [Solving the problem of demineralization of mine waters is an alternative approach]. Youth generation in science without borders: proceedings of the VI scientific and practical conference within the framework of the Youth scientific forum, Donetsk, 2012, pp. 96-100. (In Russian)

5. Высоцкий, С. П. Комбинированный процесс микрофльтрации и обратного осмоса для очистки шахтных вод / С. П. Высоцкий, А. А. Печенога // Вести автомобильно-дорожного института. – 2020. – № 2 (33). – С. 62–67.

Vysockiy, S. P., Pechenoga, A. A. *Kombinirovanny process mikrofiltracii i obratnogo osmosa dlya ochistki shakhtnykh vod* [Combined microfiltration and reverse osmosis process for mine water purification]. Vesti Automobile and Road Institute, 2020, no. 2 (33), pp. 62-67. (In Russian)

6. Бурдова, М. Г. Методические положения расчета конструктивных параметров фильтра- дезинфектанта для системы очистки шахтных подземных вод / М. Г. Бурдова, В. В. Левковская // Известия Тульского государственного университета. – 2018. – № 1. – С. 3–11.

Burdova, M. G., Levkovskaya, V. V. *Metodicheskie polozheniya rascheta konstruktivnykh parametrov fil'tra-dezinfektanta dlya sistemy ochistki shakhtnykh podzemnykh vod* [Methodological provisions for calculating the design parameters of a disinfectant filter for a mine groundwater treatment system]. Proceedings of Tula State University, 2018, no. 1, pp. 3-11. (In Russian)

7. Об использовании системы водоотлива для тушения пожаров в угольных шахтах при ведении горноспасательных работ / А. В. Агарков [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса: сборник научных трудов 11-й Международной научно-практической конференции. – Донецк : ДонНТУ, 2025. – Т. 1. – С. 13–18.

Agarkov, A. V., Kavera, A. L., Polituchiy, D. A., Buryak, D. S., Moskvina, I. I., Vetkina, V. V. *Ob ispolzovanii sistemy vodootliva dlya tusheniya pozharov v ugolnykh shakhtakh pri vedenii gornospasatelnykh rabot* [On the use of a drainage system for extinguishing fires in coal mines during mining rescue operations]. Innovative perspectives of Donbass: collection of scientific papers of the 11th International Scientific and Practical Conference. Donetsk: DonNTU Publ., 2025, no. 1, pp. 13-18. (In Russian)

8. Буряк, Д. С. Использование шахтного водоотлива для противопожарного водоснабжения / Д. С. Буряк, А. В. Осадчий, Г. Н. Земляк // Проблемы техносферной безопасности. Ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций: сборник материалов I Научно-практической конференции с международным участием. – Донецк: ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России», 2025. – С. 21–22.

Buryak, D. S., Osadchiy, A. V., Zemlyak, G. N. *Ispolzovanie shakhtnogo vodootliva dlya protivopozharnogo vodosnabzheniya* [The use of mine drainage for fire-fighting water supply]. Problems of technosphere safety. Elimination of consequences of emergency situations: collection of materials of the First Scientific and Practical conference with international participation. Donetsk FSI NII «Respirator» EMERCOM of Russia Publ., 2025, pp. 21-22. (In Russian)

9. Бойко, Е. Г. Причины нерациональной работы насосных установок горно-металлургического комплекса и пути их решения / Е. Г. Бойко, Ю. Г. Осадчук // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. – 2006. – № 10. – С. 319–323.

Boyko, E. G., Osadchuk, Yu. G. *Prichiny neratsionalnoy raboty nasosnykh ustanovok gorno-metallurgicheskogo kompleksa i puti ikh resheniya* [The reasons for the irrational operation of pumping units of the mining and metallurgical complex and ways to solve them]. Mining Information and Analytical Bulletin: Scientific and Technical Journal, 2006, no. 10, pp. 319-323. (In Russian)

10. Калиниченко, Р. А. Способы защиты трубопровода от последствий гидравлического удара / Р. А. Калиниченко // Международный академический вестник. – 2018. – № 5(25). – С. 65–68.

Kalinichenko, R. A. *Sposoby zashchity truboprovoda ot posledstvij gidravlicheskogo udara* [Ways to protect pipelines from the effects of hydraulic shock]. International Academic Bulletin, 2018, № 5(25), pp. 65-68. (In Russian)

*Дата поступления рукописи 30.12.2025
Рекомендована к публикации канд. техн. наук А. В. Маевроди*

*Aleksandr Vladislavovich Agarkov, Cand. of Tech. Sci., Deputy Head of the Institute;
e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru*

Dmitry Alekseevich Polituchy, Head of Department; e-mail: poletuchi@mail.ru

Dmitry Sergeevich Buryak, Senior Researcher; e-mail: buryak_ds@mail.ru

Daria Fyodorovna Balta, Senior Researcher; e-mail: balta_darya@mail.ru

*Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artyoma St., 157, Phone: +7 (856) 252-78-39*

PROVISION OF STANDARD HYDRAULIC PARAMETERS OF FIRE-FIGHTING WATER SUPPLY USING MINE DRAINAGE

Purpose. Study of hydraulic processes in the joint operation of mine drainage and fire-fighting water supply to determine at the design points of the fire and irrigation pipeline the required water consumption for firefighting and the amount of hydraulic pressure.

Methods. An analytical method has been applied to study the unsteady movement of water in a network of pipelines with a variable cross-section using fundamental hydrodynamic laws, with the results processed using application computer software packages.

Results. Dependences have been obtained that make it possible to determine the flow rate and pressure of water at the points of water extraction for firefighting during the joint operation of the mine drainage and the fire-fighting water supply network of mine workings.

Scientific novelty. A method has been developed for calculating hydraulic parameters in the joint operation of mine drainage and firewater supply, which differs from the known methods by taking into account the parameters of the hydraulic equipment used, as well as the characteristics of the mine pipeline network.

Practical value. The research results will improve the effectiveness of fire extinguishing in mines using two water supply systems (a fire-fighting system and a drainage system).

Keywords: coal mine; emergency fire area; mine workings; underground fires of exogenous and endogenous origin; mine drainage; fire-fighting water supply; hydraulic calculation.

For citation. Agarkov A. V., Polituchiy D. A., Buryak D. S., Balta D. F. Provision of standard hydraulic parameters of fire-fighting water supply using mine drainage. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 73-82. EDN ZGERQJ

УДК [614.8.084"363":623.746.4-519]:614.842.84

Валерий Владимирович Ключ, канд. пед. наук, доц.; e-mail: val-1964@yandex.ru

Шамиль Абубакарович Османов, нач. отдела; e-mail: 0091115@mail.ru

Дмитрий Евгеньевич Завьялов, канд. техн. наук, доц.; e-mail: ZavialovD.E@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы

Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны,

чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева»

196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 149. Тел.: +7 (812) 645-20-34

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ ПОЖАРНЫХ ЧАСТЕЙ ОТ АТАК С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Цель. Повышение защищенности и выявление положительных практик применения средств защиты пожарных частей от атак с применением беспилотных авиационных систем, а также разработка рекомендаций по обеспечению необходимого уровня оперативной готовности подразделений пожарной охраны.

Методы. Использованы публикации из отечественных (E-library) и зарубежных (Scholar Google Academy) баз данных научных исследований, а также опыт Специальной военной операции в части применения средств защиты техники от атак с применением беспилотных авиационных систем. В качестве методов исследования были использованы критический и сравнительный анализ.

Результаты. Получена сравнительная оценка способов защиты пожарных частей от атак с применением беспилотных авиационных систем. Выявлены положительные практики применения таких средств и выделены наиболее эффективные из них. Разработаны рекомендации по их применению в зависимости от сложившейся обстановки.

Научная новизна. Разработаны четыре варианта защиты пожарных частей от атак беспилотных авиационных систем, а именно: защита окон и ворот, защита на каркасе, локальная и комбинированная (полная) защита, проведен их сравнительный анализ по критерию стоимости, уровню защиты и сложности монтажа.

Практическая значимость. Представленные варианты защиты пожарных частей от атак с применением беспилотных авиационных систем позволяют повысить уровень защищенности объектов пожарно-спасательного гарнизона, сохранить оперативность реагирования подразделений на высоком уровне и минимизировать величину материального и социального ущерба.

Ключевые слова: анализ; способ; защита; пожарная часть; атака; применение; беспилотные авиационные системы; БАС; БПЛА; Специальная военная операция; СВО.

Для цитирования: Ключ В. В., Османов Ш. А., Завьялов Д. Е. Анализ способов защиты пожарных частей от атак с применением беспилотных авиационных систем // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 83–91. – EDN VXMOEV

Постановка проблемы. Сложившаяся геополитическая ситуация и активное применение беспилотных авиационных систем (БАС, БПЛА) для нанесения ударов, в том числе и по тылу противника, приводит к увеличению числа пожаров, аварий и чрезвычайных ситуаций (ЧС) на ключевых объектах инфраструктуры, а также в приграничных районах государства. Реагирование и ликвидации последствий от атак с применением БАС осуществляется силами и средствами Единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС, при этом основной единицей техники, задействованной в данной ситуации, выступает пожарный автомобиль. На текущий момент участились случаи повторных ударов по пожарной технике при ликвидации последствий ЧС, тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ, а также по пунктам постоянной

дислокации и в процессе следования к месту аварии. В связи с этим возникает необходимость применения технических и радиоэлектронных средств защиты пожарной техники от атак с применением БАС. Актуальность статьи обусловлена активным развитием беспилотной авиации и проведением Специальной военной операции (СВО).

Вопросы применения радиоэлектронной борьбы (РЭБ) в рамках настоящей статьи не рассматривались, поскольку организацию связи при пожаре на текущий момент осуществляют с применением радиосвязи, а применение РЭБ без использования соответствующих технических средств парализует процесс управления силами и средствами. Данный аспект является перспективным направлением дальнейших исследований.

Анализ последних исследований. Анализ научных исследований, посвященных вопросам способов защиты объектов от атак с применением БАС показал, что подавляющее большинство из них посвящено разработке методов защиты объектов производственной и социальной инфраструктуры [1], государственных объектов [2], военной [3] и бронетанковой [4] техники в условиях СВО, потенциально опасных объектов [5], объектов органов внутренних дел [6] и других сооружений [7, 8]. При этом в качестве основных средств защиты предлагается использовать всевозможные ограждающие конструкции [9], как правило выполненные из металлических сеток [10], а также иные средства пассивной защиты [11, 12] и организационные мероприятия [13]. Проанализирована целесообразность применения БАС при тушении пожаров и ликвидации аварий на объектах защиты [14], однако с учётом активно развивающейся сферы беспилотной авиации целесообразно применение комплексных и многоуровневых систем защиты объектов [15].

Исследования зарубежных авторов направлены на внедрение технологий искусственного интеллекта в системы защиты от атак с применением средств беспилотной авиации [16, 17], а также посвящены анализу различных средств пассивной защиты [18, 19].

Цель исследования – повышение защищенности и выявление положительных практик применения средств защиты пожарных частей от атак с применением беспилотных авиационных систем, а также разработка рекомендаций по обеспечению необходимого уровня оперативной готовности подразделений пожарной охраны.

Для этого решен ряд более частных задач, а именно:

- проведен анализ научных исследований, посвященных вопросам защиты пожарной техники от атак БПЛА;
- исследованы средства защиты военной техники в зоне проведения СВО;
- выявлены положительные практики технических средств защиты, показавшие свою эффективность при их применении;
- разработаны рекомендации по применению средств защиты в зависимости от сложившейся обстановки.

Материалы и методы исследований. Использованы публикации отечественных (E-library) и зарубежных (Scholar Google Academy) баз данных научных исследований. Также изучен опыт защиты военной техники, опорных и командных пунктов при проведении СВО. В качестве методов исследования использованы основные положения теории системного анализа, а также критический анализ научных публикаций.

Результаты исследований. В ходе исследования проведен комплексный анализ современных и перспективных способов защиты пожарных частей от атак с применением БАС. Полученные результаты позволили систематизировать угрозы и осуществить оценку различных способов противодействия им.

На первоначальном этапе выделены потенциальные риски для пожарных частей от атак с применением БАС.

Разведывательная деятельность. Использование БАС позволяет получить информацию о количестве техники и личного состава, стоящего на вооружении, а также о распорядке дня подразделения и частоте выезда на происшествия, которая может быть использована для подготовки различного рода атак, а также анализа тактических возможностей подразделений.

Доставка снарядов и зажигательных смесей. В данном случае БАС фактически является высокоточным оружием, применение которого может нанести большой социальный и материальный ущерб пожарной части, а также снизить общий уровень оперативной готовности спасательных служб.

Провокационная деятельность и срыв оперативной работы. На текущий момент появление БАС в зоне прямой видимости (или звук его работающих пропеллеров) наводит небеспопеченную панику на личный состав и вынуждает перемещаться в укрытие, прекращая ведение аварийно-спасательных и других неотложных работ.

Наибольшую опасность представляют компактные БАС мультикоптерного типа, обладающие возможностью доставки грузов массой в несколько килограммов на большие расстояния, способные зависать на одном месте и маневрировать на малых высотах.

При атаках с применением БАС, оборудованных взрывными элементами, существует большая вероятность уничтожения спасательной техники, личного состава и общей инфраструктуры пожарной части. В связи с этим, первоочередные усилия по её защите необходимо осуществлять в данном направлении. Анализ опыта защиты военной техники, командных и опорных пунктов во время СВО показал, что наиболее эффективными средствами являются так называемые «сетки», «мангалы» и «заборы». Фактически данные конструкции защиты представляют собой металлические сетки на каркасе, при встрече с которыми БАС разрушается, а снаряд детонирует на удаленном расстоянии от защищаемого объекта, что позволяет в значительной мере снизить величину нанесенного ущерба.

С учетом этого в рамках статьи было выделено четыре основных направления защиты пожарных частей от атак с применением БАС. Наиболее простой и достаточно эффективный способ – это защита окон и ворот пожарной части с помощью металлической сетки. В данной конфигурации основная защитная функция личного состава и техники возложена на несущие стены здания, а размещение металлической сетки на окнах и входе направлено на защиту от проникновения БАС внутрь помещения и снижения возможных последствий при детонировании расположенного на нём заряда (рис. 1).

Однако такой способ защиты затрудняет вход и выход личного состава из здания пожарной части, а также выезд техники. В связи с этим, при атаке с применением БПЛА с определённого направления ввиду того, что с другой стороны расположены другие здания или иной рельеф местности, допускается применение локальной защиты пожарной части (рис. 2). Данный вариант лишён недостатков

предыдущего способа защиты, однако существует вероятность проникновения БАС внутрь здания. При детонировании расположенного на нём заряда существенно возрастает величина нанесённого социального и материального ущерба.

Этих недостатков лишён вариант защиты пожарной части на каркасе. Фактически сетка выступает в качестве защитного купола здания, личного состава и техники. Однако наряду с надёжностью одновременно увеличивается сложность создания такого варианта защиты пожарной части (рис. 3). При том, что он несущественно затрудняет вход и выход личного состава из здания пожарной части, а также выезд техники, по своим защитным качествам этот вариант превосходит рассмотренные выше.

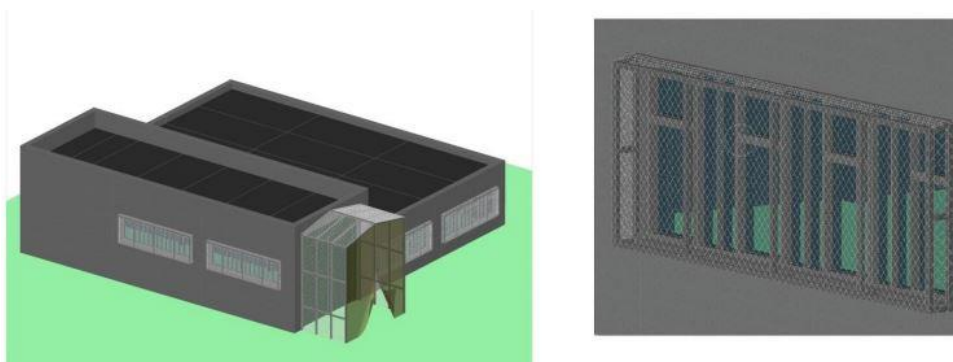


Рис. 1. Вариант защиты окон и ворот пожарной части от атак с применением БАС

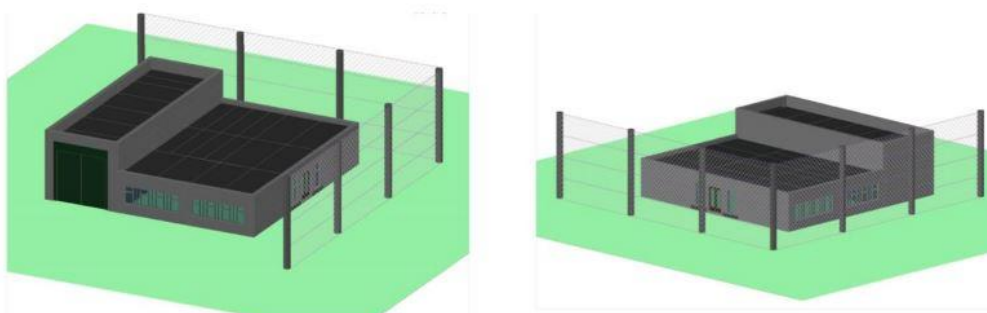


Рис. 2. Вариант локальной защиты пожарной части от атак с применением БАС

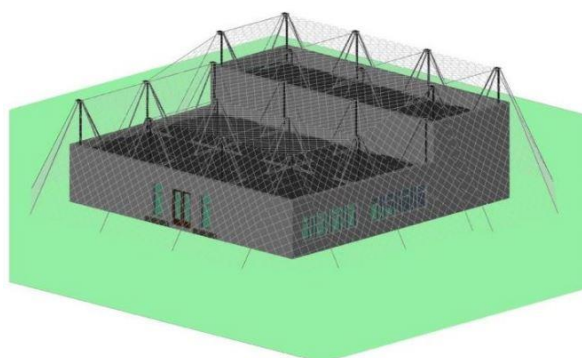


Рис. 3. Вариант защиты пожарной части на каркасе от атак с применением БАС

Объединив вариант защиты пожарной части на каркасе с вариантом ее локальной защиты, был разработан вариант комбинированной (полной) защиты пожарной части (рис. 4).

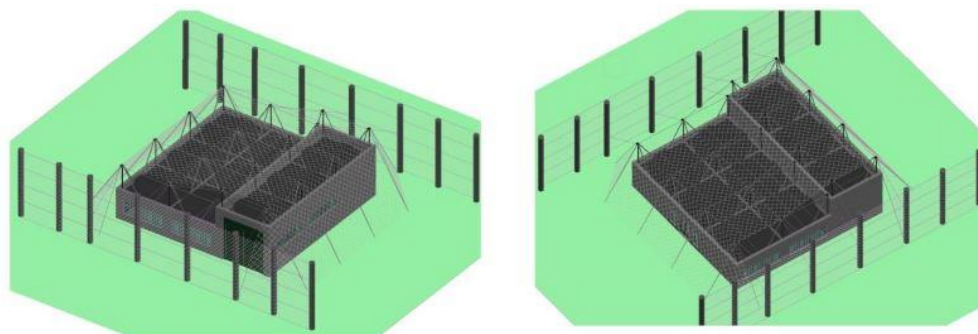


Рис. 4. Вариант комбинированной (полной) защиты пожарной части от атак с применением БАС

Значительным преимуществом комбинированного варианта защиты пожарной части является его способность противостоять серии нападений с применением БАС. Вариант комбинированной (полной) защиты пожарной части обладает наивысшей (из рассмотренных) степенью защиты от атак с применением БАС. Однако его использование увеличивает время выезда пожарных автомобилей на вызовы из-за необходимости открытия и закрытия ворот в сетке. Каждый рассмотренный вариант защиты пожарной части от атак БПЛА имеет свои преимущества и недостатки. В таблице представлены результаты сравнительного анализа вариантов защиты пожарной части от атак с применением БАС по критерию стоимости, сложности монтажа [20] и надежности защиты [20].

Таблица

Результаты сравнительного анализа вариантов защиты пожарной части от атак с применением БАС

Вариант защиты ПЧ	Ориентировочная стоимость, тыс. руб.	Сложность монтажа, %	Надежность защиты, %
Защита окон и ворот	165,00	35	25
Локальная защита	200,00	40	30
Защита на каркасе	300,00	65	95
Комбинированная (полная) защита	465,00	95	99

По результатам сравнительного анализа вариантов защиты пожарной части от атак с применением БАС установлено, что наибольшей степенью защиты обладает комбинированный (полный) вариант, однако он имеет наибольшую стоимость и сложен при монтаже. По критерию стоимости, сложности монтажа и надёжности ему противоположен вариант защиты окон и ворот пожарной части, усреднённые варианты – локальная защита и защита на каркасе.

Вывод. Активное развитие средств беспилотной авиации влечет за собой повышение количества атак с применением БАС по объектам критической инфраструктуры. Один из проблемных вопросов – атаки по пожарным частям с применением БАС, что влечет соответствующую разработку средств защиты от таких атак.

В результате исследования разработаны четыре варианта защиты пожарных частей от атак беспилотных авиационных систем, а именно: защита окон и ворот,

защита на каркасе, локальная, комбинированная (полная), проведен их сравнительный анализ по критериям стоимости, уровня защиты и сложности монтажа. Представленные варианты защиты пожарных частей от атак с применением БАС позволяют повысить уровень защищенности зданий пожарных частей, техники и личного состава, находящихся в них. Это позволяет сохранять необходимый уровень оперативной готовности подразделений пожарной охраны, а также минимизировать величину материального и социального ущерба при атаках с применением БАС.

Список литературы/ References

1. Третьяков, А. А. Основные направления и методы защиты производственной и социальной инфраструктуры от беспилотных авиационных систем / А. А. Третьяков, В. А. Демьянов, Е. А. Нагорный // Рефлексия. – 2024. – № 6. – С. 75–77. – EDN YMBFCN

Tretyakov, A. A., Demyanov, V. A., Nagorny, E. A. *Osnovnyye napravleniya i metody zashhity proizvodstvennoy socialnoy infrastruktury ot bespilotnykh aviacionnykh sistem* [Main directions and methods of protecting industrial and social spheres from unmanned aerial systems]. Reflection, 2024, no. 6, pp. 75-77. (In Russian)

2. Обоснование одного из способов защиты важных государственных объектов от ударов беспилотных летательных аппаратов / М. Ю. Захаров [и др.] // Наука и военная безопасность. – 2023. – № 2(33). – С. 110–115.

Zakharov, M. Yu., Tikhonov, S. V., Anikeev, M. V., Ryzhovtsev, A. S., Ivlev, D.A. *Obosnovanie odnogo iz sposobov zashhity vazhnykh gosudarstvennykh obektov ot udarov bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Justification of one of the methods for protecting important government facilities from drone strikes]. Science and military security, 2023, no. 2 (33), pp. 110-115. (In Russian)

3. Грязнов, А. С. Динамика применения беспилотных летательных аппаратов и методы защиты военной техники в условиях специальной военной операции / А. С. Грязнов, А. Н. Щербо, В. Н. Деянышев // Наука и военная безопасность. – 2025. – № 1 (40). – С. 57–59.

Gryaznov, A. S., Shcherbo, A. N., Deyanyshev, V. N. *Dinamika primeneniya bespilotnykh letatelnykh apparatov i metody zashhity voennoy tekhniki v usloviyakh specialnoj voennoy operacii* [Dynamics of the use of unmanned aerial vehicles and methods of protecting military equipment in special military operations]. Science and military security, 2025, no. 1 (40). pp. 57-59. DOI 10.25257/FE.2021.4.45-49. (In Russian)

4. Андрющенко, М. С. Направления совершенствования защиты бронетанковой техники от беспилотных летательных аппаратов / М. С. Андрющенко, А. М. Голик, В. И. Евдокимов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2025. – № 2 (137). – С. 113–117. – DOI 10.53816/20753608_2025_2_113.

Andryushchenko, M. S., Golik, A. M., Evdokimov, V. I. *Napravleniya sovershenstvovaniya zashhity bronetankovoy tekhniki ot bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Directions for improving the protection of armored vehicles from unmanned aerial vehicles]. Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, 2025, no. 2 (137). pp. 113-117. DOI 10.54234/CST.19968493.2021.18.1.67.5.27. (In Russian)

5. Маринин, А. В. Средства защиты потенциально опасных объектов от атак беспилотных летательных аппаратов / А. В. Маринин, П. Н. Агунькин, Л. А. Маринина // Военное обозрение. – 2024. – № 2 (20). – С. 21–26.

Marinin, A. V., Agunkin, P. N., Marinina, L. A. *Sredstva zashhity potencialno opasnykh obektov ot atak bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Means of protecting potentially dangerous objects from attacks by unmanned aerial vehicles]. Military Review, 2024, no. 2 (20). pp. 21-26. (In Russian)

6. Журавлев, А. С. К вопросу об охране объектов органов внутренних дел от беспилотных летательных аппаратов / А. С. Журавлев, Г. А. Рукавишников // Вестник Барнаульского юридического института МВД России. – 2024. – № 2 (47). – С. 89–92.

Zhuravlev, A. S., Rukavishnikova, G. A. *K voprosu ob okhrane obektov organov vnutrennikh del ot bespilotnykh letatelnykh apparatov* [On the issue of protecting internal affairs agencies' facilities from unmanned aerial vehicles]. Bulletin of the Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2024, no. 2 (47). pp. 89-92. (In Russian)

7. Толстых, О. В. Обеспечение безопасности объекта от угрозы беспилотных воздушных судов / О. В. Толстых // Охрана, безопасность, связь. – 2025. – № 10-1. – С. 59–61.

Tolstykh O. V. *Obespechenie bezopasnosti obekta ot ugrozy bespilotnykh vozdushnykh sudov* [Ensuring the safety of a facility from the threat of unmanned aerial vehicles]. Security, safety, communications, 2025, no. 10-1, pp. 59-61. (In Russian)

8. Куликова, Е. В. Об организации защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов / Е. В. Куликова, Д. Ю. Таланов // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2024. – № 33-2. – С. 21–26.

Kulikova, E. V., Talanov, D. Yu. *Ob organizacii zashhity obektov ot bespilotnykh letatelnykh apparatov* [On the organization of protection of objects from unmanned aerial vehicles] Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Security Systems», 2024, no. 33-2. pp. 21-25. DOI 10.54234 / CST.19968493.2018.15.1.55.10.60. (In Russian)

9. Габова, В. В. Исследование и разработка методологии проектирования защитных ограждающих конструкций от беспилотных летательных аппаратов / В. В. Габова, Е. С. Мельникова, А. А. Чураков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2025. – № 1(98). – С. 28–37. – DOI 10.35211/18154360_2025_1_28.

Gabova, V. V., Melnikova, E. S., Churakov, A. A. *Issledovanie i razrabotka metodologii proektirovaniya zashhitnykh ograzhdayushhix konstrukciy ot bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Research and development of a methodology for designing protective enclosing structures against unmanned aerial vehicles]. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture, 2025, no. 1(98), pp. 28-37. DOI 10.25257/FE.2024.1.78-85. (In Russian)

10. Защитные ограждающие конструкции из сеток от беспилотных воздушных судов / А. В. Сафонов, М. А. Щелкунова, К. А. Агеева, С. А. Молчанов // Технологии гражданской безопасности. – 2025. – Т. 22, № 1(83). – С. 76–84.

Safonov, A. V., Shchelkunova, M. A., Ageeva, K. A., Molchanov, S. A. *Zashhitnye ograzhdayushhie konstrukcii iz setok ot bespilotnykh vozdushnykh sudov* [Protective fencing structures made of mesh against unmanned aerial vehicles]. Civil security technologies, 2025, vol. 22, no. 1 (83), pp. 76-84. (In Russian)

11. Зинченко, Д. С. Анализ средств и способов пассивной защиты от атак беспилотных воздушных судов в условиях проведения специальной военной операции / Д. С. Зинченко, Р. Е. Афонин // Проблемы правоохранительной деятельности. – 2024. – № 4(58). – С. 56–64.

Zinchenko, D. S., Afonin, R. E. *Analiz sredstv i sposobov passivnoy zashhity ot atak bespilotnykh vozdushnykh sudov v usloviyakh provedeniya specialnoy voennoy operacii* [Analysis of means and methods of passive defense against attacks by unmanned aerial vehicles in the context of a special military operation]. Problems of law enforcement, 2024, no. 4(58), pp. 56-64. (In Russian)

12. Гречаный, С. А. Особенности применения средств физического противодействия на объектах охраны / С. А. Гречаный // Охрана, безопасность, связь. – 2025. – № 10-1. – С. 17–20.

Grechany, S. A. *Osobennosti primeneniya sredstv fizicheskogo protivodejstviya na obektakh okhrany* [Features of the use of physical countermeasures at security facilities]. Security, safety, communications, 2025, no. 10-1, pp. 17-20. (In Russian)

13. Андриященко, М. С. Подходы к организации противодействия беспилотным летательным аппаратам / М. С. Андриященко, А. М. Голик, С. А. Сахнов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2023. – № 1(126). – С. 15–21.

Andryushchenko, M. S., Golik, A. M., Sakhno, S. A. *Issledovanie zakonmernostey raboty podrazdeleniy MChS v usloviyakh voennogo konflikta* [Approaches to organizing counteraction to unmanned aerial vehicles]. Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, 2023, no. 1 (126), pp. 15-21. (In Russian)

14. Целесообразность применения беспилотных авиационных систем при тушении пожаров и ликвидации аварий на объектах защиты / А. А. Карапузиков, М. В. Дьяков, А. С. Горелик [и др.] // Техносферная безопасность. – 2021. – № 2 (31). – С. 61–67.

Karapuzikov, A. A., Dyakov, M. V., Gorelik, A. S., Oparin, D. E., Stavrinidi, S. Yu., Dyakov, V. F. *Celesoobraznost primeneniya bespilotnykh aviacionnykh sistem pri tushenii pozharov i likvidacii avariyn na obektakh zashhity* [Feasibility of using unmanned aerial systems in extinguishing fires and eliminating accidents at protected facilities]. Technosphere safety, 2021, no. 2(31), pp. 61-67. (In Russian)

15. Терешин, С. Н. Предложения по направлениям разработки многоуровневой системы защиты комплексов беспилотных летательных аппаратов от средств противодействия противника / С. Н. Терешин // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. – 2024. – № 3(11). – С. 72–83.

Tereshin, S. N. *Predlozheniya po napravleniyam razrabotki mnogourovnevoy sistemy zashhity kompleksov bespilotnykh letatelnykh apparatov ot sredstv protivodeystviya protivnika* [Proposals for the development directions of a multi-level protection system for unmanned aerial vehicle systems against enemy countermeasures]. Proceedings of the St. Petersburg State Marine Technical University, 2024, no. 3(11), pp. 72-83. (In Russian)

16. Ceviz, O., Sen, S., Sadioglu, P. A survey of security in uavs and fanets: Issues, threats, analysis of attacks, and solutions //IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2024. (In English)

17. Du Z. [et al.] Analysis of the development and key technologies of helicopter air-launched swarm unmanned aerial vehicle from the perspective of Russia-Ukraine conflict //2025 Joint International Conference on Automation-Intelligence-Safety (ICAIS) & International Symposium on Autonomous Systems (ISAS). – IEEE, 2025. – P. 1–6. (In English)

18. Serhii K. The Impact of Unmanned Aerial Vehicles and Unmanned Maritime Systems on Military Tactics of Russia and Ukraine. – Webster University, 2025. (In English)

19. Criollo L., Mena-Arciniega C., Xing S. Classification, military applications, and opportunities of unmanned aerial vehicles //Aviation. – 2024. – Vol. 28, N. 2. – P. 115–127. (In English)

20. Сазыкин, И. А. Металлические конструкции. Примеры расчета элементов конструкций одноэтажных производственных зданий : Учебное пособие / И. А. Сазыкин. – М. : МИИТ, 2009. – 172 с.

Sazykin, I. A. *Metallicheskie konstrukcii. Primery rascheta elementov konstrukciy odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy* [Metal structures. Examples of calculation of structural elements of single-story industrial buildings: textbook]. Moscow: MIIT Publ., 2009. 172 p. (In Russian)

Дата поступления рукописи 30.12.2025
Рекомендовано к публикации профессором кафедры пожарной,
аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»,
д-ром техн. наук, доцентом Л. А. Королевой

Valery Vladimirovich Klyuy, Cand of Pedagogical Sci., Associate Professor; e-mail: val-1964@yandex.ru
Shamil Abubakarovich Osmanov, Head of Department; e-mail: 0091115@mail.ru
Dmitry Evgenievich Zavyalov, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: ZavialovD.E@yandex.ru
Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Saint-Petersburg State Fire Service University of the Ministry of the Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters
named after the Hero of the Russian Federation, Army General E. N. Zinichev»
196105, St. Petersburg, Moskovsky Ave., 149. Phone: +7 (812) 645-20-34

ANALYSIS OF METHODS OF PROTECTING FIRE BRANCHES FROM ATTACKS USING UNMANNED AERIAL SYSTEMS

Objective. To improve the security of fire departments and identify best practices for protecting them from attacks using unmanned aerial systems, as well as to develop recommendations for their use.

Methods. The study utilized publications from domestic (E-library) and international (Scholar Google Academy) scientific research databases, as well as the experience of the Special Military Operation regarding the use of equipment protection against attacks using unmanned aerial systems. Critical and comparative analysis were used as research methods.

Results. A comparative assessment of fire department protection methods against attacks using unmanned aerial systems was obtained. Best practices for using such methods were identified, and recommendations for their use depending on the current situation were developed.

Scientific novelty. Four options for protecting fire departments from attacks by unmanned aerial systems were developed: window and gate protection, frame protection, localized protection, and combined (full) protection. A comparative analysis was also conducted based on cost, protection level, and installation complexity.

Practical significance. The presented options for protecting fire departments from attacks using unmanned aerial systems (UAS) improve the security of fire and rescue garrison facilities, maintain a high level of response, and minimize material and social damage during attacks using UAS.

Keywords: analysis, method, protection, fire department, attack, application, UAS, UAV, Special Military Operation, Special Military Operation.

For citation: Klyuy V. V., Osmanov Sh. A., Zavyalov D. E. Analysis of Methods for Protecting Fire Departments from Attacks Using Unmanned Aircraft Systems. *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 83-91. EDN VXMOEV

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.841:519.876.5

*Александр Тимофеевич Павленко, канд. техн. наук, доцент, зам. директора
Института гражданской защиты; e-mail: pavlenko1901@yandex.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Луганский государственный университет имени Владимира Даля»
291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А. Тел.: +7 (959) 141-12-70*

*Анатолий Валерьевич Рыбаков, д-р техн. наук, профессор, начальник
научно-исследовательского центра; e-mail: anatoll_rubakov@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего
образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам
гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий
имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика»
141435, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А. Тел.: +7 (929) 631-34-95*

*Владимир Юрьевич Малкин, д-р экон. наук, профессор, директор
Института гражданской защиты; e-mail: talkvi@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Луганский государственный университет имени Владимира Даля»
291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А. Тел.: +7 (959) 111-29-45*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОПАСНЫХ ЗОН ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОЖАРОВ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Цель. Разработка интегрального подхода для прогнозирования динамики опасных зон, направленного на повышение обоснованности принятия решений по защите жизни и здоровья пожарных и спасателей.

Методы. Используются методы теории вероятностей, нечёткой логики и построения «деревьев событий» для формирования и ранжирования аварийных сценариев. Для детального моделирования выбранных сценариев применяются методы вычислительной гидродинамики на основе решения системы уравнений Навье-Стокса, моделей турбулентности, горения и тепломассопереноса.

Научная новизна. Впервые разработан двухуровневый алгоритм интеграции моделей, а также подход, позволяющий на этапе планирования операции и в реальном времени сужать область неопределённости и проводить ресурсоёмкие расчёты только для наиболее критичных сценариев.

Практическая значимость. На примере условного пожара резервуара с легковоспламеняющейся жидкостью продемонстрирована последовательность работы алгоритма: от идентификации 5 ключевых сценариев до моделирования тепловых потоков и полей концентрации СО для сценария «пожар в обваловании». Получены прогнозные карты опасных зон с временной привязкой.

Ключевые слова: опасный производственный объект; пожар; спасатели; профессиональный риск; прогнозирование; сценарно-логическое моделирование; численное моделирование; дерево событий; опасная зона; безопасность труда.

Для цитирования: Павленко А. Т., Рыбаков А. В., Малкин В. Ю. Прогнозирование динамики опасных зон при ликвидации пожаров на опасных производственных объектах // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 92–105. – EDN WJCDRC

Постановка проблемы. Профессиональная деятельность личного состава пожарных и аварийно-спасательных подразделений при тушении пожаров на опасных производственных объектах относится к категории работ с экстремально высоким уровнем риска [1]. Согласно оперативным данным МЧС России и аналитическим отчётам, в период 2021–2025 гг. показатель травматизма при выполнении таких задач оставался на уровне 12–15 случаев на 1000 человек [2, 3].

Каждый пятый случай травматизма связан с неадекватной оценкой динамики изменения обстановки: внезапными взрывами, быстрым распространением пламени, обрушением конструкций, образованием обширных задымлённых зон с высокой концентрацией токсичных продуктов горения [4].

Цель работы. Разработка интегрального подхода для прогнозирования динамики опасных зон, направленного на повышение обоснованности принятия решений по защите жизни и здоровья пожарных и спасателей.

Анализ последних исследований. Традиционно для прогнозирования динамики опасных зон при ликвидации пожаров на опасных производственных объектах применяют математические модели, основанные на решении дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процессы теплообмена и гидродинамики с учетом начальных и граничных условий. Такие модели позволяют с достаточной точностью описать распространение опасных факторов пожара, однако данные модели требуют значительных вычислительных ресурсов.

В последние годы активно развиваются подходы, основанные на использовании методов искусственного интеллекта, в частности, нейронных сетей. Такие модели способны обучаться на основе накопленных данных о динамике развития пожаров и опасных зон, а также выдавать прогнозы в реальном времени. Кроме того, они более устойчивы к неопределенностям исходных данных и способны учитывать влияние различных факторов, таких как метеорологические условия, особенности объекта и т. д.

Перспективным направлением также является использование методов имитационного моделирования, основанных на агентном подходе. Такие модели позволяют детально описать поведение отдельных элементов системы (людей, оборудования, источников опасности и т. д.) и их взаимодействие, что дает возможность более адекватно отразить сложную динамику развития чрезвычайных ситуаций.

Результаты исследований. Существующие регламенты действий, основанные на нормативных противопожарных расстояниях и типовых схемах развёртывания, носят преимущественно детерминированный и статичный характер¹. Они слабо адаптируются к уникальным условиям конкретного опасного производственного объекта (компоновке оборудования, свойствам веществ, метеословиям) и не учитывают вероятностное ветвление процесса развития аварии². В результате командир подразделения вынужден принимать решения в условиях острого дефицита времени и информации, полагаясь на опыт и интуицию, что является значимым «человеческим фактором» риска [5].

Современные научные подходы к прогнозированию развития аварийных ситуаций можно условно разделить на две группы:

1. Логико-вероятностные (сценарные) модели. Методы анализа «деревьев событий», «деревьев отказов», построения Bow-tie диаграмм (схем анализа причин и последствий рисков) позволяют систематизировать возможные последовательности развития аварии от инициирующего события до различных исходов, оценивая их вероятности [6, 7]. Их преимущество – способность охватить широкий спектр

¹ СП 12.13130.2022. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2022.

² ГОСТ Р 22.3.08-2022. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита пожарных и спасателей на пожаре. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2022.

сценариев, включая каскадные и цепные аварии. Недостаток – использование усреднённых вероятностных данных и неспособность дать детальную физическую картину параметров среды (температуры, концентрации, скорости потоков) в пространстве и времени.

2. Численные модели. Программные комплексы на основе вычислительной гидродинамики (Fire Dynamics Simulator – FDS, ANSYS Fluent, OpenFOAM) решают системы уравнений, описывающих процессы горения, турбулентного перемешивания, тепло- и массопереноса [8, 9]. Они способны с высокой детализацией воспроизвести динамику опасных факторов в конкретной геометрии. Однако проведение полномасштабного численного моделирования для всех возможных сценариев на этапе оперативного реагирования требует неприемлемо больших вычислительных ресурсов и времени.

Таким образом, актуальной задачей является разработка метода, интегрирующего достоинства обоих подходов: широту охвата сценарного анализа и физическую детальность численного моделирования.

Пусть на момент прибытия подразделения к месту пожара на опасном производственном объекте известен набор исходных данных (D): тип объекта (резервуарный парк, цех, шахта и т. д.), вид горящего вещества (M), его количество (Q), текущая метеорологическая обстановка – скорость и направление ветра (W), температура воздуха (T_a), геометрия зоны аварии (G), полученная, в том числе, с помощью беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА).

Развитие аварии рассматривают как стохастический процесс, приводящий к формированию в пространстве (Ω) и времени (t) опасных зон. Опасную зону HZ_i для i -го фактора риска (тепловой поток больше критического, концентрация токсиканта больше ПДК, зона возможного обрушения) определяют как подмножество пространства Ω , где значение данного фактора $F_i(x, y, z, t)$ превышает установленный порог безопасности L_i :

$$HZ_i(t) = \{(x, y, z) \in \Omega : F_i(x, y, z, t) \geq L_i\}. \quad (1)$$

Ключевые факторы риска (i) для пожарных: тепловой поток (F_{rad}), температура среды (F_{temp}), концентрация оксида углерода (F_{CO}), концентрация кислорода (F_{O_2}), видимость (F_{vis}).

Задача прогнозирования заключается в определении объединения всех опасных зон для наиболее релевантных сценариев развития аварии (S) с учётом их вероятностной оценки:

$$HZ_{\Sigma}(t|D) = \cup_S [P(S|D) \circ \cup_i HZ_i^{S(t)}], \quad (2)$$

где $HZ_{\Sigma}(t|D)$ – интегральный показатель, характеризующий опасную зону для пожарных и спасателей в момент времени t , с учетом неопределенности развития аварии D ;

$\cup_i HZ_i^{S(t)}$ – объединение всех опасных зон по различным физическим факторам риска для конкретного фиксированного сценария развития аварии S . В рамках одного сценария (например, пожар разлития в обваловании) одновременно действуют несколько вредных факторов: тепловое излучение ($i = 1$), оксид углерода ($i = 2$), высокая температура окружающей среды ($i = 3$), недостаток кислорода ($i = 4$).

Каждый фактор создает свою собственную опасную зону $HZ_i^{S(t)}$ – область пространства, где его значение превышает безопасный порог;

i – индекс фактора риска (тепловой поток, концентрация СО, температура и т. д.);

$HZ_i^{S(t)}$ – опасная зона для i -го фактора в сценарии S в момент времени t подмножества трехмерного пространства Ω на объекте; определяют по формуле (1);

\cup_i – оператор объединения множеств всех точек пространства, которые опасны хотя бы по одному из факторов. Если в какой-то точке тепловой поток безопасен, но концентрация СО смертельна – эту точку включают в общую опасную зону для данного сценария.

В итоге, $\cup_i HZ_i^{S(t)}$ – консолидированная опасная зона для сценария S , которая показывает, где и в какой момент времени персоналу категорически нельзя находиться, если авария будет развиваться именно по этому пути.

Физический смысл выражения $P(S|D) \circ \cup_i HZ_i^{S(t)}$ в формуле (2) означает учет вероятности реализации данного сценария при расчете общего риска с учетом важности вклада возможных сценариев в соответствии с тем, насколько каждый сценарий вероятен.

Например, сценарий «взрыв резервуара» ($S4$) создает опасную зону, но его вероятность $P(S4|D)$ может быть очень мала (например, 0,03). Сценарий «локализованный пожар» ($S1$) создает меньшую зону, но его вероятность высока (например, 0,6). Вклад маловероятного, но катастрофического сценария в общую картину угрозы должен быть соответствующим образом скорректирован.

$P(S|D)$ – условная вероятность реализации сценария S при заданных исходных данных D , ключевой параметр, получаемый из сценарно-логического моделирования. D – вектор исходных условий: тип вещества, метеоусловия, геометрия и т. д.

Оператор « \circ » здесь имеет особый смысл. Он не означает арифметического умножения площади на число. В контексте методов теории вероятностей и нечеткой логики это операция, приводящая к формированию «взвешенного» или «нечеткого» множества опасных зон. Проще говоря, каждая точка в зоне $\cup_i HZ_i^{S(t)}$ получает «вес» или «степень принадлежности» к общей опасной зоне, равную вероятности сценария $P(S|D)$. Результатом этой операции является не четкая зона «опасно/безопасно», а распределение степеней опасности, связанное с конкретным сценарием. Зоны от высоковероятных сценариев получают высокий «вес», от маловероятных – низкий.

\cup_S – оператор объединения взвешенных множеств опасных зон по всем рассматриваемым сценариям ($S1, S2, \dots, Sn$). В результате объединения получают комплексную (интегральную) карту опасности, которая показывает для каждой точки пространства наибольшую возможную степень угрозы из всех рассмотренных сценариев. Если в какой-то точке по сценарию $S1$ ($P=0,6$) опасность есть, а по сценарию $S2$ ($P=0,25$) – нет, то в итоговой карте эта точка будет отмечена со «степенью опасности» 0,6.

Вербальная постановка задачи заключается в следующем. На основе исходных данных об аварии на опасном производственном объекте необходимо:

– сформировать полный спектр потенциально возможных сценариев её развития ($S1, S2, \dots, Sn$);

– для каждого сценария оценить вероятность его реализации $P(Sk)$ и потенциальную тяжесть последствий $C(Sk)$;

– для наиболее значимых (высокая $P(Sk)$ и/или высокая $C(Sk)$) сценариев выполнить численное моделирование для расчёта динамики полей опасных факторов $F_i^{Sk(x,y,z,t)}$;

– на основе результатов моделирования построить прогнозные пространственно-временные карты опасных зон $HZ_i^{Sk(t)}$ и интегральную карту риска для личного состава;

– предоставить инструмент для актуализации прогноза при поступлении новой информации (например, от датчиков или БПЛА).

Предлагаемый алгоритм решения сформулированной задачи представляет собой двухуровневую процедуру, целью которой является построение прогнозной модели пространственно-временного распределения опасных факторов $F_i(x, y, z, t)$ для множества возможных сценариев развития аварии $Sk \in \Sigma$, где Σ – полное пространство сценариев. Алгоритм интегрирует методы логико-вероятностного анализа для работы с эпистемической неопределенностью и детерминированные вычислительные модели для описания физической динамики процессов. Фундаментальная задача сводится к оценке оператора \mathcal{M} , отображающего множество исходных данных D и момент времени t в распределение опасных зон $HZ_\Sigma(t|D)$, как определено в формуле (2) [10].

Первый уровень – логико-вероятностное моделирование и фильтрация сценариев, включает следующие этапы:

1. Формирование исходных данных, которые представляют в виде структурированного кортежа $D = (G, M, Q, W, T_a, I_s)$, где G – цифровая модель геометрии объекта (3D-сетка);

M – вектор физико-химических свойств веществ;

Q – параметры источника опасности;

W – вектор метеоусловий;

T_a – температура окружающей среды;

I_s – данные от систем мониторинга (БПЛА, датчики) [10].

Данный кортеж формирует основу для всех последующих вычислений.

2. Построение и анализ «дерева событий» на основе идентифицированного инициирующего события E_0 : строят ориентированный ациклический граф (дерево) $T(D)$, вершины которого – промежуточные события E_j (отказы систем, действия персонала, внешние воздействия), а рёбра – условные вероятности перехода $p(E_j | E_i, D)$, оцениваемые на основе статистических баз данных (например, ARIA [11]), экспертных суждений [12] или данных о надежности. Каждый уникальный путь λ_m от корня E_0 к терминальной вершине (исходу) определяет отдельный сценарий S_m [6, 7].

3. Оценка вероятности событий и ранжирование сценариев. Априорную вероятность сценария S_m вычисляют как произведение вероятностей вдоль пути λ_m :

$$P(S_m | D) = \prod p(E_j | E_i, D) \text{ для всех } (i, j) \in \lambda_m. \quad (3)$$

Индексы i и j являются локальными индексами событий вдоль конкретного пути (сценария) λ_m в «дереве событий» $T(D)$. Так, например, пусть задан конкретный сценарий (путь) λ_m , представляющий собой упорядоченную последовательность событий от инициирующего события E_0 до терминального исхода: $\lambda_m = (E_0, E_a, E_b, \dots, E_N)$, где N – количество событий на пути (включая начальное и конечное):

i – индекс предшествующего (родительского) события на пути λ_m ;

j – индекс последующего (дочернего) события на пути λ_m .

Пара (i, j) представляет собой ориентированное ребро в «дереве событий», ведущее от события E_i к событию E_j .

Произведение в формуле (3) вычисляют путем последовательного прохода по всем ребрам пути λ_m . Индексы меняются, «скользя» по пути:

– на первом шаге: $i = 0, j = a$ (переход от E_0 к E_a), тогда условная вероятность $p(E_a | E_0, D)$;

– на втором шаге: $i = a, j = b$ (переход от E_a к E_b), условная вероятность $p(E_b | E_a, D)$.

Этот процесс продолжают до тех пор, пока j не станет индексом терминального события E_N пути λ_m .

Таким образом, множество пар $(i, j) \in \lambda_m$ – все последовательные пары событий в этом пути (рис. 1): $(0, a), (a, b), \dots, (k, N)$.

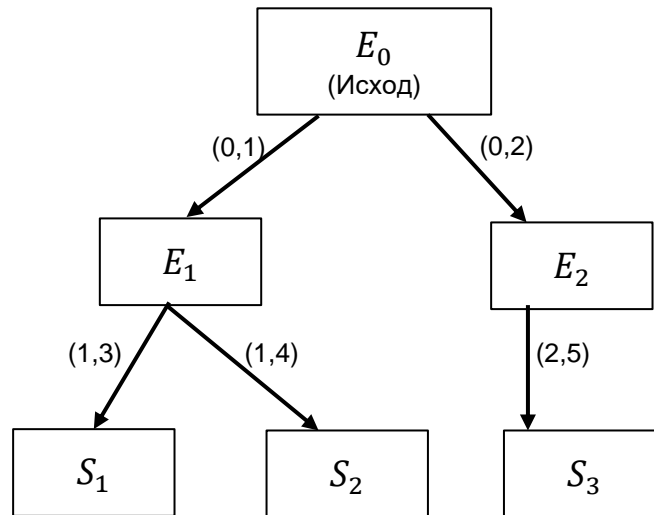


Рис. 1. Графическая иллюстрация сценария на упрощённом «дереве событий»

Для сценария λ_1 (путь к исходу S_1): $(i, j) \in \lambda_1 = \{(0, 1), (1, 3)\}$.

Сначала $i = 0, j = 1$. Затем $i = 1, j = 3$.

Вероятность: $P(S_1) = p(E_1 | E_0, D) \cdot p(E_3 | E_1, D)$.

Для сценария λ_3 (путь к исходу S_3): $(i, j) \in \lambda_3 = \{(0, 2), (2, 5)\}$.

Сначала $i = 0, j = 2$ /Затем $i = 2, j = 5$.

Вероятность: $P(S_3) = p(E_2 | E_0, D) \cdot p(E_5 | E_2, D)$.

Индексы i и j жёстко привязаны к структуре конкретного пути λ_m и последовательно «пробегают» все смежные пары вершин (событий) по одному из возможных маршрутов от «корня» к «листу» в «дереве событий».

Каждому сценарию также присваивают вектор оценок тяжести последствий $C(Sm) = (c_1, c_2, \dots)$, например, потенциальное число пострадавших, материальный ущерб, экологический вред. Для фильтрации вводят скалярный рейтинг $R(Sm) = f(P(Sm | D), C(Sm))$, где f – функция агрегирования (часто мультипликативная или аддитивно-взвешенная). Из множества Σ выбирается подмножество $\Sigma^* \subset \Sigma$ мощностью N сценариев, для которых $R(Sm)$ максимальна:

$$\Sigma^* = \operatorname{argmax}_{\{\Sigma' \subset \Sigma, |\Sigma'|=N\}} \sum_{\{S_m \in \Sigma'\}} R(Sm), \quad (4)$$

где Σ – полное множество всех возможных сценариев развития аварии, сгенерированных на предыдущих шагах;

Σ' – произвольное подмножество (отбор) сценариев из полного множества Σ . Главное условие: мощность этого подмножества должна быть равна заданному числу N сценариев для детального моделирования. Запись $\Sigma' \subset \Sigma$, $|\Sigma'| = N$ означает: «рассмотрим все возможные подмножества Σ' , которые являются частью Σ и содержат ровно N элементов»;

$\sum_{\{S_m \in \Sigma'\}} R(S_m)$ – операция суммирования. Для каждого рассматриваемого подмножества Σ' вычисляем сумму рейтингов $R(S_m)$ всех сценариев S_m , входящих в это подмножество;

$R(S_m)$ – численный показатель важности сценария (например, произведение его вероятности на тяжесть последствий);

$\operatorname{argmax}_{\{\Sigma' \subset \Sigma, |\Sigma'|=N\}}$ – операция поиска аргумента (подмножества), при котором функция достигает максимума. Перебирают все возможные подмножества Σ' размера N и для каждого вычисляют сумму $R(S_m)$. Оператор argmax определяет конкретное подмножество Σ' , для которого эта сумма максимальна;

Σ^* – результат операции argmax , то есть искомое оптимальное подмножество сценариев для дальнейшего численного моделирования на следующем уровне алгоритма.

Формула (4) формализует задачу: «Выбрать ровно N сценариев из всех возможных так, чтобы суммарный показатель их важности (рейтинг) был максимальным». На практике полный перебор всех комбинаций (argmax по всем подмножествам) может быть вычислительно сложен. Однако, если функция рейтинга $R(S_m)$ определена для каждого сценария независимо (например, $R(S_m) = P(S_m) \cdot C(S_m)$), то задача тривиально решается сортировкой всех сценариев по убыванию $R(S_m)$ и выбором первых N элементов. Это позволяет сократить пространство поиска для ресурсоемких расчетов [13].

Второй уровень – детерминированное численное моделирование отобранных сценариев, которое включает в себя следующие этапы:

1. Для каждого сценария $Sk \in \Sigma^*$ выполняют параметризацию решения гидродинамической численной модели: системы уравнений Навье-Стокса для сжимаемого турбулентного потока, дополненной условиями переноса для химических компонентов, горения и радиационного теплообмена [8, 13, 14]:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\varphi u) = \operatorname{div}(\Gamma_\varphi \operatorname{grad} \varphi) + S_\varphi, \quad (5)$$

где ρ – плотность среды;

φ – переносимая величина (скорость, энтальпия, концентрация);

u – вектор скорости потока;

Γ_φ – эффективный коэффициент диффузии;

S_φ – источник.

Граничные и начальные условия задают в соответствии со сценарием Sk [8, 13]. Результатом расчета являются дискретные во времени и пространстве поля искомых факторов $F_i^{Sk(x,y,z,t)}$, полученные на вычислительной сетке, аппроксимирующей область Ω [9, 14].

2. Построение пространственно-временных опасных зон на основе рассчитанных полей F_i^{Sk} и заданных пороговых значений L_i (определяемых

из условий безопасности для человека в СИЗ [15, 16]) для каждого момента дискретного времени t_n :

$$HZ_i^{Sk}(t_n) = \{(x, y, z) \in \Omega_h: F_i^{Sk}(x, y, z, t_n) \geq L_i\}, \quad (6)$$

где Ω_h – дискретное представление Ω .

Далее формируют комбинированную опасную зону для сценария: $HZ^{Sk}(t_n) = \cup_i HZ_i^{Sk}(t_n)$. Процедуру повторяют для всех t_n , что позволяет получить динамику зоны [19].

3. На основе множеств $\{HZ^{Sk}(t_n)\}$ для всех $Sk \in \Sigma^*$ и их вероятностей $P(Sk|D)$ строят итоговую прогнозную карту. Практически формируют два ключевых оперативных слоя.

Во-первых, пессимистичная оценка (гарантированная опасная зона):

$$HZ_{\text{пес}}(t_n) = \cap_{\{S_k \in \Sigma^*\}} HZ^{Sk}(t_n), \quad (7)$$

где $HZ^{Sk}(t_n)$ – опасная зона, рассчитанная для конкретного сценария Sk в момент времени t_n , множество точек пространства, где хотя бы один опасный фактор превышает пороговое значение;

$\cap_{\{S_k \in \Sigma^*\}}$ – оператор пересечения множеств, возвращает новое множество, состоящее только из тех элементов (точек пространства), которые входят во все исходные множества;

Σ^* – подмножество наиболее значимых сценариев, отобранных на первом уровне алгоритма;

$HZ_{\text{пес}}$ – зона, которая будет опасна при любом из рассматриваемых значимых сценариев $Sk \in \Sigma^*$. Это наихудший (пессимистичный) случай с точки зрения пространственного перекрытия угроз.

Для командира подразделения это означает безусловный запрет. Нахождение личного состава в этой зоне недопустимо ни при каком (из смоделированных) развитии событий. Это область максимального и гарантированного риска. Размещение командного пункта, тыловых позиций, пункта заправки и других элементов должно осуществляться за пределами этой зоны. Решения, основанные на этой карте, исключают возможность попадания под удар из-за ошибки в прогнозе доминирующего сценария, который задаёт минимальные безопасные расстояния (консервативная, но абсолютно надёжная основа для планирования).

Во-вторых, вероятностная оценка (зона потенциального риска): $HZ_{\text{risk}}(t_n)$. Каждой ячейке пространства (x, y, z) может быть присвоен уровень риска, например, максимальная из вероятностей сценариев, при которых она становится опасной:

$$\text{risk}(x, y, z, t_n) = \max_{\{Sk: (x, y, z) \in HZ^{S-k}(t_n)\}} P(Sk | D), \quad (8)$$

где $(x, y, z) \in HZ^{S-k}(t_n)$ – условие, что данная точка входит в опасную зону сценария Sk в момент t_n ;

$P(Sk | D)$ – вероятность реализации сценария Sk ;

\max – оператор нахождения максимума, который позволяет среди всех сценариев, где точка является опасной, найти тот сценарий, который имеет наибольшую вероятность;

Результат $risk(x, y, z, t_n)$ – численная мера опасности точки, выраженная через вероятность наиболее возможного из «плохих» для неё сценариев. Эта оценка не бинарная («опасно/безопасно»), а непрерывная шкала (например, от 0 до 0,9).

Для командира подразделения это означает, что зона за пределами $HZ_{пес}$ не является абсолютно безопасной. Формула (8) позволяет построить карту градиента риска: от областей $risk \approx 0$ (безопасно при любом вероятном сценарии) до областей $risk = \max(P(Sk))$ (опасно при наиболее вероятном сценарии). Эта карта отвечает на вопрос: «С какой вероятностью эта точка станет опасной?», что позволяет определить приоритеты мониторинга, т.е. усилить наблюдение (например, с помощью БПЛА) за зонами с высоким $risk$, а также планировать манёвры и кратковременные операции. Войти в зону $risk = 0,3$ для срочной установки оборудования может быть оправдано, если задача критически важна и время пребывания минимально. Вход в зону $risk = 0,8$ требует исключительных оснований. Алгоритмы поиска пути могут минимизировать интегральный риск вдоль траектории движения звена, а не просто избегать запретных зон.

В более сложных версиях формулы вместо $P(Sk)$ можно использовать рейтинг $R(Sk) = f(P(Sk), C(Sk))$, где C – тяжесть последствий. Тогда $risk$ отражает не просто вероятность, а математическое ожидание ущерба, что более точно для принятия решений.

Вначале необходимо определить $HZ_{пес}$ – зону полного и безусловного запрета, проанализировать HZ_{risk} в оставшейся области для планирования операций, требующих приближения к очагу. Обе зоны $HZ_{пес}(t)$ и $HZ_{risk}(t)$ эволюционируют во времени. Система может выдавать прогноз, например, через 10 мин пессимистичная зона расширится до точки X, а риск в точке Y вырастет с 0,2 до 0,7, что позволит командиру действовать на опережение.

Таким образом, пессимистическая оценка обеспечивает базовый, неуязвимый для ошибок прогноза уровень безопасности, а вероятностная оценка даёт инструмент для гибкого, риск-ориентированного управления в серой зоне неопределённости, позволяя находить баланс между безопасностью и эффективностью операций [20].

Предложенная последовательность решения задачи (1) и (2) формально реализует последовательность операторов:

$$D \rightarrow T(D) \rightarrow \Sigma^* \rightarrow \{F_i^{Sk}\} \rightarrow \{HZ^{Sk}(t)\} \rightarrow HZ_{\Sigma}(t|D) \quad (9)$$

Приведенное формальное описание (1) – (9) решаемой задачи, связанной с определением объединения всех опасных зон для наиболее релевантных сценариев развития аварии, обеспечивает необходимую строгость для интеграции метода в системы поддержки принятия решений, соответствуя принципам риск-ориентированного подхода [16].

Рассмотрим применение предложенного подхода для прогнозирования опасных зон при тушении пожара легковоспламеняющейся жидкости в обваловании резервуара на нефтебазе [19].

Исходные данные (D): резервуар $R1$ объёмом 5000 м^3 ; вещество – бензин; пожар в обваловании площадью $\sim 300 \text{ м}^2$; ветер – 5 м/с , направление – на север. Соседний резервуар $R2$ аналогичный, расположен в 30 м к северу.

В качестве ключевых сценариев примем следующие:

$S1$ – пожар локализуют и ликвидируют в обваловании (вероятность $P1 = 0,6$).

$S2$ – тепловое излучение приводит к разогреву и разгерметизации стенки $R1$, развитию пожара, возможен выброс горячей жидкости ($P2 = 0,25$, высокая тяжесть $C2$).

$S3$ – тепловое излучение приводит к разогреву соседнего резервуара $R2$ и развитию пожара на $R2$ ($P3 = 0,1$, катастрофическая тяжесть $C3$).

$S4$ – взрыв паровоздушной смеси в газовом пространстве $R1$ (BLEVE маловероятен для бензина, но возможен для пропана/бутана) ($P4 = 0,03$, экстремальная тяжесть $C4$).

$S5$ – растекание горячей жидкости за пределы обвалования при переливе или повреждении ограждения ($P5 = 0,02$, тяжесть $C5$).

После оценки $R(Sk) = P(Sk) \cdot C(Sk)$ для моделирования выбраны сценарии $S1$ (базовый), $S2$ (наиболее вероятный тяжёлый) и $S3$ (каскадная авария).

Пусть в программе создана модель, где через 10 мин после начала пожара моделируется образование дополнительного источника горения от предполагаемого разрушения стенки $R1$. Проведён расчёт за 30 мин реального времени пожара, поля температуры на высоте 1,5 м (уровень дыхания / работы звена пожарных) в моменты времени $t = 5; 15; 25$ мин [20, 21].

Выделена зона, где температура превышает 60°C (критический уровень даже в теплоотражающей одежде) – HZ_T . На основе поля концентрации CO выделена зона, где $[CO] > 0,01 \text{ кг/м}^3$ – HZ_{CO} . Динамика расширения комбинированной опасной зоны образуется из пересечения $HZ_\Sigma(S2) = HZ_T \cup HZ_{CO}$ (рис. 2).

Результаты для принятия решений могут содержать следующую информацию: к 15-й минуте прогнозируется перекрытие основного подхода с севера комбинированной опасной зоной. Рекомендуется немедленный ввод стволов на охлаждение $R2$, так как критический уровень теплового потока к его стенке достигается к 18-й минуте. Время безопасной работы звена у южной стенки обвалования (для установки пеногенератора) не превышает 12 мин с момента начала моделирования сценария $S2$ [22].



Рис. 2. Пересечение опасных зон, связанных с температурой и CO

Выводы. Представленный интегральный подход, сочетающий сценарно-логическое и численное моделирование, позволяет преодолеть ограничения каждого из методов в отдельности. Он обеспечивает системный учёт неопределённости развития аварии и одновременно даёт детальную физическую картину формирования опасных зон для наиболее значимых сценариев.

Внедрение данного подхода в практику управления силами и средствами при тушении пожаров на опасных производственных объектах позволит перейти к научно обоснованной стратегии управления рисками. Это является ключевым элементом для снижения вероятности тяжёлого травматизма и гибели личного состава аварийно-спасательных формирований. В дальнейшем для практического применения изложенного подхода необходимо его внедрение при разработке планов ликвидации аварий для конкретных опасных производственных объектов. Библиотеки прерасчитанных сценариев для типовых объектов позволят оперативно оценивать риски при планировании операций. В системе управления в режиме реального времени предложенный алгоритм должен быть реализован в составе мобильного командного пункта или центра управления кризисными ситуациями. Исходные данные (*D*) могут непрерывно уточняться с помощью:

- БПЛА с тепловизионными и газоаналитическими датчиками;
- стационарных датчиков промышленной безопасности объекта (если они функционируют);
- сенсоров, размещаемых пожарными.

На основе поступающих данных будет происходить актуализация вероятностей сценариев, а также, при необходимости, запуск уточняющих расчётов на высокопроизводительных мобильных вычислительных кластерах. Трёхмерные визуализации динамики опасных зон на основе интегрального моделирования – инструмент для тренажёров виртуальной реальности, позволяющий отрабатывать действия в прогнозируемых критических ситуациях без риска для жизни. Полученные пространственно-временные распределения опасных факторов являются основой для расчёта индивидуальных и коллективных профессиональных рисков, выраженных в вероятностной форме (например, F-N кривые). Это позволит перейти от качественных оценок к количественному обоснованию достаточности мер защиты [16].

Дальнейшие исследования должны быть направлены на автоматизацию процесса построения «деревьев событий» на основе баз знаний по аварийности, оптимизацию и ускорение расчётов с использованием методов машинного обучения, а также на разработку интуитивно понятных интерфейсов для представления прогнозных данных командирам подразделений в условиях оперативного дефицита времени.

Список литературы/References

1. International Association of Fire and Rescue Services (CTIF). World Fire Statistics. Report No. 28. – 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://ctif.org/world-fire-statistics> (дата обращения: 25.12.2025). (In English)
2. Уровни травматизма личного состава ФПС ГПС во время прохождения службы за 2017–2021 годы при выполнении ими различных видов деятельности / Н. А. Панкратов [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2022. – № 2(25). – С. 186–192.
Pankratov, N. A., Mashtakov, V. A., Udavtsova, E. Yu., Bobrinev, E. V., Kondashov, A. A. [Injury levels of the personnel of the FPS GPS during service in 2017-2021 when they perform various activities]. Siberian Fire and Rescue Bulletin, 2022, no. 2 (25), pp. 186-192. (In Russian)

3. Baker, M. G., Peckham, T. K., Seixas, N. S. Estimating the Burden of United States Workers Exposed to Infection or Disease: A Key Factor in Containing Risk of COVID-19 Infection // PLOS ONE. – 2020. – Vol. 15, No. 4. – P. e0232452. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2793900> (дата обращения: 25.12.2025). (In English)
4. Изучение динамики рисков гибели и травматизма личного состава Федеральной противопожарной службы с использованием сглаживания временных рядов / В. А. Маштакон [и др.] // Безопасность техногенных и природных систем. – 2022. – № 3. – С. 4–11.
Mashtakov, V. A., Kondashov, A. A., Bobrinev, E. V., Shavyrina, T. A., Udavtsova, E. Yu. [Study of Death and Injury Risks Dynamics of the Federal Fire-Fighting Service Personnel Using Time Series Smoothing]. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 3, pp. 4–11. (In Russian)
5. Reason, J. Human error: models and management / J. Reason // BMJ. – 2000. – Vol. 320, No. 7237. – P. 768–770. (In English)
6. Ericson, C. A. Hazard Analysis Techniques for System Safety / C. A. Ericson. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. – 632 p. (In English)
7. Маршалл, В. А. Основные опасности химических производств / В. А. Маршалл, Пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 672 с.
Marshall, V. A. *Osnovnyye opasnosti khimicheskikh proizvodstv*. Moscow, Mir Publ., 1989, 672 p. (In Russian)
8. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. Available at: https://www.fse-italia.eu/wp-login.php?redirect_to=https%3A%2F%2Fwww.fse-italia.eu%2F (accessed: 25.12.2025). (In English)
9. Wang, Z. A comparative study of CFD fire models for large-scale compartment fires / Z. Wang, F. Jia, E. R. Galea // Fire Safety Journal. – 2021. – Vol. 120. – P. 103–129. (In English)
10. Банников, В. В. Моделирование последствий аварий на опасных производственных объектах с использованием программного комплекса FLACS / В. В. Банников, Т. В. Савицкая // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – Т. 30, № 4 (173). – С. 24–26.
Bannikov, V. V., Savitskaya, T. V. [Modeling consequences of accidents on especially dangerous industrial objects by using FLACS software system]. Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii Magazine, 2016, vol. 30, no. 4(173), pp. 24-26. (In Russian)
11. ARIA Database. French Ministry of Ecological Transition. Available at: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> (accessed: 10.12.2025). (In English)
12. Немчинов, Д. В. Оценка риска аварий с использованием экспертных систем / Д. В. Немчинов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2007. – № 1 (36). – С. 40–45.
Nemchinov, D. V. [Estimation of risk of failures with use of expert systems]. Vestnik of Astrakhan State Technical University, 2007, no. 1(36), pp. 40-45. (In Russian)
13. Novozhilov, V. Computational fluid dynamics modeling of compartment fires / V. Novozhilov // Progress in Energy and Combustion Science. – 2001. – Vol. 27, No. 6. – P. 611–666. (In English)
14. Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel / Hu, L. [et al.] // Combustion and Flame. – 2007. – Vol. 149, No. 1-2. – P. 183–193. (In English)
15. NFPA 1971. Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting. – Quincy: National Fire Protection Association, 2023. Available at: <https://archive.org/details/gov.law.nfpa.1971.2007> (accessed: 25.12.2025). (In English)
16. Fire and explosion risk assessment (FERA) guideline EGPC-PSM-GL-009 EGPC-PSM-GL-010. Available at: <https://psmegypt.com/wp-content/uploads/2023/02/EGPC-PSM-GL-009-Fire-and-Explosion-Risk-Assessment-FREA-Guideline.pdf> (accessed: 25.12.2025). (In English)
17. Ronchi, E. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research / E. Ronchi, D. Nilsson // Fire Science Reviews. – 2013. – Vol. 2, no. 7. Available at: https://www.researchgate.net/publication/258769857_Fire_evacuation_in_high-rise_buildings_A_review_of_human_behaviour_and_modelling_research (accessed: 25.12.2025) (In English)

18. Павленко, А. Т. О создании научно-методических основ рискориентированного обеспечения безопасности труда личного состава аварийно-спасательных и пожарных подразделений / А. Т. Павленко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2025. – № 4 (5). – С. 49–56.

Pavlenko, A. T. [On the creation of scientific and methodological foundations for risk-oriented occupational safety and health protection for personnel in emergency rescue and firefighting units]. Vestnik of Lugansk State University Named After Vladimir Dahl. Series Technical Sciences, 2025, no. 4(5), pp. 49-56. (In Russian)

19. Гидаспов, В. Ю. Численное моделирование стационарных детонационных волн в газовых и газочастичных реагирующих смесях / В. Ю. Гидаспов, О. А. Москаленко, У. Г. Пирумов // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16, № 2. – С. 51–61.

Gidasпов, V. Yu., Moskalenko, O. A., Pirumov U. G. [Numerical simulation of stationary detonation waves in gas and gas-droplet reacting mixtures]. Aerospace MAI Journal, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 51-61. (In Russian)

20. Губарев, Ю. А. Обеспечение пожарной безопасности производственных объектов / Ю. А. Губарев, В. Н. Пилипенко // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – № 1 (5). – С. 209–212.

Gubarev, Yu. A., Pilipenko, V. N. [Ensure fire safety production facility]. Fire and Technospheric Safety: Problems and Ways of Improvement, 2020, no. 1(5), pp. 209-212. (In Russian)

21. Федорян, А. В. Организация и тактика тушения пожара на объекте защиты: учебное пособие / А. В. Федорян. – Москва: Директ-Медиа, 2025. – 344 с. ISBN: 978-5-4499-4968-4

Fedoryan, A. V. [Organization and tactics of fire extinguishing at a protected facility: textbook] Moscow, Direkt-Media Publ., 2025, 344 p. ISBN: 978-5-4499-4968-4. (In Russian)

22. Fire and Explosion Risk Analysis and Evaluation for LNG Ships. Available at: https://www.researchgate.net/publication/257725743_Fire_and_Explosion_Risk_Analysis_and_Evaluation_for_LNG_Ships (accessed: 25.12.2025). (In English)

Дата поступления рукописи 02.02.2026

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым

Alexander Timofeevich Pavlenko, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Deputy Director

of the Institute of Civil Defense; e-mail: pavlenko1901@yandex.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Lugansk Vladimir Dahl State University»

291034, Lugansk, Molodezhny kv., 20-a. Phone: +7 (959) 141-12-70

Anatoly Valerievich Rybakov, Dr. of Tech. Sci., Professor, Head of the Research Center;

e-mail: anatoll_rubakov@mail.ru

Federal State Budget Military Educational Institution of Higher Education

«The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia»

141435, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya st., 1A. Phone: +7 (929) 631-34-95

Vladimir Yuryevich Malkin, Dr. of Economics, Professor, Director of the Institute of Civil Defense;

e-mail: malkvu@mail.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Lugansk Vladimir Dahl State University»

291034, Lugansk, Molodezhny kv., 20-a. Phone: +7 (959) 111-29-45

FORECASTING THE DYNAMICS OF DANGEROUS ZONES WHEN FIRE SUPPRESSION AT HAZARDOUS INDUSTRIAL FACILITIES

Objective. The purpose of this article is to describe such an integral approach to predicting the dynamics of hazardous zones, aimed at increasing the validity of decisions to protect the life and health of firefighters and rescuers.

Methods. Probability theory, fuzzy logic, and event tree construction are used to generate and rank emergency scenarios. For detailed modeling of the selected scenarios, computational fluid dynamics

methods are applied based on solving the Navier-Stokes equations, turbulence, combustion, and heat and mass transfer models.

Scientific novelty. A two-level algorithm for model integration is proposed. An approach is proposed that allows for narrowing the uncertainty domain at the operation planning stage and in real time, limiting resource-intensive calculations to only the most critical scenarios.

Practical value. Using a simulated fire in a tank containing a flammable liquid as an example, the algorithm's operational sequence is demonstrated: from identifying five key scenarios to modeling heat flows and CO concentration fields for the «fire in a bund» scenario. Predictive maps of hazard zones with time reference are obtained.

Keywords: hazardous industrial facility, fire, rescuers, professional risk, forecasting, scenario-logical modeling, numerical modeling, event tree, danger zone, occupational safety.

For citation: Pavlenko A. T., Rybakov A. V., Malkin V. Yu. Forecasting the dynamics of dangerous zones when fire suppression at hazardous industrial facilities. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 92-105. EDN WJCDCR

УДК 614.8"363":[355.244:004.942]

Виталий Викторович Горлов, канд. техн. наук, зам. нач. каф.; e-mail: Gorlovvv@mail.ru
Валерий Владимирович Меньших, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф.; e-mail: menshikh@list.ru
Виталий Алексеевич Никитенко, канд. техн. наук, ст. преп. каф.;
e-mail: vitalijnikitenko82043@gmail.com
Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации»
394065, г. Воронеж, пр-т Патриотов, 53. Тел.: +7(473)264-87-32

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭВАКУАЦИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ЦЕННОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С УЧЕТОМ ИХ ВАЖНОСТИ

Цель. Разработка математической модели и численного метода для оптимизации эвакуации объектов из зоны чрезвычайной ситуации с учетом их важности.

Методы. При численной реализации применялись методы численного анализа, нелинейного программирования, методы теории расписания. Также при программной реализации на языке Python использовались библиотеки `numpy` и `ruhr`.

Результаты. Разработана математическая модель и численный метод, позволяющие определить оптимальное количество и расположение пунктов специальной обработки, учитывая такие параметры, как стоимость развертывания и пропускная способность, влияющая на время эвакуации. Рассмотрен пример для случая аварии на радиационно опасном объекте, демонстрирующий эффективность предложенного подхода.

Научная новизна. Впервые разработана математическая модель и численный метод для оптимального распределения эвакуируемых материальных ценностей по пунктам специальной обработки, максимизирующие суммарную важность эвакуируемых материальных ценностей.

Практическая значимость. Программная реализация указанного численного метода позволит осуществлять распределение эвакуируемых материальных ценностей по пунктам специальной обработки при возникновении чрезвычайных ситуаций с учетом важности эвакуируемых объектов при ограниченном времени и бюджете.

Ключевые слова: *чрезвычайные ситуации; эвакуация; безопасность в чрезвычайных ситуациях; важность; задача оптимизации.*

Для цитирования: Горлов В. В., Меньших В. В., Никитенко В. А. Оптимизация эвакуации материальных ценностей в условиях чрезвычайных ситуаций с учетом их важности // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 106–113. – EDN PPFJRY

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Актуальность задачи оптимизации эвакуации в условиях чрезвычайной ситуации (ЧС) обусловлена ростом количества таких ситуаций на территории РФ за последние годы¹. Одним из ключевых аспектов ликвидации ЧС является снижение материального ущерба. Так, при организации эвакуации материальных ценностей из зоны ЧС необходимо выполнить одно из обязательных условий, а именно – проведение специальной обработки эвакуированных ценностей, что требует создания пунктов специальной обработки

¹ Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2021 году». – Москва, МЧС России, 2022. – 250 с.
Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году». – Москва, МЧС России, 2023. – 351 с.
Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2023 году». – Москва, МЧС России, 2024. – 289 с.

(ПуСО). Одним из факторов, влияющих на успешное проведение специальной обработки эвакуированных ценностей, является количество выделяемых ресурсов.

Таким образом, чтобы из зоны ЧС за отведенное время эвакуировать материальные ценности и провести их специальную обработку, необходимо создать ПуСО, количество которых ограничено и зависит от множества параметров: места развертывания, пропускной способности, времени и стоимости развертывания и т. д.

Под ПуСО могут быть использованы имеющиеся на границе зоны ЧС стационарные помещения (автомойки, ремонтные мастерские и т. п.), а при отсутствии таких помещений необходимо разворачивать мобильные ПуСО.

В связи с этим разработка математической модели и численного метода, учитывающих основные особенности развертывания ПуСО, является актуальной задачей.

Анализ последних исследований. Существующие работы [1–5] фокусируют внимание на оптимизации действий подразделений, но не учитывают распределение ресурсов для эвакуации. В работе [3] авторы рассматривают распределение ресурсов, однако целевая функция – максимизация прибыли – не подходит для задач эвакуации. В работах [6–8] рассматривали задачи эвакуации из зоны ЧС, однако разработанные методы не позволяют учитывать важность этих объектов.

Цель исследования – Разработка математической модели и численного метода для оптимизации эвакуации объектов из зоны чрезвычайной ситуации с учетом их важности.

Результаты исследований. При проведении эвакуации материальных ценностей из зоны ЧС необходимо учитывать их важность. Для этого построим модель оценки важности, основанной на [9]. Используем следующую классификацию важности материальных ценностей:

p_1 – стоимость материальных ценностей в зоне ЧС, у. е.;

p_2 – социальная важность материальных ценностей, у. е.;

p_3 – социальная опасность материальных ценностей, у. е.

На основе данных признаков общая важность (w_i) материальных ценностей может быть рассчитана по формуле:

$$w_i = \sum_{k=1}^3 \alpha_i^k \beta_k, \quad (1)$$

где α_i^k – приоритет i -го объекта эвакуации по k -му признаку,

β_k – приоритет k -го признака.

Следовательно, всем материальным ценностям в зоне ЧС присваивают важность, которая влияет на очередность эвакуации, т. е. материальные ценности эвакуируют в соответствии с их важностью.

Таким образом, необходимо распределить эвакуируемые материальные ценности по ПуСО, так чтобы их суммарная важность была максимальной.

Рассмотрим виды ПуСО, различающиеся по стоимости развертывания и пропускной способности в зависимости от вида эвакуируемых материальных ценностей.

Введем следующие обозначения:

O – множество материальных ценностей, подлежащих эвакуации, где каждый $o_i \in O$ имеет важность w_i , рассчитанную по формуле (1)

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_{|O|}\};$$

c_j – стоимость развёртывания каждого ПуСО, у. е.;

M – множество ПуСО

$$M = \{m_j\}_{j=1}^{|M|};$$

τ_{ij} – время обработки o_i на m_j ПуСО, мин.;

t_{ij} – время движения o_i до m_j ПуСО, мин.;

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } o_i \text{ назначен на } m_j \text{ ПуСО}; \\ 0, & \text{если иначе} \end{cases};$$

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{если ПуСО } m_j \text{ развернут}; \\ 0, & \text{если иначе} \end{cases};$$

θ_{ij} – время начала обработки o_i на m_j ПуСО, мин.

Для определения величин θ_{ij} целесообразно разделить процесс эвакуации объектов o_i на две стадии: первая стадия – движение объекта от места расположения до ПуСО, вторая – прохождение объекта через ПуСО.

Таким образом, задача нахождения θ_{ij} относится к классу задач оптимизации многостадийных систем и решается с помощью известных методов теории расписаний [10].

Используя введенные обозначения, опишем основные параметры задачи, а именно:

W – суммарную важность эвакуированных материальных ценностей

$$W = \sum_{i=1}^{|O|} \sum_{j=1}^{|M|} w_i x_{ij},$$

T – время эвакуации материальных ценностей

$$T = \max_j \left(\max_i \left((\theta_{ij} + \tau_{ij}) x_{ij} \right) \right),$$

C – общую стоимость развёртывания всех ПуСО

$$C = \sum_{j=1}^{|M|} c_j y_j.$$

Таким образом, задача эвакуации из зоны ЧС представляет собой следующую оптимизационную задачу:

$$W = \sum_{i=1}^{|O|} \sum_{j=1}^{|M|} w_i x_{ij} \rightarrow \max \quad (2)$$

при ограничениях

$$T = \max_j \left(\max_i \left((\theta_{ij} + \tau_{ij}) x_{ij} \right) \right) \leq T_{\max}, \quad (3)$$

$$C = \sum_{j=1}^{|M|} c_j y_j \leq C_{\max}. \quad (4)$$

Также необходимо добавить следующие ограничения:

$$\forall i \sum_{j=1}^{|M|} x_{ij} \leq 1 \quad (5)$$

$$\forall i, j \ x_{ij} \leq y_j \quad (6)$$

$$\forall j \sum_{o_i} x_{ij} \leq \sum_l \tau_{jl} \quad (7)$$

Ограничение (5) означает, что каждый o_i может быть назначен не более чем на один ПуСО. Ограничение (6) означает, что o_i может быть назначен только на развёрнутый ПуСО. Выражение (7) означает ограничение пропускной способности ПуСО.

Численный пример. В результате аварии на радиационно-опасном объекте необходимо эвакуировать материальные ценности в количестве 20 штук, каждая из которых имеет свою важность. Максимально допустимое время на эвакуацию составляет 2 часа. Бюджет составляет 250 у. е. Для проведения специальной обработки эвакуируемых материальных ценностей может быть развернуто не более 3 ПуСО. Время прохода каждого объекта через определенное ПуСО, время движения объектов до ПуСО, важность объектов, время обработки одной условной единицы материальных ценностей на каждом ПуСО приведены в таблице.

Таблица

Исходные данные задачи

Объекты o_i	ПуСО 0	ПуСО 1	ПуСО 2	Важность o_i
1	4,23 / 2,42	5,22 / 3,45	1,39 / 2,67	0,28
2	2,98 / 4,15	4,14 / 2,83	4,64 / 5,92	0,18
3	2,04 / 3,27	3,65 / 4,88	5,25 / 3,51	0,68
4	3,08 / 4,29	3,19 / 4,42	1,74 / 2,96	0,13
5	4,88 / 6,07	4,10 / 5,33	6,76 / 5,94	0,88
6	4,58 / 5,79	6,39 / 4,62	4,69 / 5,87	0,47
7	1,35 / 2,54	5,78 / 2,97	1,18 / 2,36	0,12
8	2,30 / 3,49	2,55 / 3,78	2,09 / 3,28	0,11
9	4,31 / 3,50	2,43 / 3,66	2,12 / 3,31	0,88
10	3,17 / 4,36	5,56 / 2,75	4,21 / 5,40	0,69
11	1,30 / 2,49	4,95 / 6,14	4,09 / 1,28	0,41
12	1,79 / 2,98	3,02 / 2,21	4,26 / 5,45	0,01

Объекты O_i	ПуСО 0	ПуСО 1	ПуСО 2	Важность O_i
13	3,83 / 5,02	3,92 / 5,11	3,09 / 5,28	0,45
14	1,30 / 2,49	2,43 / 3,62	7,46 / 2,65	0,07
15	4,45 / 5,64	3,49 / 4,68	2,32 / 3,51	0,07
16	1,25 / 2,44	2,24 / 3,43	2,30 / 3,49	0,37
17	3,92 / 5,11	3,55 / 4,74	4,55 / 5,74	0,81
18	2,89 / 4,08	1,48 / 2,67	3,85 / 5,04	0,36
19	4,04 / 5,23	3,25 / 4,44	6,08 / 5,27	0,58
20	2,98 / 4,17	3,09 / 4,28	2,71 / 3,90	0,85
Стоимость ПуСО	108	64	100	

Результатом решения оптимизационной задачи (2) – (7) является следующая схема эвакуации материальных ценностей из условного населенного пункта (рис.).

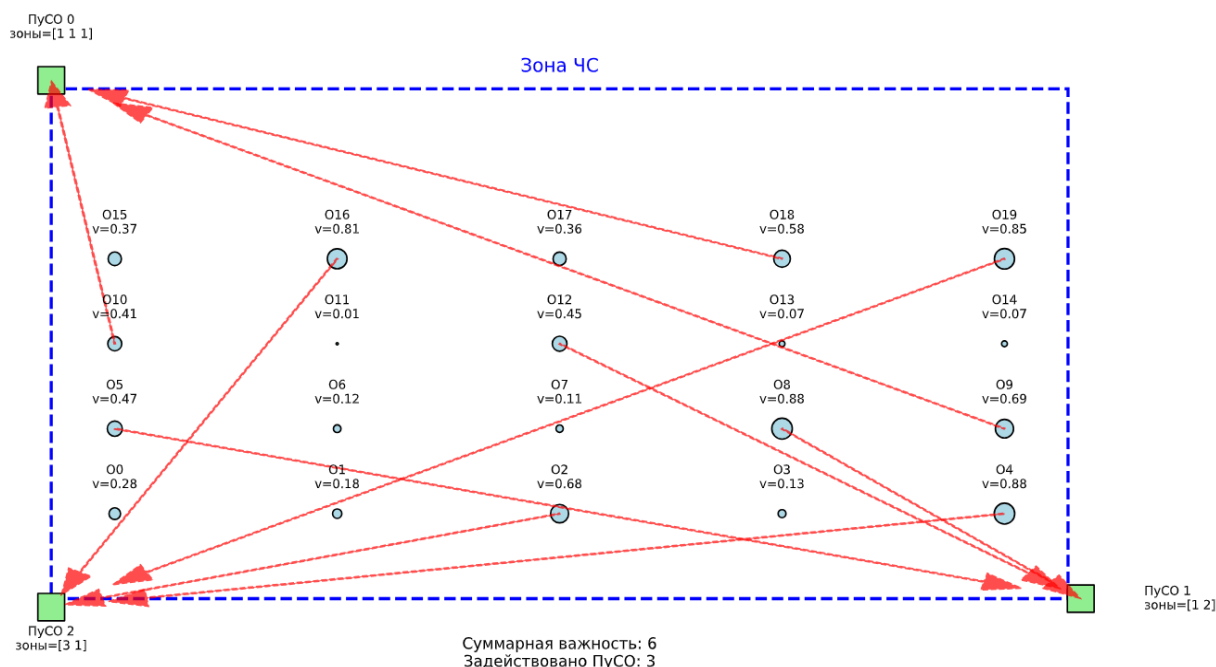


Рис. Схема эвакуации объектов из условного населенного пункта

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что при заданных исходных данных максимально возможная суммарная важность эвакуированных объектов составит 6 при общей суммарной важности 8,4, а стоимость 242 у. е.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В работе предложена математическая модель и численный метод для оптимизации эвакуации материальных ценностей из зоны ЧС с учетом важности.

Разработанный подход позволяет определить оптимальное количество и конфигурацию ПуСО, учитывая ограничения по времени, бюджету и пропускной способности.

Численный пример для аварии на радиационно-опасном объекте показал, что модель обеспечивает эффективное распределение ресурсов, достигая максимальной суммарной важности эвакуированных материальных ценностей. Предложенная в данном примере математическая модель и численный метод

является частным случаем. В реальной обстановке могут добавиться ограничения в виде наличия необходимого количества ресурсов:

- на проведение специальной обработки (вода, специальные растворы, технические средства, люди и т. п.);
- для эвакуации (тип, количество, техническое состояние транспортных средств, запасов ГСМ, технических средств для погрузки и т. п.).

Процесс вычисления величины θ_{ij} в данной работе раскрыт недостаточно, и в дальнейшем предполагается его описать, используя методы теории расписаний, а именно одностадийные системы. Это позволит реализовать программу, которая может быть использована в системе поддержки принятия решений при планировании эвакуации из зоны ЧС.

Список литературы / References

1. Меньших, В. В. Учёт синергетических эффектов при композиции автоматных моделей действий подразделений силовых ведомств, участвующих в ликвидации чрезвычайных обстоятельств / В. В. Меньших, В. В. Горлов, В. А. Никитенко // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 2. – С. 60–68.

Menshikh, V. V., Gorlov, V. V., Nikitenko, V. A. *Uchet sinergeticheskikh ehffektov pri kompozitsii avtomatnykh modeley deistviy podrazdeleniy silovykh vedomstv, uchastvuyushchikh v likvidatsii chrezvychainykh obstoyatelstv* [Consideration of synergetic effects in the composition of automatic models of actions of law enforcement agencies involved in the elimination of emergencies]. Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, 2023, no. 2, pp. 60-68. (In Russian)

2. Меньших, В. В. Оптимизация последовательности действий при совместном функционировании объектов или систем с учётом синергетических эффектов / В. В. Меньших, В. А. Никитенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 32–38. – DOI : 10.14529/mmph240104

Menshikh, V. V., Nikitenko, V. A. [The optimization of actions in the joint operation of objects or systems, taking into account synergetic effects]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 32-38. DOI : 10.14529/mmph240104 (In Russian)

3. Ульянкина, Е. Н. Решение задачи оптимального распределения ресурсов в военной сфере / Е. Н. Ульянкина, Г. О. Гаджиев, Ю. А. Глубоков // Вестник науки. – 2024. – Т. 1, № 8 (77). – С. 204–211.

Ulyankina, E. N., Gadzhiev, G. O., Glubokov, Yu. A. [Solving problem of optimal allocation of resources in military sphere]. Science bulletin, 2024, vol. 1, no. 8(77), pp. 204-211. (In Russian)

4. Горлов, В. В. Модель и алгоритм оптимизации решений по эвакуации при чрезвычайных ситуациях / В. В. Горлов, В. В. Меньших, В. А. Никитенко // Техносферная безопасность. – 2025. – № 2 (47). – С. 136–145.

Gorlov, V. V. Menshikh, V. V., Nikitenko, V. A. [Development of a model and algorithm for optimizing evacuation decisions in emergency situations]. Technosphere safety, 2025, no. 2(47), pp. 136–145. (In Russian)

5. Добрякова, Е. И. Обоснование целесообразности применения навигационных систем при вынужденной эвакуации / Е. И. Добрякова // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 84–93.

Dobryakova, E. I. [Feasibility of navigation systems application during emergency evacuation]. Scientific bulletin of the NII «Respirator», 2025, no. 2 (62), pp. 84-93. (In Russian)

6. Воропаев, Н. П. Модель определения рациональных маршрутов эвакуации населения, материальных и культурных ценностей при возникновении чрезвычайных ситуаций / Н. П. Воропаев, О. Н. Савчук, Д. Р. Коротеев // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2020. – № 1. – С. 51–59.

Voropaev, N. P., Savchuk, O. N., Koroteev, D. R. [Model of determination of rational routes of evacuation of the population, material and cultural values in the origin of emergency situations]. Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia», 2020, no. 1, pp. 51-59. (In Russian)

7. Петергерин, К. С. Алгоритм расчета путей эвакуации населения при ЧС / К. С. Петергерин, Е. А. Шейко // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2021. – № 2 (9). – С. 273–279.

Petergerin, K. S. Sheiko, E. A. [Algorithm of calculation of population evacuation roads]. Fire and technospheric safety: problems and ways of improvement, 2021, no. 2(9), pp. 273-279. (In Russian)

8. Асламова, В. С. Автоматизация расчета кратчайшего пути эвакуации населения на транспортной сети с циклом / В. С. Асламова, Е. А. Темникова, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4(56). – С. 138–144. – DOI : 10.26731/1813-9108.2017.4(56).138-144

Aslamova, V. S., Temnikova, E. A., Gozbenko, V. E. [Automating calculation of the shortest way of evacuation of population on the transport network with a cycle]. Modern technologies. System analysis. Modeling, 2017, no. 4(56), pp. 138-144. – DOI 10.26731/1813-9108.2017.4(56).138-144 (In Russian)

9. Авдеева, М. О. Разработка расширенной модели имитации сбора и эвакуации населения при чрезвычайной ситуации на базе по Anylogic / М. О. Авдеева, Д. И. Савельев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2020. – Т. 9, № 4(52). – С. 126–130.

Avdeeva, M. O., Savelev, D. I. [Development of an extended model for simulating the assemblage and evacuation of the population in an emergency situation based on Anylogic software]. XXI century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus, 2020, vol. 9, no. 4(52), pp. 126-130. (In Russian)

10. Меньших, В. В. Оптимизация распределения групп реагирования по объектам защиты / В. В. Меньших, Д. Ю. Калков // Информационная безопасность регионов. – 2014. – № 4(17). – С. 47–54.

Menshikh, V. V., Kalkov, D. Yu. [Optimizing the distribution of response teams according to protected venues]. Information security of the regions, 2014, no. 4(17), pp. 47-54. (In Russian)

11. Александров, А. А. Анализ и управление техногенными и природными рисками / А. А. Александров, В. И. Ларионов, С. П. Суцев. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2019. – 360 с. – EDN XWERLB

Aleksandrov, A. A., Larionov, V. I., Sushhev S. P. *Analiz i upravlenie texnogennymi i prirodnyimi riskami*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2019, 360 p. (In Russian)

12. Танаев В. С. Теория расписаний. Многостадийные системы / В. С. Танаев, Ю. Н. Сотсков, В. А. Струевич. – Москва : Наука, 1989. – 327 с.

Tanaev, V. S., Sotskov, Yu. N., Strusevich, V. A. *Teoriya raspisaniy. Mnogostadiynye sistemy*. Moscow, Nauka Publ., 1989, 327 p. (In Russian)

Дата поступления рукописи 20.10.2025
Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым

Vitaly Viktorovich Gorlov, *Cand. of Tech. Sci., Deputy Head of the Department;*
e-mail: Gorlovvv@mail.ru

Valery Vladimirovich Menshikh, *Dr. of Ph. and Math. Sci., Professor, Professor of the Department;*
e-mail: menshikh@list.ru

Vitaly Alekseevich Nikitenko, *Cand. of Tech. Sci., Senior Lecturer;*
e-mail: vitalijnikitenko82043@gmail.com

*Federal State Budgetary Educational Institute of Higher Education
 «Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation»
 394065, Voronezh, Patriotov Prosp., 53. Phone: +7 (495) 264-87-32*

OPTIMIZING THE EVACUATION OF MATERIAL VALUABLES IN EMERGENCY SITUATION, TAKING INTO ACCOUNT THEIR IMPORTANCE

Objective. Development of a numerical method for optimizing the evacuation of objects from an emergency situation (ES) zone, taking into account their importance.

Methods. Numerical analysis methods, nonlinear programming methods, and scheduling theory methods were used in the numerical implementation. The numpy and pulp libraries were also used in the Python programming language.

Results. A mathematical model has been developed that allows for determining the optimal number and location of special processing points, taking into account their parameters such as deployment costs and capacity, which affect the evacuation time. A numerical example is given for the case of an accident at a radiation-hazardous facility, demonstrating the effectiveness of the proposed approach.

Scientific novelty. A mathematical model and a numerical method have been developed for the optimal distribution of evacuated valuables among the PUSO, maximizing the total importance of the evacuated valuables.

Practical significance. The software implementation of this numerical method will allow the distribution of evacuated material assets to the PUSO in the event of emergencies with the maximum importance of the evacuated objects, given limited time and budget.

Keywords: *emergency situations; evacuation of the population; emergency safety; importance; optimization task.*

For citation: Gorlov V. V., Menshikh V. V., Nikitenko V. A. Optimizing the evacuation of material valuables in emergency situation, taking into account their importance. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 106-113. EDN PPFJRY

УДК 614.8:379.83

Сергей Владимирович Воронцов, первый зам. нач.; e-mail: zmei20084@rambler.ru
Главное управление «Национальный центр управления в кризисных ситуациях» МЧС России
121357, г. Москва, ул. Ватутина, 1. Тел.: +7 (495) 983-79-01

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ГИБЕЛИ
ТУРИСТОВ-ЭКСТРЕМАЛОВ В ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ
И НЕЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ГРУППАХ**

Цель. Повышение безопасности туристов-экстремалов за счёт обязательной регистрации туристических групп в территориальных органах МЧС России.

Материалы и методы. Использованы статистические данные МЧС России о количестве туристов-экстремалов в России за период с 2020 до 2024 г. и количестве их погибших за эти же годы. Эти годы выбраны потому, что руководство России в целом и МЧС России в частности, стали уделять развитию внутреннего туризма повышенное внимание.

Результаты. Проведена сравнительная оценка вероятности гибели туристов-экстремалов в зарегистрированных и незарегистрированных группах. Показано, что регистрация туристических групп в МЧС России снижает вероятность гибели туриста-экстремала в два и более раза.

Научная новизна. Впервые проведен анализ состояния дел в области внутреннего экстремального туризма России, показано, что в настоящее время сфера экстремального туризма в России развивается быстрее, чем создается соответствующая инфраструктура. Установлено, что одной из важнейших проблем экстремального туризма в России являются высокие риски гибели людей. Показано, что актуальный способ снижения рисков связан с регистрацией в МЧС России туристов, отправляющихся в экстремальный поход.

Практическая значимость. Снижение количества погибших туристов-экстремалов за счёт прохождения процедуры регистрации.

Ключевые слова: *вероятность; гибель; гипотеза; поисково-спасательная операция; риск; турист-экстремал.*

Для цитирования: *Воронцов С. В. Сравнительная оценка вероятности гибели туристов-экстремалов в зарегистрированных и незарегистрированных группах // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 114–125. – EDN VLHGGE*

Постановка проблемы. В соответствии с Федеральным законом¹ и Указами Президента^{2, 3} важнейшим приоритетом России является обеспечение безопасности ее граждан. Одной из задач, вытекающих из этих документов, является обеспечение безопасности туризма⁴. Безопасность туризма – это состояние экономики и социальной сферы, при котором имеются условия для удовлетворения потребностей граждан в основных видах туристических услуг, а государство гарантирует предоставление качественных услуг, сохранение жизни и здоровья туристов⁵.

¹ Федеральный закон от 30.11.2024 № 436-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации и статью 44 Федерального закона об общих принципах организации публичной власти в субъектах Российской Федерации»

² Указ Президента РФ от 02.07.2021 № 400 «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации»

³ Указ Президента Российской Федерации от 11.01.2018 № 12 «Об утверждении основ государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года»

⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 03.03.2017 № 252 «О некоторых вопросах обеспечения безопасности туризма в Российской Федерации»

⁵ ГОСТ Р 50644-2009 «Туристские услуги. Требования по обеспечению безопасности туристов»

По данным Всемирной туристской организации ООН (ЮНВТО) в 2019 г. туризм стал третьей по величине категорией экспорта в мире после топлива и химикатов. В 2023 г. доля туризма в мировом ВВП составила 9,1 %, а в России – 2,8 % [1]. Такая диспропорция явно не соответствует потенциальным возможностям России. В связи с этим возникает острая потребность в создании благоприятных условий, которые позволят значительно ускорить развитие внутреннего туризма в стране. Поэтому с 01.01.2025 г. по 31.01.2030 г. в России реализуется национальный проект «Туризм и гостеприимство»⁶.

Одним из наиболее быстрорастущих, а вместе с тем наиболее дорогостоящих и опасных видов туризма в мире и в России является экстремальный (приключенческий) туризм [2]. Если во времена возникновения экстремального туризма им увлекалась в основном состоятельная молодежь, то в настоящее время он становится неотъемлемой частью досуга все большего количества людей разных возрастов и достатка. Экстремальный (приключенческий) туризм включает множество направлений, однако чаще всего говорят о пяти его разновидностях [3]: водный, воздушный, наземный, горный и экзотический, которые сопряжены с разрешением противоречия между риском для туриста получить травму или погибнуть и шансом остаться живым и невредимым. В настоящее время риски экстремального туризма в России неоправданно высоки. Существует несколько подходов к снижению рисков экстремального туризма [4]. В России один из наиболее важных подходов связан с регистрацией туристических групп в МЧС России⁷.

Правительство России в 2017 г. обязало туристов и организаторов туристических походов сообщать территориальным органам МЧС России о выходе на маршрут по труднодоступной местности не менее чем за десять дней до начала похода. Тем не менее, в настоящее время в России на туристических маршрутах регистрируются далеко не все туристические группы. Это объясняется тем, что регистрация требует определенных материальных затрат и времени. В связи с этим возникает вопрос о том, какой эффект дает регистрация и во что она обходится.

Анализ последних исследований. В последние годы тема безопасности экстремального туризма находится в фокусе внимания учёных, регуляторов и организаторов туристической индустрии. Рост популярности этого вида деятельности сопровождается увеличением числа чрезвычайных ситуаций (ЧС), что требует современных подходов к их предупреждению. Анализ ряда научных исследований [5–8] позволяет выделить несколько основных направлений и тенденций:

- **новые риски и их систематизация** – создание динамических карт рисков с учётом конкретного региона, сезона и вида активности;
- **правовое и организационное регулирование** – совершенствование законодательства, стандартизация услуг и организация межведомственного взаимодействия;

⁶ Национальный проект «Туризм и гостеприимство» URL: <http://government.ru/rugovclassifier/920/about/>

⁷ Приказ МЧС России № 42 от 30.01.2019 «Об утверждении Порядка информирования территориальных органов МЧС России о маршрутах передвижения, проходящих по труднодоступной местности, водным, горным, спелеологическим и другим объектам, связанных с повышенным риском для жизни, причинением вреда здоровью туристов (экскурсантов) и их имуществу, и Порядка хранения, использования и снятия с учета территориальными органами МЧС России информации о маршрутах передвижения, проходящих по труднодоступной местности, водным, горным, спелеологическим и другим объектам, связанных с повышенным риском для жизни, причинением вреда здоровью туристов (экскурсантов) и их имуществу»

- **технологии для предупреждения ЧС** – создание информационных систем для регистрации маршрутов, применения искусственного интеллекта для прогнозирования аварийных ситуаций на популярных маршрутах;
- **подготовка кадров и информирование туристов** – психологическая подготовка туристов и культура безопасности;
- **экономические механизмы** – страхование и финансирование спасательных операций.

Цель исследования – повышение безопасности туристов-экстремалов за счёт обязательной регистрации туристических групп в территориальных органах МЧС России.

Материалы и методы исследований. Для оценки вероятности гибели туристов в группах, с которыми проводились поисково-спасательные операции (ПСО), использованы данные внутренних документов Национального центра управления кризисными ситуациями (НЦУКС) МЧС России о количестве туристов и количестве погибших туристов в зарегистрированных и незарегистрированных группах (табл. 1).

Таблица 1

Данные по поисково-спасательным операциям МЧС России с зарегистрированными и незарегистрированными группами туристов

Показатели	Вид группы	Год					Всего за период
		2020	2021	2022	2023	2024	
Число ПСО	З	122	156	130	467	33	908
	НЗ	121	125	142	239	77	704
Число туристов	З	7444	15218	10826	1397	299	35184
	НЗ	3316	5185	6141	867	341	15850
Из них погибло	З	15	33	23	5	8	84
	НЗ	15	31	33	15	36	130
Частота гибели	З	0,00202	0,00217	0,00213	0,00358	0,02676	0,00239
	НЗ	0,00452	0,00598	0,00543	0,01732	0,10557	0,00820

Примечание. З – зарегистрированная; НЗ – незарегистрированная

В качестве методов исследования использованы основные положения теории вероятности и математической статистики (теория проверки статистических гипотез) [9].

Постановка задачи исследования. Пусть в течение заданного отрезка времени (например, в течение года) в МЧС России поступали просьбы об организации ПСО от множества зарегистрированных и незарегистрированных групп туристов. В ходе ПСО каждый турист может погибнуть или быть спасённым.

Обозначим:

n_1 , n_2 – количество туристов, с которыми проводились ПСО, в незарегистрированных и зарегистрированных группах, соответственно,

m_1, m_2 – количество погибших туристов, с которыми проводились ПСО, в незарегистрированных и зарегистрированных группах, соответственно.

Тогда относительная частота гибели туриста в незарегистрированных (w_1) и зарегистрированных (w_2) группах равна соответственно

$$w_1 = \frac{m_1}{n_1}, \quad (1)$$

$$w_2 = \frac{m_2}{n_2}. \quad (2)$$

Обозначим:

p_1, p_2 – вероятность гибели туриста в незарегистрированных и зарегистрированных группах, соответственно.

Допустим, что $p_1 \approx w_1, p_2 \approx w_2$. При заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ проверим нулевую гипотезу:

$$H_0 : p_1 = p_2 = p.$$

при альтернативной гипотезе

$$H_1 : p_1 > p_2.$$

Задачу проверки нулевой и альтернативной гипотез сформулируем следующим образом: установить значимость различия относительных частот w_1 и w_2 .

Критерий проверки нулевой гипотезы имеет вид

$$U = \frac{\frac{M_1}{n_1} - \frac{M_2}{n_2}}{\sqrt{p(1-p)\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}, \quad (3)$$

где M_1 и M_2 случайные числа.

Показано, что при справедливости нулевой гипотезы, случайную величину U можно принять распределенной нормально с математическим ожиданием, равным нулю ($M[U] = 0$), и среднеквадратическим отклонением, равным единице ($\sigma[U] = 1$) [9].

В формуле (3) вероятность p неизвестна. Заменяем ее оценкой наибольшего правдоподобия $p^* = (m_1 + m_2) / (n_1 + n_2)$. Заменяем случайные величины M_1 и M_2 на m_1 и m_2 . В результате получим формулу для вычисления наблюдаемого значения критерия:

$$U_{\text{набл}} = \frac{\frac{m_1}{n_1} - \frac{m_2}{n_2}}{\sqrt{\left(\frac{m_1+m_2}{n_1+n_2}\right)\left(1 - \frac{m_1+m_2}{n_1+n_2}\right)\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}. \quad (4)$$

Значения $U_{\text{набл}}$ для изучаемого периода приведены в табл. 2.

Поскольку альтернативная гипотеза имеет вид $H_1 : p_1 > p_2$, критическая область правосторонняя. По таблице функции Лапласа для $\alpha = 0,05$ получим $Z_{\text{кр}} = 1,64$. Все значения $U_{\text{набл}}$ больше, чем 1,64 (табл. 2).

Таким образом, основная гипотеза о равенстве вероятностей гибели для зарегистрированных и незарегистрированных туристов не подтверждается. Следовательно, имеет место альтернативная гипотеза, в соответствии с которой вероятность гибели туристов в незарегистрированных группах значимо больше, чем в зарегистрированных.

Таблица 2

Значения критерия $U_{\text{набл}}$ за 2020–2024 гг. для ПСО

Показатель	Год					2020–2024
	2020	2021	2022	2023	2024	
$U_{\text{набл}}$	2,2786	4,2375	3,5461	3,3918	3,9316	9,4059

Результаты исследований. Для более полного представления результатов исследования необходимо оценить вероятность гибели и спасения туристов-экстремалов во всех зарегистрированных и незарегистрированных группах. Выше с помощью теории проверки статистических гипотез доказано, что вероятность гибели туристов в зарегистрированных группах, с которыми проводились ПСО, значимо ниже вероятности спасения и гибели туристов в незарегистрированных группах, с которыми также проведены ПСО.

Однако представляет интерес ответ на вопрос, каковы истинные значения вероятностей для всех зарегистрированных и всех незарегистрированных групп, потому что только на основании этих показателей можно оценить пользу регистрации в МЧС России туристов-экстремалов.

Значения вероятностей гибели туристов в зарегистрированных группах ($P_{\text{гиб}}^3$) можно получить в том случае, если известно общее количество туристов (N^3), а также количество погибших ($N_{\text{гиб}}^3$) во всех этих группах:

$$P_{\text{гиб}}^3 = \frac{N_{\text{гиб}}^3}{N^3}, \quad (5)$$

Будем считать, что количество погибших туристов во всех зарегистрированных группах равно количеству погибших туристов в зарегистрированных группах, в которых проводились ПСО (табл. 1). Тогда $N_{\text{гиб}}^{3p} = N_{\text{гиб}}^{3\text{ПСО}}$. Общее количество зарегистрированных туристов-экстремалов за 2020–2024 гг. возьмем из раздела «Деятельность» → «Статистика» официального сайта МЧС России, эти же данные можно взять из внутренних документов НЦУКС. Таким образом, нам известно общее количество туристов-экстремалов и количество погибших туристов-экстремалов в зарегистрированных группах. По формуле (4) рассчитаем вероятность гибели зарегистрированных туристов-экстремалов (табл. 3, строка 3).

Для того, чтобы вычислить вероятность гибели туристов-экстремалов в незарегистрированных группах ($P_{\text{гиб}}^{\text{H3}}$), необходимо знать общее количество туристов (N^{H3}) и количество погибших туристов ($N_{\text{гиб}}^{\text{H3}}$) в этих группах:

$$P_{\text{гиб}}^{\text{H3}} = \frac{N_{\text{гиб}}^{\text{H3}}}{N^{\text{H3}}}. \quad (6)$$

Таблица 3
Сравнительный анализ показателей риска зарегистрированных и незарегистрированных в МЧС России групп экстремального туризма

№	Показатели риска экстремального туризма	Годы					2020–2024
		2020	2021	2022	2023	2024	
1	Количество зарегистрированных туристов-экстремалов	84286	205101	249106	268252	356498	1163243
2	Количество погибших зарегистрированных туристов-экстремалов	15	33	23	5	8	84
3	Вероятность гибели зарегистрированного туриста-экстремала	0,000178	0,000161	0,0000923	0,0000186	0,0000224	0,0000722
4	Минимальная доля незарегистрированных туристов-экстремалов	70 %	70 %	80 %	50 %	60 %	66 %
5	Максимальная доля незарегистрированных туристов-экстремалов	90 %	85 %	80 %	80 %	80 %	83 %
6	Минимальное количество незарегистрированных туристов-экстремалов	196667	478569	996424	268252	534747	2258060
7	Максимальное количество незарегистрированных туристов-экстремалов	758574	1162239	996424	1073008	1425992	5679363
8	Минимальное количество погибших незарегистрированных туристов-экстремалов	120	125	120	110	110	585
9	Максимальное количество погибших незарегистрированных туристов-экстремалов	120	125	130	120	125	620
10	Мин/мин вероятность гибели незарегистрированного туриста-экстремала (Показатель №8/Показатель №6)	0,00061017	0,000261	0,00012	0,00041	0,000206	0,00025907
11	Мин/макс вероятность гибели незарегистрированного туриста-экстремала (Показатель №8/Показатель №7)	0,00015819	0,000108	0,00012	0,000103	0,0000771	0,000103
12	Макс/мин вероятность гибели незарегистрированного туриста-экстремала (Показатель №9/Показатель №6)	0,00061017	0,000261	0,00013	0,000447	0,000234	0,00027457
13	Макс/макс вероятность гибели незарегистрированного туриста-экстремала (Показатель №9/Показатель №7)	0,00015819	0,000108	0,00013	0,000112	0,0000877	0,00010917

Таблица 4

Сравнительный анализ вероятностей спасения и гибели зарегистрированных туристов и математических ожиданий вероятностей спасения и гибели незарегистрированных туристов

Показатели риска экстремального туризма	Годы					2020-2024
	2020	2021	2022	2023	2024	
Количество зарегистрированных туристов-экстремалов	84286	205101	249106	268252	356498	1163243
Количество погибших зарегистрированных туристов-экстремалов	15	33	23	5	8	84
Вероятность гибели зарегистрированного туриста-экстремала	0,00017797	0,000161	0,0000923	0,0000186	0,0000224	0,000072212
Математическое ожидание доли незарегистрированных туристов-экстремалов	80 %	78 %	80 %	65 %	70 %	75 %
Математическое ожидание количества незарегистрированных туристов-экстремалов	337144	706459	996424	498182,3	831828,7	3398494,25
Математическое ожидание количества погибших незарегистрированных туристов-экстремалов	120	125	125	115	117,5	602,5
Вероятность гибели незарегистрированных туристов-экстремалов	0,000355931	0,000177	0,000125	0,000231	0,000141	0,000177
Отношение вероятности гибели зарегистрированных туристов к вероятности гибели незарегистрированных	1,99994943	1,099379	1,35428	12,41935	6,294643	2,451116

Однако точные статистические данные о количестве туристов во всех незарегистрированных группах и о количестве погибших в этих группах неизвестны, поскольку в МЧС России регистрировались не все группы и ПСО проводились не во всех незарегистрированных группах.

Поэтому оценки величин $N^{\text{НЗ}}$, $N_{\text{гиб}}^{\text{НЗ}}$ будем осуществлять косвенными методами, обобщая данные из многих источников, в том числе с помощью интеллектуальных сетей Deep Seek и Алиса. Последняя сеть, как известно, работает на самой мощной модели Яндекс – YandexGPT 5.1 Pro. По мнению ряда экспертов, точность оценок экстремального туризма, получаемых с помощью интеллектуальных сетей, составляет 30–50 %. Технология вычисления этих оценок применительно к нашей задаче:

1. В строках 4 и 5 (табл. 3) приведены нижняя и верхняя границы долей количества незарегистрированных туристов-экстремалов. Обозначим нижнюю границу интервала символом α , %, а верхнюю – символом β , %. Тогда нижняя оценка количества незарегистрированных туристов может быть вычислена по формуле:

$$N_{\text{ниж}}^{\text{НЗ}} = \frac{N^3 \cdot \alpha \%}{100 \% - \alpha \%},$$

а верхняя – по формуле:

$$N_{\text{вер}}^{\text{НЗ}} = \frac{N^3 \cdot \beta \%}{100 \% - \beta \%}.$$

Результаты вычислений приведены в строках 6 и 7 (табл. 3).

2. В строках 8–11 (табл. 3) приведены вероятности гибели туристов-экстремалов, рассчитанные по формулам:

$$P(N_{\text{гиб}}^{\text{ниж НЗ}}, N_{\text{ниж}}^{\text{НЗ}}) = N_{\text{гиб}}^{\text{ниж НЗ}} / N_{\text{ниж}}^{\text{НЗ}},$$

$$P(N_{\text{гиб}}^{\text{ниж НЗ}}, N_{\text{вер}}^{\text{НЗ}}) = N_{\text{гиб}}^{\text{ниж НЗ}} / N_{\text{вер}}^{\text{НЗ}},$$

$$P(N_{\text{гиб}}^{\text{вер НЗ}}, N_{\text{ниж}}^{\text{НЗ}}) = N_{\text{гиб}}^{\text{вер НЗ}} / N_{\text{ниж}}^{\text{НЗ}},$$

$$P(N_{\text{гиб}}^{\text{вер НЗ}}, N_{\text{вер}}^{\text{НЗ}}) = N_{\text{гиб}}^{\text{вер НЗ}} / N_{\text{вер}}^{\text{НЗ}}.$$

Анализ результатов (табл. 3) показывает, что вероятность гибели незарегистрированных туристов больше, чем вероятность гибели зарегистрированных при всех граничных значениях количества незарегистрированных туристов и количества погибших незарегистрированных туристов за исключением четырех случаев за 2020 и 2021 гг.: два случая, при которых количество незарегистрированных погибших туристов минимальное, а общее количество незарегистрированных туристов максимальное; два случая, при которых количество погибших туристов и общее количество незарегистрированных туристов максимальное. Эти случаи можно объяснить эпидемией вирусной инфекции COVID-19, охватившей мир в 2020–2021 гг. Для этих лет верхняя граница общего количества незарегистрированных туристов на самом деле должна быть ниже той, которая получена с помощью интеллектуальных сетей.

Результаты (табл. 3), дают полную картину разностей между рисками гибели для зарегистрированных и незарегистрированных туристов. В частности, они показывают, что в подавляющем большинстве случаев риск гибели

зарегистрированных туристов меньше, чем незарегистрированных. Однако они не дают возможности определить разность между вероятностями гибели для зарегистрированных и для незарегистрированных туристов в целом. Эту разность можно рассчитать, заменив интервалы предельных значений случайных величин (табл. 3) их математическими ожиданиями.

Как известно, каждая случайная величина, заданная пределами и наиболее вероятным значением (модой), распределена по треугольному закону [10], а её математическое ожидание всегда находится между минимальным (a) и максимальным (b) значением. Будем считать, что мода совпадает с серединой интервала между a и b . В этом случае математическое ожидание будет равно:

$$MO[x] = \frac{a+b}{2}. \quad (7)$$

Заменим каждые два предела каждой случайной величины (табл. 3) на математическое ожидание, вычисленное по формуле (7). В этом случае получим следующие данные (табл. 4).

Оценим, насколько значимой является разность вероятностей гибели между зарегистрированными и незарегистрированными туристами. Для этого воспользуемся формулой (4) для оценки $U_{\text{набл}}$, заменив в ней m_1 и m_2 , n_1 и n_2 на математическое ожидание количества погибших незарегистрированных и зарегистрированных туристов-экстремалов, математическое ожидание количества незарегистрированных и зарегистрированных туристов-экстремалов из табл. 4 соответственно. Результаты вычислений приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения критерия $U_{\text{набл}}$ за 2020–2024 гг.

Показатель	Год					2020–2024
	2020	2021	2022	2023	2024	
$U_{\text{набл}}$	2,5824	0,4859	1,3564	7,0820	5,7759	7,9741

Поскольку конкурирующая гипотеза имеет вид $H_1 : p_1 > p_2$, критическая область правосторонняя. Как и в предыдущем случае для $\alpha = 0,05$ по таблице функции Лапласа получим $Z_{\text{кр}} = 1,64$. Значения $U_{\text{набл}}$ для 2020, 2023 и 2024 гг., а также для интервала в пять лет от 2020 до 2024 г. больше, чем 1,64 (табл. 5). Таким образом, основная гипотеза о равенстве вероятностей гибели для зарегистрированных и незарегистрированных туристов для этих лет не подтверждается. Следовательно, имеет место альтернативная гипотеза: вероятность гибели туристов в незарегистрированных группах значимо больше, чем в зарегистрированных группах. Из последней строки таблицы 4 следует, что отношение вероятности гибели незарегистрированного туриста значимо больше, чем зарегистрированного, и за 2020–2024 гг. составляет в среднем 2,45 раза.

Выводы. В результате проведения сравнительной оценки вероятности гибели туристов-экстремалов в зарегистрированных и незарегистрированных группах были сделаны следующие выводы:

1. Наиболее важная проблема, на решение которой направлены усилия организаций, занимающихся экстремальным туризмом, – проблема снижения риска.

2. Эффективный путь снижения рисков связан с регистрацией в МЧС России туристических групп, выходящих в экстремальные походы.

3. Регистрация групп позволяет снизить вероятность гибели туристов-экстремалов в два и более раза.

Полученные результаты имеют высокий уровень практической значимости для Главных управлений МЧС России по субъектам РФ, которые осуществляют регистрацию туристических групп и проведение поисково-спасательных работ в случае возникновения нештатных ситуаций [11].

В рамках направлений дальнейших исследований предлагается использовать полученные результаты при разработке и практическом внедрении в деятельность структурных подразделений МЧС России научно-методических средств поддержки принятия управленческих решений при прогнозировании возникновения нештатных ситуаций с туристическими группами и проведения комплекса превентивных мероприятий [12].

Список литературы/ References

1. Статистический бюллетень Росстата. К всемирному дню туризма – 2024. [Электронный ресурс]. – URL: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/turism_2024.pdf (дата обращения: 10.11.2025)

Rosstat Statistical Bulletin. For World Tourism Day 2024. Available at: URL: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/turism_2024.pdf (accessed 10/11/2025). (In Russian)

2. Яцуценко, В. Н. Актуальные проблемы обеспечения безопасности экстремального туризма и конструктивные подходы к их решению / В. Н. Яцуценко, С. В. Воронцов, Г. Н. Заводсков // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 1(69). – С. 8–24.

Yatsutsenko V. N., Vorontsov S. V., Zavodskov G. N. *Aktualnye problemy obespecheniya bezopasnosti ekstremalnogo turizma i konstruktivnye podkhody k ikh resheniyu* [Actual problems of ensuring safety of extreme tourism and constructive approaches to their solution]. Problems of risk management in the technosphere, 2024, no. 1 (69). pp. 8-24. (In Russian)

3. Воронцов, С. В. Оценка влияния регистрации туристических групп в МЧС России на безопасность экстремального туризма / С. В. Воронцов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2025. – № 1(64). – С. 24–33.

3. Vorontsov S. V. *Ocenka vliyaniya registratsii turisticheskikh grupp v MChS Rossii na bezopasnost ekstremalnogo turizma* [Assessment of the impact of registration of tourist groups in the Ministry of Emergency Situations of Russia on the safety of extreme tourism]. Scientific and educational problems of civil defense, 2025. no. 1 (64). pp. 24-33. (In Russian)

4. Новиков, С. С. Анализ причин возникновения чрезвычайных ситуаций и комплекс мероприятий по их предотвращению / С. С. Новиков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 7-8(85-86). – С. 47–51.

Novikov S. S. *Analiz prichin vozniknoveniya chrezvychajnykh situatsiy i kompleks meropriyatij po ix predotvrashheniyu* [Analysis of the causes of emergencies and a set of measures to prevent them]. Issues of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism, 2015, no. 7-8 (85-86), pp. 47-51. (In Russian)

5. Лиханова, В. В. Обеспечение безопасности туристов в условиях пандемии на примере Китая и Турции / В. В. Лиханова, М. П. Титова // Туризм: право и экономика. – 2022. – № 3. – С. 20–25. DOI : 10.18572/1813-1212-2022-3-20-25.

Likhanova, V. V., Titova, M. P. *Obespechenie bezopasnosti turistov v usloviyakh pandemii na primere Kitaya i Turcii* [Ensuring the safety of tourists in a pandemic: the example of China and Turkey]. Tourism: law and economics, 2022, no. 3, pp. 20-25. DOI 10.18572/1813-1212-2022-3-20-25. (In Russian)

6. Лиханова, В. В. Исследование современного состояния безопасности в туризме / В. В. Лиханова // Проблемы и перспективы развития туризма в Российской Федерации : Сборник научных трудов VII Всероссийской конференции с международным участием, Севастополь, 01 августа 2022 года. – Симферополь: Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, 2022. – С. 41–44.

Likhanova, V. V. *Issledovanie sovremennogo sostoyaniya bezopasnosti v turizme* [Research of the current state of security in tourism]. Collection of scientific papers of the VII All-Russian conference with international participation, Sevastopol, August 1, 2022. Simferopol: Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky Publ., 2022. pp. 41-44. (In Russian)

7. Morgan, D. (2016) Adventure tourism. In: Jafari, J., Xiao, H. (eds) Encyclopedia of Tourism. Springer, Cham Morgan, D. (2016) Adventure tourism. In: Jafari, J., Xiao, H. (eds) Encyclopedia of Tourism. Springer, Cham. (In English)

8. Some Principles and Characteristics of safety in tourism/ April 2023 Economics and education 24(2): 354-358 Nurislam Tukhliev Tukhliev. (In English)

9. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : Учебник / В. Е. Гмурман. – 12-е изд. – Москва : Издательство Юрайт, 2018. – 479 с.

Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory and Mathematical Statistics: Textbook. 12th ed]. Moscow, Yurait Publ., 2018, 479 p. (In Russian)

10. Золотухина, Е. С. Высшая математика: теория вероятностей и математическая статистика / Е. С. Золотухина, Н. В. Сычева. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2022. – 92 с. – ISBN 978-5-907570-42-9.

Zolotukhina E. S., Sycheva. N. V. *Vysshaya matematika: teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Higher Mathematics: Probability Theory and Mathematical Statistics]. Bryansk: Bryansk State Technical University Publ., 2022, 92 p. ISBN 978-5-907570-42-9. (In Russian)

11. Колеров, Д. А. Методика оценки деятельности Главных управлений МЧС России на основе статистических показателей / Д. А. Колеров, Г. Н. Заводсков, С. В. Воронин // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2024. – Т. 32, № 1. – С. 38–47. – DOI :10.34987/vestnik.sibpsa.2024.66.59.005.

Kolero, D. A., Zavadskov, G. N., Voronin, S. V. *Metodika ocenki deyatel'nosti Glavnykh upravleniy MChS Rossii na osnove statisticheskikh pokazateley* [Methodology for assessing the activities of the Main Directorates of the Ministry of Emergency Situations of Russia based on statistical indicators]. Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2024, vol. 32, no. 1. pp.38-47. DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.66.59.005. (In Russian)

12. Куватов, В. И. Метод интеллектуальной поддержки управленческих решений с помощью ассоциативных связей при прогнозировании чрезвычайных ситуаций / В. И. Куватов, А. А. Горбунов, Д. А. Колеров // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2022. – № 2. – С. 116–124.

Kuvatov, V. I., Gorbunov, A. A., Kolerov, D. A. *Metod intellektual'noy podderzhki upravlencheskikh resheniy s pomoshhyu associativnykh svyazey pri prognozirovanii chrezvychaynykh situatsiy* [Method of intellectual support of management decisions using associative links in forecasting emergency situations]. Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of state fire service of EMERCOM of Russia», 2022, no. 2, pp. 116-124. (In Russian)

Дата поступления рукописи 12.12.2025
Рекомендовано к публикации профессором кафедры
системного анализа и антикризисного управления
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»,
д-ром техн. наук, профессором В. И. Куватовым

*Sergey Vladimirovich Vorontsov, Deputy Chief; e-mail: zmei20084@rambler.ru
National Crisis Management Center of the Russian Emergencies Ministry
121357, Moscow, Vatutina St., 1. Phone: +7 (495) 983-79-01*

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF DEATH OF EXTREME TOURISTS IN REGISTERED AND UNREGISTERED GROUPS

Objective. The aim of this study is to improve the safety of extreme tourists by mandating the registration of tourist groups with the local offices of the Ministry of Emergency Situations of Russia.

Materials and methods. This article uses statistical data from the Ministry of Emergency Situations of Russia on the number of extreme tourists in Russia for the period from 2020 to 2024 and on the number of extreme tourist fatalities during these same years. These years were chosen because the Russian leadership in general, and the Ministry of Emergency Situations in particular, has begun to pay increased attention to the development of domestic tourism.

Results. A comparative assessment of the likelihood of extreme tourist fatalities in registered and unregistered groups was conducted. The article shows that registering tourist groups with the Ministry of Emergency Situations of Russia reduces the likelihood of extreme tourist fatalities by two or more times.

Scientific novelty. This is the first analysis of the state of affairs in the field of domestic extreme tourism in Russia. The analysis shows that the extreme tourism industry in Russia is currently developing faster than the creation of the corresponding infrastructure. It has been established that one of the most significant problems associated with extreme tourism in Russia is the high risk of fatalities. The article demonstrates that a relevant method for reducing these risks involves registering tourists planning extreme trips with the Russian Ministry of Emergency Situations.

Practical significance. The practical significance of the obtained results lies in the reduction of fatalities among extreme tourists through the registration procedure.

Keywords: probability, death, hypothesis, search and rescue operation, risk, extreme tourist.

For citation: Vorontsov S. V. Comparative assessment of the probability of death of extreme tourists in registered and unregistered groups. *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 114-125. EDN VLHGGE

УДК [614.841.45:351.853.1]:699.81

Владимир Альбертович Матвеев, аспирант; e-mail: matveev.vladimir0@mail.ru

Лариса Александровна Ничкова, канд. техн. наук, зав. кафедрой; e-mail: nichkova@mail.sevsu.ru

Сергей Михайлович Рыкунов, ассистент кафедры; e-mail: smrykunov@mail.sevsu.ru

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»*

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. Тел.: +7 (978) 669-99-92

**ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ДВЕРНЫХ БЛОКОВ
НА ПУТЯХ ЭВАКУАЦИИ В ИСТОРИЧЕСКИХ ЗДАНИЯХ**

Цель. Разработка способов повышения огнестойкости деревянных блоков, расположенных на путях эвакуации в исторических зданиях объектов культурного наследия, с учетом охранного статуса конструкций.

Методы. Анализ требований нормативной документации: ФЗ–73¹, СП 1.13130.2020²; проведение испытания огнестойкости образцов не обработанных конструкций; выбор технологии повышения огнестойкости в зависимости от «предмета охраны».

Результаты. Исследована огнестойкость не обработанных и обработанных образцов деревянных дверных блоков. В зависимости от охранного статуса объекта предложены способы повышения огнестойкости дверных блоков на путях эвакуации.

Научная новизна. Впервые сформулированы практические методы повышения огнестойкости дверных блоков на путях эвакуации с учетом исторического статуса здания.

Практическая значимость. Рассмотрены типовые формулировки, устанавливающие охранный статус конструкции здания, исходя из которых предложены методы повышения огнестойкости дверных блоков на путях эвакуации. Их применение позволит собственникам и организациям, эксплуатирующим исторические здания, выполнить требования нормативной документации с сохранением охранного статуса конструкций.

Ключевые слова: объект культурного наследия; пожарная безопасность; историческая дверь; огнестойкость; предмет охраны; огнезащитная обработка.

Для цитирования: Матвеев В. А., Ничкова Л. А., Рыкунов С. М. Повышение огнестойкости дверных блоков на путях эвакуации в исторических зданиях // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 126–133. – EDN WBUXYI

Постановка проблемы. Обеспечение пожарной безопасности объектов культурного наследия является актуальным вопросом г. Севастополя и Республики Крым. Так, к объектам культурного наследия г. Севастополя относится порядка 941 объекта регионального значения и 247 объектов федерального значения, в то же время на территории Республики Крым расположено 4933 объекта регионального значения и 372 объекта федерального значения [1, 2]. Основной сложностью эксплуатации является неудовлетворительное техническое состояние существующих и выявленных объектов культурного наследия. Работы по сохранению объектов культурного наследия в указанных субъектах носят плановый характер. Однако помимо сохранения объектов культурного наследия, также важной является задача

¹ Федеральный закон от 25.06.2002 N 73-ФЗ (ред. от 21.12.2021) «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации». [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/ (дата обращения: 21.01.2026).

² Свод правил СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы : дата введения 2020.09.19 / Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – Москва : Стандартинформ, 2020. [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/565248961> (дата обращения: 13.02.2026).

соответствия их современным нормам и требованиям нормативной документации по пожарной безопасности и требований ФЗ-73.

Анализ последних исследований. В работах [3–6] рассмотрены составы повышения огнестойкости деревянных конструкций и предложена пропитка на основе мраморной крошки. Имеется также ряд практических разработок огнестойких дверных блоков³ и дверных полотен⁴, в которых деревянные полотна пропитывают огнезащитными составами, а в коробке размещают вспучивающиеся материалы. Однако огнестойкость данных конструкций не установлена.

В материалах [7] исследуют процессы термодеструкции исторических материалов деревянных полов, установлено, что в образцах состаренной древесины температура деструкции ниже и меньше скорость потери массы.

Существующие исследования и практические разработки повышения огнестойкости деревянных конструкций носят локальный характер. Вопрос повышения огнестойкости дверных блоков в исторических зданиях на сегодняшний день проработан недостаточно.

Цель исследования – разработка способов повышения огнестойкости деревянных блоков, расположенных на путях эвакуации в исторических зданиях объектов культурного наследия, с учетом охранного статуса конструкций.

Результаты исследования. Исследования огнестойкости деревянных блоков проведены на объектах ФГБУК «Музей-заповедник героической обороны Севастополя», в состав которого входит ряд объектов культурного наследия федерального и регионального значения. В рамках выполнения работ по сохранению и приспособлению объекта для современного использования рассматривали вопросы приведения существующих зданий к требованиям существующей нормативной документации.

На основе анализа разрешительной документации^{5, 6} установлено, что в предмет охраны попадают габариты, форма и расположение дверных проемов; характер отделки и колористические решения интерьера; материал и рисунок деревянного заполнения.

В соответствии с требованиями свода правил СП 1.13130.2020: «эвакуационные выходы из помещений непосредственно на лестничную клетку допускается предусматривать при установке противопожарных дверей 1-го типа для зданий I, II степеней огнестойкости и 2-го типа – для зданий III, IV степеней огнестойкости» [8].

³ Патент на полезную модель № 131049 U1 Российская Федерация, МПК E06B 5/16. Огнестойкий дверной блок (варианты) : № 2012140535/12 : заявл. 21.09.2012 : опубл. 10.08.2013 / А. П. Кисляков. – EDN HEQYIJ

⁴ Патент на полезную модель № 99808 U1 Российская Федерация, МПК E06B 5/16. Дверное полотно (варианты) : № 2010124966/03 : заявл. 01.06.2010 : опубл. 27.11.2010 / А. П. Кисляков ; заявитель ООО «Научно-производственное объединение НОРТ». – EDN OLMQOL

⁵ Приказ Минкультуры России от 26.04.2019 № 528 «Об утверждении предмета охраны объекта культурного наследия федерального значения «Ансамбль мемориального комплекса «Сапун-гора», 1944–1974 годы (г. Севастополь)». [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_323920/ (дата обращения: 13.02.2026).

⁶ Приказ Минкультуры России от 28.04.2022 № 678 «Об утверждении предмета охраны объекта культурного наследия федерального значения «Здание панорамы «Оборона Севастополя в 1854–1855 годах», 1905 год, военный инженер О.И. Энберг при участии архитектора В.А. Фельдмана, входящего в состав объекта культурного наследия федерального значения «Ансамбль мемориального комплекса памятников обороны города Севастополя в 1854–1855 годах «Исторический бульвар», 1904–1905 годы, военный инженер О.И. Энберг (г. Севастополь)». [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_416392/ (дата обращения: 13.02.2026).

Соответственно для путей эвакуации, ведущих на лестничную клетку, огнестойкость двери 1-го типа составляет EI60 (дверное полотно и коробка способны в течение 60 мин выдерживать контакт с огнем), огнестойкость двери 2-го типа составляет EI30 (дверное полотно и коробка способны в течение 30 мин выдерживать контакт с огнем). При проведении реставрационных работ специалисты обязаны сохранить и восстановить существующее деревянное заполнение.

Для исследования огнестойкости фрагментов существующих деревянных заполнений, для этого фрагменты образцов толщиной 40 мм предварительно были зачищены от нанесенных ранее отделочных слоев, испытания проводили согласно методике по ГОСТ 30247.0-94⁷.

Помимо противоречий между ФЗ-73 и нормативной документацией по пожарной безопасности возникают разночтения с самим предметом охраны: виды работ, разрешенные на объекте, различаются в зависимости от формулировки. Так, формулировка в предмете охраны: «...габариты, форма и расположение дверных проемов...» позволяет реставраторам изготовить новое дверное полотно, полностью повторяющее существующее и соответствующее требованиям свода правил СП 1.13130.2020 по пределу огнестойкости в рамках разрешенного вида работ по сохранению и приспособлению объекта культурного наследия к современному использованию.

Огнестойкость необработанных деревянных конструкций рассчитывают согласно методике по ГОСТ 30247.0-94⁷, результаты расчетов огнестойкости необработанных дверных блоков из лиственницы и дуба, толщиной 40 мм представлены в табл.1.

Таблица 1

Огнестойкость необработанных деревянных конструкций

Параметр	Дуб	Лиственница
Габаритные размеры образцов, мм	355 × 453	352 × 450
Средняя плотность образца, кг/м ³	720	690
Время до потери целостности (E), мин	16,5	13,5
Время потери теплоизолирующей способности (I), мин	18,5	16,0
Расчётный предел огнестойкости (EI), мин	16,5	13,5

В результате анализа полученных результатов можно сделать вывод о несоответствии расчетных пределов огнестойкости и требований нормативной документации к путям эвакуации. Таким образом, для соблюдения требований пожарной безопасности и предмета охраны объектов культурного наследия в зависимости от формулировок предлагается выполнять следующие методы.

Если в предмете охраны указано «...габариты, форма и расположение дверных проемов...», то для выполнения требований по пожарной безопасности предлагается

⁷ ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования : межгосударственный стандарт : издание официальное : дата введения 1996-01-01 / разработан ЦНИИСК им. Кучеренко, ВНИИПО МВД России. – Москва : Стандартинформ, 2003. – 11 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9055248> (дата обращения: 13.02.2026).

замена существующих дверей на путях эвакуации на противопожарные с пределом огнестойкости EI60 и обшивкой дверных блоков деревянными накладками с полным повторением материала, габаритных размеров и формы дверных полотен (рис. 1).



Рис.1. Противопожарный дверной блок с деревянными накладками:
а – процесс изготовления и обшивки в реставрационной мастерской;
б – готовый дверной блок перед монтажом

Деревянные накладки перед монтажом обработать в следующей последовательности: высушенные накладки, предварительно обработать антисептирующими составами, после выдержать в ванне с огнезащитными составами 1-й группы огнестойкости, в качестве финишного покрытия использовать огнестойкий эпоксидный лак. Результаты оценки огнестойкости обработанных таким образом образцов древесины представлены в табл. 2.

Таблица 2

Огнестойкость обработанных деревянных образцов

Параметр	Дуб	Лиственница
Габаритные размеры образцов, мм	350 × 450	350 × 450
Средняя плотность образца, кг/м ³	915	818
Время до потери целостности (Е), мин	46,5	41,5
Время потери теплоизолирующей способности (I), мин	48,5	43,5
Расчётный предел огнестойкости (EI), мин	46,5	41,5

В случае, когда в формулировке предмета охраны указано «... материал и рисунок деревянного заполнения...», то реставраторам в процессе проведения работ для современного использования необходимо сохранить существующие дверные блоки. Такие работы по реставрации дверных блоков предлагается проводить с частичной заменой дверной коробки, в зоне притворов установить металлические накладки, дверную коробку обработать огнезащитными составами до 1-й группы огнестойкости методом выдерживания в ванне с огнезащитным составом, на этапе финишной обработки покрыть в несколько слоев огнестойким

эпоксидным лаком. На внешней стороне выполнить пазы с заполнением огнезащитными вспучивающимися составами. Особое внимание перед монтажом коробки необходимо уделить монтажному шву, который должен быть заполнен огнестойкой монтажной пеной с последующей защитой огнестойким герметиком и отделкой дверных откосов негорючими материалами. Историческое дверное полотно необходимо очистить от старых слоев окраски, демонтировать поврежденные участки полотна с заменой на аналогичные по материалу и геометрическим параметрам. Его следует обработать огнезащитными составами до 1-й группы огнестойкости, а также выполнить работы по окраске и тонировке дверного полотна до исторического оттенка. На заключительном этапе необходимо обработать в несколько слоев огнестойким эпоксидным лаком (рис. 2).

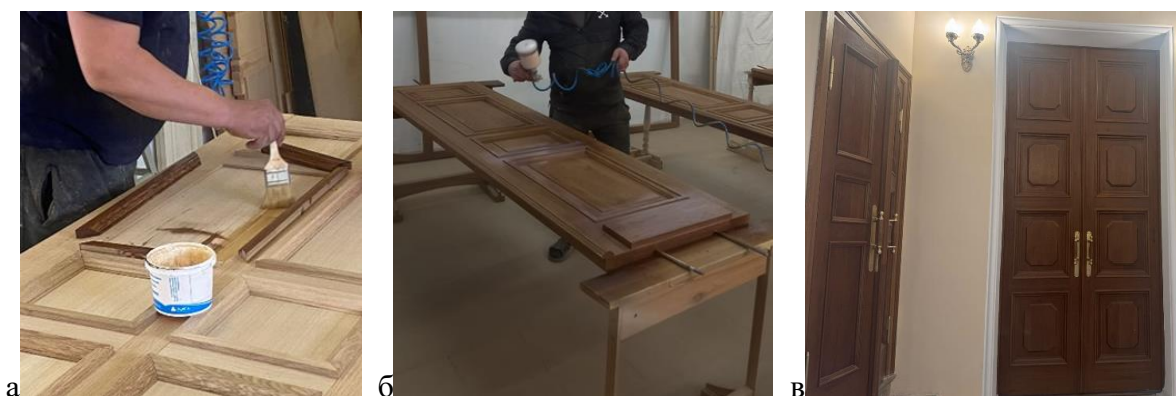


Рис. 2. Процесс реставрации исторических дверных полотен:
а – покрытие полотна огнезащитными составами до 1-й группы огнестойкости;
б – обработка дверных полотен огнезащитным эпоксидным лаком; в – дверные полотна после реставрационных работ, установленные на объекте проведения работ

На этапе разработки и согласования проектной документации необходимо предусмотреть устройства самозапирания дверных блоков, соответствующих характеру отделки и колористическим решениям интерьеров сохраняемого объекта культурного наследия.

Выводы. Актуальность работы обусловлена недостаточным исследованием вопросов адаптации исторических конструкций, в частности, дверных блоков на путях эвакуации, к современным нормативам пожарной безопасности с учетом индивидуального характера предмета охраны объекта культурного наследия.

В ходе исследования проведен анализ нормативных противоречий между требованиями сохранения подлинности и действующими нормами пожарной безопасности. Для разрешения этих противоречий рассмотрены методы повышения огнестойкости дверных блоков в зависимости от формулировок предмета охраны объекта культурного наследия. Данные методы позволили повысить расчетный предел огнестойкости дубовых дверей с EI16,5 до EI46,5, что обеспечивает их соответствие требованиям для дверей 2-го типа (EI30) и приближает к требованиям для дверей 1-го типа (EI60). Для последнего случая необходимо применение дополнительных мероприятий, подтверждающих полноту и обоснованность расчетом индивидуального пожарного риска.

Таким образом, разработанные подходы позволяют не только сохранить подлинность исторических конструкций, но и обеспечить требуемый уровень пожарной безопасности на путях эвакуации людей.

Полученные результаты и методические решения могут быть использованы при разработке проектов реставрации и приспособления других объектов культурного наследия, имеющих аналогичные планировочные особенности и предметы охраны, что вносит вклад в решение актуальной задачи гармонизации сохранения исторического наследия и современных требований пожарной безопасности.

Список литературы / References

1. Перечень объектов культурного наследия регионального значения, расположенных на территории города Севастополя: утв. постановлением Правительства Севастополя от 01.08.2025. [Электронный ресурс]. – URL: <https://uookn.sev.gov.ru/perechen-obektov-kulturnogo-naslediya/perechen-obektov-kulturnogo-naslediya-regionalnogo-znacheniya-raspolozhennykh-na-territorii-goroda-s/?13022026> (дата обращения: 13.02.2026).

Perechen obyektov kulturnogo naslediya regionalnogo znacheniya, raspolozhennykh na territorii goroda Sevastopolya. [List of cultural heritage sites of regional significance located on the territory of the city of Sevastopol]. Approved. by the Resolution of the Government of Sevastopol dated 01.08.2025. Available at: <https://uookn.sev.gov.ru/perechen-obektov-kulturnogo-naslediya/perechen-obektov-kulturnogo-naslediya-regionalnogo-znacheniya-raspolozhennykh-na-territorii-goroda-s/?13022026> (accessed: 13.02.2026). (In Russian)

2. Об утверждении перечня объектов культурного наследия регионального значения и объектов культурного наследия выявленных, расположенных на территории Республики Крым: постановление Государственного комитета по охране культурного наследия Республики Крым от 17.10.2024 № 577-ОКН. [Электронный ресурс]. – URL: <https://mkult.rk.gov.ru/structure/43acd2d2-f820-4d1c-a60d-1b19350f0386> (дата обращения: 13.02.2026).

Ob utverzhdenii perechnya obyektov kulturnogo naslediya regionalnogo znacheniya i obyektov kulturnogo naslediya vyyavlennykh, raspolozhennykh na territorii Respubliki Krym [On approval of the list of cultural heritage sites of regional significance and identified cultural heritage sites located on the territory of the Republic of Crimea: Resolution of the State Committee for the Protection of Cultural Heritage of the Republic of Crimea dated 17.10.2024 No. 577-OKN]. Available at: <https://mkult.rk.gov.ru/structure/43acd2d2-f820-4d1c-a60d-1b19350f0386> (accessed: 13.02.2026).

3. Некоторые особенности повышения огнестойкости деревянных конструкций / А. М. Газизов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 4(60). – С. 142–146. – DOI 10.18324/2077-5415-2023-4-142-146. – EDN AAAUDJ

Gazizov, A. M., Gorohovsky, A. G., Shishkina, E. E., Kruchinin, I. N., Myalitsin, A. V., Agafonov, A. S. *Nekotoryye osobennosti povysheniya ognestoykosti derevyannykh konstruktсий* [Some features of increasing the fire resistance of wooden structures]. Systems. Methods. Technologies. 2023, no. 4(60), pp. 142-146. DOI 10.18324/2077-5415-2023-4-142-146. EDN AAAUDJ (In Russian)

4. Тухбатулин, М. Н. Исследование влияния продолжительности пропитки огнезащитным составом на огнестойкость древесины / М. Н. Тухбатулин, А. Е. Шкуро, Т. В. Якубова // Системы. Методы. Технологии. – 2025. – № 3(67). – С. 169–174. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-3-169-174. – EDN JBZPXP

Tukhbatulin, M. N., Shkuro, A. E., Yakubova, T. V. *Issledovanie vliyaniya prodolzhitel'nosti propitki ognezashchitnym sostavom na ognestoykost' drevesiny* [Study of the influence of duration of impregnation with fire-retardant composition on fire resistance of wood]. Systems. Methods.

Technologies. 2025, no. 3(67), pp. 169-174. DOI 10.18324/2077-5415-2025-3-169-174. EDN JBZPXP (In Russian)

5. Скакунов, А. С. Огнестойкость древесины и способы ее повышения / А. С. Скакунов, О. Г. Циркина // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Иваново, 19 октября 2023 года. – Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. – С. 392–396. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_62055430_37663247.pdf (дата обращения: 13.02.2026).

Skakunov, A. S., Tsirkina, O. G. [Fire resistance of wood and ways to increase it]. Materials of VI International scientific-practical conference «Modern fireproof materials and technologies». Ivanovo, October 19, 2023. Ivanovo, IFRA of SFS of EMERCOM of Russia Publ., 2023, pp. 392-396. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_62055430_37663247.pdf (accessed: 13.02.2026). (In Russian)

6. Щелкунов, В. И. Огнестойкость противопожарных дверей : специальность 05.26.01 «Охрана труда (по отраслям)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Валерий Иванович Щелкунов . – Москва: НИИ ПО, 1992. – 24 с. – Место защиты: Всероссийский ордена «Знак почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МВД РФ.

Shchelkunov, V. I. *Ognestoykost protivopozharnykh dverey* [Fire resistance of fire doors : 05.26.01 «Occupational safety (by industry)» specialty : abstract of Candidate of Technical Sciences dissertation / Valery Ivanovich Shchelkunov]. Moscow, NII PO Publ., 1992. 24 p. Place of thesis defence: All-Russian Order of the Badge of Honor Research Institute for Fire Defense of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation. (In Russian)

7. Сушкова, О. В. Обеспечение пожарной безопасности зданий культурно-исторического наследия с размещением в них старинных экспонатов : специальность 2.1.15. «Безопасность объектов строительства» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ольга Владимировна Сушкова. – Москва : НИУ МГСУ, 2023. – С. 131–145. – Место защиты: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

Sushkova, O. V. *Obespecheniye pozharной bezopasnosti zdaniy kul'turno-istoricheskogo naslediya s razmeshcheniyem v nikh starinnykh eksponatov* [Ensuring fire safety of cultural and historical heritage buildings housing ancient exhibits : 2.1.15 «Safety of construction sites» specialty : Candidate of Technical Sciences dissertation / Olga Vladimirovna Sushkova]. Moscow, MGSU Publ., 2023. pp. 131-145. Place of thesis defence: Moscow State University of Civil Engineering. (In Russian)

8. Сазонова, С. А. Мероприятия по защите деревянных конструкций от пожаров / С. А. Сазонова, А. В. Кочегаров, В. Ф. Асминин // Техносферная безопасность: современные научные тенденции, технические и организационные средства и методы обеспечения, специальное образование : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 20–22 мая 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 250–261. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_73942255_45692880.pdf (дата обращения: 13.02.2026).

Sazonova, S. A., Kochegarov, A. V., Asminin, V. F. [Protection measures of wooden structures from fires]. Materials of the All-Russian scientific and practical conference «Technosphere safety: modern scientific trends, technical and organizational means and methods of provision, special education». Voronezh, May 20–22, 2024. Voronezh, Morozov VSUFT Publ., 2024, pp. 250-261. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_73942255_45692880.pdf (accessed: 13.02.2026). (In Russian)

Дата поступления рукописи 16.02.2026
Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В. В. Лебедевой

Vladimir Albertovich Matveev, Post-graduate student; e-mail: *matveev.vladimir0@mail.ru*
Larisa Alexandrovna Nichkova, Cand. of Tech. Sci., Head of the Department;
e-mail: *nichkova@mail.sevsu.ru*
Sergey Mikhailovich Rykunov, Assistant of the Department; e-mail: *smrykunov@mail.sevsu.ru*
Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University»
299053, Sevastopol, Universitetskaya St., 33. Phone: +7 (978) 669-99-92

INCREASING THE FIRE RESISTANCE OF DOOR BLOCKS ON ESCAPE ROUTES IN HISTORIC BUILDINGS

Objective. Development of methods to increase the fire resistance of wooden blocks located on evacuation routes in historical buildings of cultural heritage sites, taking into account the protected status of structures.

Methodology. Analysis of the requirements of regulatory documentation: FZ–73, SP 1.13130.2020; fire resistance testing of samples of untreated structures; selection of fire resistance enhancement technology depending on the «subject of protection».

Results. The fire resistance of untreated and treated samples of wooden door blocks was investigated. Depending on the security status of the facility, practical options for increasing the fire resistance of door blocks on escape routes are proposed.

Scientific novelty. Practical methods of increasing the fire resistance of door blocks on escape routes in historical buildings are proposed.

Practical significance. The standard formulations establishing the protective status of the building structure are considered, based on which methods for increasing the fire resistance of door blocks on escape routes are selected. The use of which will allow owners and organizations operating historical buildings to comply with the requirements of regulatory documentation while maintaining the protected status of structures.

Keywords: *cultural heritage object; fire safety; historical door; fire resistance; object of protection; fire-resistant treatment.*

For citation: Matveev V. A., Nichkova L. A., Rykunov S. M. Increasing the fire resistance of door blocks on escape routes in historic buildings. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 126-133. EDN WBUXYI

УДК 614.8"363":622.323

Светлана Александровна Гарелина, канд. техн. наук., доц., профессор кафедры;

e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Алексей Юрьевич Скрынников, старший преподаватель Института развития МЧС России;

e-mail: skrynnikov@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика»

141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, 1А. Тел.: 8 (498) 699-05-59

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Цель. Снижение риска развития чрезвычайных ситуаций на начальной стадии аварийных процессов в условиях ограниченных ресурсов за счёт обоснования параметров технических средств их предотвращения с учётом влияния этих параметров на риск.

Методика. Методика основана на риск-ориентированном подходе к предотвращению чрезвычайных ситуаций и анализе существующих подходов к реализации соответствующих мероприятий с применением технических средств и инженерных решений. Для обоснования параметров технических средств использован метод анализа иерархий, обеспечивающий формирование и приоритизацию критериев, влияющих на риск-определяющий параметр. Оценка влияния параметров технических средств на снижение уровня риска выполнена с применением расчётных зависимостей и методов математического моделирования. Экономическая целесообразность проектных решений обоснована с использованием оценочных методов экономического анализа.

Результаты. Разработана методика обоснования параметров технических средств предотвращения чрезвычайных ситуаций, включающая алгоритм выбора риск-определяющего параметра, формирования и приоритизации критериев, структурного синтеза, параметрического и экономического обоснования проектных решений. Апробация методики выполнена на примере технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов, что подтвердило её практическую применимость и корректность заложенных расчётных предпосылок.

Научная новизна. Впервые разработан алгоритм методического риск-ориентированного подхода, формализующий причинно-следственную связь соотношений «параметры технического средства – риск-определяющий параметр – снижение уровня риска чрезвычайных ситуаций» для обоснования перехода от оценки риска на начальной стадии возникновения аварийной ситуации к обоснованию параметров предлагаемых технических средств с учетом ресурсных ограничений.

Практическая значимость. Предложенная методика позволяет повысить обоснованность параметров технических средств предотвращения и локализации чрезвычайных ситуаций за счёт учёта их влияния на уровень риска и затрат. Её применение обеспечивает формирование рационального баланса между эффективностью технических средств и ресурсными ограничениями и может быть использовано при проектировании технических средств различного назначения, включая мобильные средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: *риск-ориентированный подход; чрезвычайные ситуации техногенного характера; средство предотвращения чрезвычайных ситуаций; ограниченность ресурсов; локализация разливов нефти и нефтепродуктов; риск-определяющий параметр.*

Для цитирования: *Гарелина С. А., Скрынников А. Ю. Обоснование параметров технических средств предотвращения чрезвычайных ситуаций // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 1 (63). – С. 134–143. – EDN YFXNUE*

Постановка проблемы. Предотвращение чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) техногенного характера относится к числу основных задач обеспечения промышленной и экологической безопасности. Эффективность мероприятий

по предотвращению ЧС во многом определяется характеристиками применяемых технических средств.

В условиях высокой неопределённости аварийных сценариев объем материальных ресурсов, создаваемых для ликвидации ЧС, и время реагирования на аварии и ЧС являются ограничениями при планировании мероприятий по ликвидации ЧС (далее – ресурсные ограничения). При этом риск развития ЧС становится определяющим фактором при принятии проектных решений и выборе параметров технических средств предотвращения ЧС [1, 2]. Вместе с тем, в настоящее время в области предотвращения ЧС отсутствует формализованный подход к обоснованию параметров технических средств, предназначенных для раннего воздействия на аварийные процессы и ограничения масштабов их возможных последствий. На практике обоснование структуры и параметров технических средств нередко осуществляют на основе эмпирических решений либо адаптации существующих конструкций без количественной оценки их влияния на уровень риска развития аварийных сценариев. Подобный подход не обеспечивает необходимую воспроизводимость проектных решений и затрудняет оценку целесообразности применения технических средств в условиях ограниченных ресурсов.

Одним из возможных путей решения указанной проблемы является применение методического подхода, ориентированного на формализацию процесса обоснования параметров технических средств предотвращения ЧС с учётом нормативных требований, эксплуатационных условий и ресурсных ограничений. Такой подход основан на использовании риск-определяющего параметра, позволяющего установить количественную связь между параметрами технических средств и изменением уровня риска. Верификация предлагаемого подхода может быть выполнена на примере обоснования параметров и экспериментальной проверки технических средств локализации разливов нефти и нефтепродуктов, относящихся к числу наиболее опасных техногенных аварий [3, 4].

Цель исследования – снижение риска развития ЧС на начальной стадии аварийных процессов в условиях ограниченных ресурсов за счёт обоснования параметров технических средств их предотвращения с учётом влияния этих параметров на риск.

Материалы и результаты исследований. Предлагаемый методический подход для обоснования параметров технических средств предотвращения ЧС определяет алгоритм, предусматривающий переход от выбора риск-определяющего параметра к обоснованию критериев, формированию структуры технического средства и выбору его параметров с последующей оценкой экономической целесообразности принятых решений (рис. 1).

На первом этапе методики осуществляют обоснование риск-определяющего параметра, используемого в качестве исходной величины для последующего формирования критериев и обоснования параметров технического средства предотвращения ЧС на основе формализации связи между характеристиками технического средства и снижением уровня риска развития ЧС. Под риск-определяющим параметром понимают количественно интерпретируемый показатель, характеризующий способность технического средства воздействовать на уровень риска развития аварийного процесса и обеспечивать недопущение его развития в ЧС либо ограничение масштабов возможных последствий.

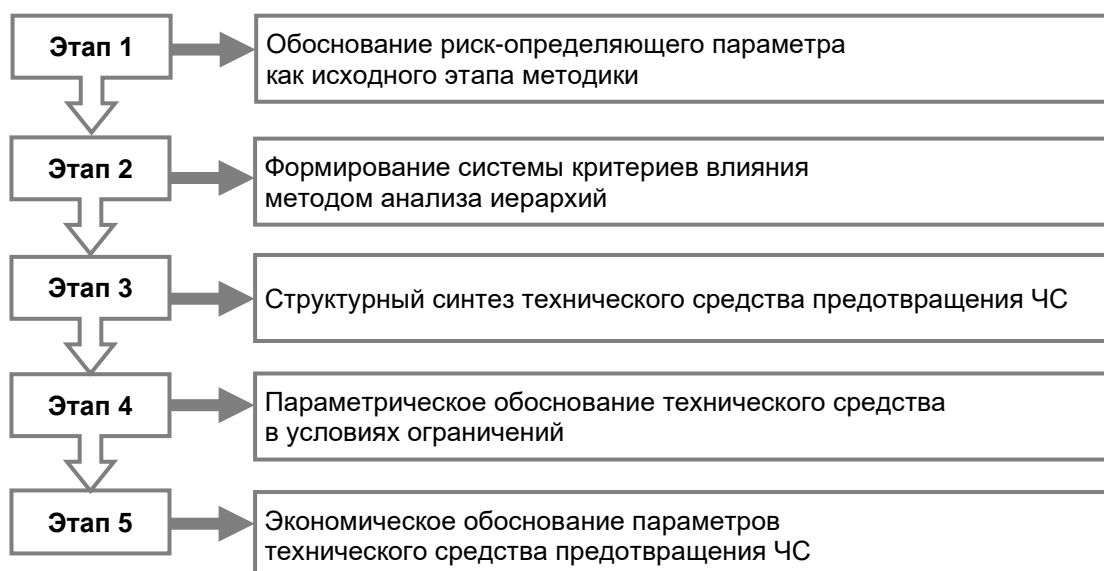


Рис. 1. Алгоритм обоснования параметров технических средств предотвращения ЧС

На втором этапе методики на основе сформированного риск-определяющего параметра формируют систему критериев, влияющих на эффективность предотвращения ЧС. Этап направлен на структурирование задачи обоснования параметров технического средства и выявление факторов, оказывающих наибольшее влияние на уровень риска развития аварийного процесса.

Для анализа и приоритизации критериев применяют метод анализа иерархий, позволяющий учитывать как количественные, так и качественные характеристики, данный метод используют для обоснования относительной значимости критериев, влияющих на риск-определяющий параметр.

Результатом второго этапа является ранжированная система критериев, формирующая совокупность требований к структуре и параметрам технического средства предотвращения ЧС и служащая исходной базой для последующих этапов методики.

На третьем этапе методики выполняют структурный синтез технического средства предотвращения ЧС на основе приоритетов критериев, полученных на предыдущем этапе, который направлен на формирование принципа построения технического средства, состава и взаимосвязи его элементов.

Структурные решения принимают с ориентацией на критерии, определяющие снижение уровня риска, что позволяет исключить избыточные элементы конструкции и сосредоточить ресурсы на функционально значимых элементах технического средства.

На четвертом этапе осуществляют параметрическое обоснование конкретных значений параметров технического средства предотвращения ЧС с учётом совокупных условий его применения для достижения требуемого уровня снижения риска при допустимых условиях эксплуатации.

Параметрическое обоснование выполняют с использованием расчётных зависимостей и результатов экспериментальных исследований, позволяющих оценить влияние отдельных параметров на риск-определяющий показатель и подтвердить обоснованность принятых проектных решений.

Завершающим этапом алгоритма является экономическое обоснование параметров технического средства предотвращения ЧС, направленное на оценку

целесообразности реализации выбранных структурных и параметрических решений. На данном этапе осуществляют сопоставление затрат, связанных с изготовлением, внедрением и эксплуатацией технического средства, с уровнем предотвращаемого риска.

Экономическое обоснование позволяет оценить рациональный баланс между эффективностью технического средства и затратами, что подтверждает практическую применимость обоснованных параметров в реальных условиях эксплуатации.

Для проверки практической применимости разработанного методического подхода рассмотрено его применение при обосновании параметров технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов.

Существенную долю потенциальных ЧС составляют аварии, сопровождающиеся разливами нефти и нефтепродуктов, последствия которых при отсутствии своевременных мер локализации способны быстро перерасти в аварию со значительным экологическим и экономическим ущербом¹.

Техническое средство локализации разливов нефти и нефтепродуктов – как частный случай предотвращения ЧС.

Этап 1. Для технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов в качестве риск-определяющего параметра принято время локализации разлива, характеризующее интервал от момента возникновения аварийного разлива до формирования устойчивого ограждающего контура с использованием технического средства локализации. Выбор данного параметра обусловлен тем, что продолжительность интервала до локализации определяет площадь и объём распространения нефтяного пятна, от которых напрямую зависят масштабы экологического и экономического ущерба, и вероятность развития аварийного события в ЧС.

Этап 2. На данном этапе анализируют существующие технические средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов для выявления факторов, ограничивающих сокращение времени локализации разлива. К характерным недостаткам таких средств относят значительное время развёртывания, высокую массу элементов, необходимость привлечения специализированной техники² [5]. Дополнительно учитывают ограничения, обусловленные действующими нормативными требованиями и условиями эксплуатации технических средств локализации разливов нефти и нефтепродуктов¹, включая требования по безопасности, мобильности и возможности применения на начальной стадии аварии.

С учётом выявленных недостатков и нормативных ограничений сформирована система критериев, определяющих параметры технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов и их влияние на сокращение времени локализации (табл.).

Для определения относительной значимости сформированных критериев применён метод анализа иерархий и установлено, что наибольшее влияние на достижение риск-определяющего параметра оказывают критерии, связанные с оперативностью применения технических средств локализации разливов нефти

¹ Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2451

² ТУ 8026-010-35615057-03 Подпорные стенки нефтеограждающие // ЛЕССОРБ. – [Электронный ресурс]. – URL: lessorb.ru/products/bony/podpornye_stenki (дата обращения: 04.08.2025).

и нефтепродуктов, в первую очередь скорость развёртывания и мобильность. Ранжирование критериев в порядке убывания их влияния имеет вид: $K_1, K_8, K_7, K_{12}, K_4, K_9, K_5, K_2, K_{10}, K_3, K_6, K_{11}$.

Таблица

Система критериев для обоснования параметров технических средств локализации разливов нефти и нефтепродуктов

Критерий	Формулировка критерия	Способ обеспечения критерия
K_1	Возможность быстрого развёртывания	Высокая скорость развёртывания путём растягивания заранее сформированной конструкции
K_2	Учет форм рельефа при разворачивании	Адаптация конструкции к неровностям рельефа за счёт высокой гибкости шарнирных соединений
K_3	Адаптация к различным вариантам применения (фильтрующее / изолирующее исполнение)	Реализация решетчатой металлической конструкции с возможностью замены типа покрытия, обеспечивающего применение в фильтрующем и изолирующем вариантах
K_4	Возможность компактного хранения на объекте защиты	Складная конструкция, готовая к немедленному применению
K_5	Масса и габариты конструкции	Возможность доставки готовых секций к месту развёртывания с использованием неспециализированного транспорта
K_6	Стоимость конструкции	Стоимость конструкции, допускающая многократное применение и не превышающая затраты на возведение стационарных инженерных сооружений
K_7	Возможность транспортировки обычным транспортом	Соответствие габаритных размеров стандартным размерам транспортных контейнеров и автомобильных прицепов
K_8	Возможность разворачивания ограниченными силами персонала	Развёртывание путём вытягивания конструкции из транспортных контейнеров или прицепов
K_9	Надёжность и устойчивость конструкции на сдвиг и опрокидывание	Устойчивость конструкции к сдвигу и опрокидыванию при соблюдении условий эксплуатации
K_{10}	Возможность дооснащения дополнительными приборами	Возможность монтажа измерительного оборудования и средств видеонаблюдения на конструкцию
K_{11}	Конфигурационная адаптивность (возможность формирования сооружений различной формы)	Возможность формирования локализирующих и фильтрующих сооружений различной протяжённости и конфигурации
K_{12}	Отсутствие необходимости применения тяжёлой инженерной и строительной техники	Монтаж конструкции без использования тяжёлой инженерной и строительной техники

Полученные результаты свидетельствуют о доминирующей роли критериев, определяющих временные и организационные аспекты применения технических

средств локализации разливов нефти и нефтепродуктов, тогда как критерии, связанные со стоимостью и конструктивной сложностью, имеют второстепенное значение на стадии предотвращения ЧС.

Этап 3. С учётом доминирующей роли фактора времени и требований к оперативности применения, включая скорость развёртывания и мобильность, структура технических средств локализации разлива нефти и нефтепродуктов ориентирована на модульный принцип построения. Такой подход обеспечивает возможность быстрого развёртывания технического средства и его адаптации к различным условиям применения.

При структурном синтезе имеют значение не только компактность хранения, складированность и транспортируемость элементов технического средства, но и возможность их монтажа силами ограниченного числа персонала без привлечения тяжёлой инженерной и строительной техники.

Сформулированным требованиям и ограничениям наиболее соответствует конструкция мобильного технического средства локализации разлива нефти и нефтепродуктов, выполненная в виде складных многосекционных модулей заданной длины, соединяемых между собой замковыми элементами и монтируемых в произвольной конфигурации. Герметичность формируемого заграждения обеспечивается мягкими фартуками на концевых секциях модулей. Сверху модули обшиты тканевым или полимерным покрытием, а в качестве наполнителя может быть использован природный сорбент. По внешнему периметру мобильное техническое средство может быть дополнительно оснащено сорбирующими матами, навесным диагностическим и измерительным оборудованием [6]. Боковые проекции возможных вариантов конструкции мобильного технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов схематично представлены на рис. 2.

Этап 4. Для всех рассматриваемых вариантов конструкции мобильного технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов (рис. 2) выполнены расчёты устойчивости к сдвигу и опрокидыванию на различных типах подстилающей поверхности на основе условий равновесия с учётом действия внешних нагрузок (ветровых и дождевых), геометрических и массогабаритных параметров элементов конструкции, конфигурации соединений и характеристик подстилающей поверхности³ [7–9].

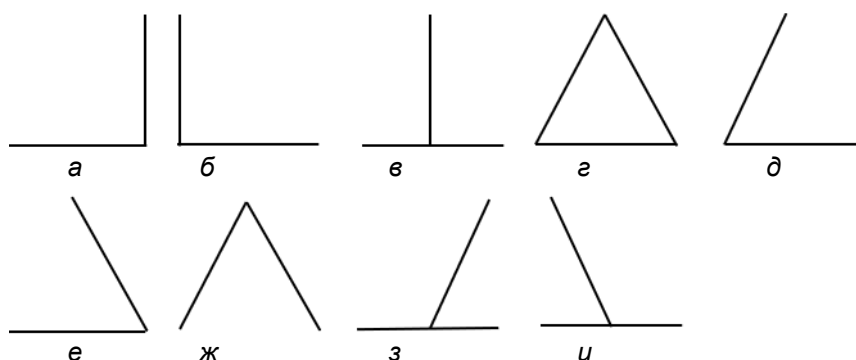


Рис. 2. Возможные варианты конструкции мобильного технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов

³ ГОСТ 12.2.033–78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования : гос. стандарт СССР : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министерства России от 26 апреля 1978 г. М. : Госстандарт СССР, 1978. 9 с.

По результатам расчётов для каждого варианта конструкции определены допустимые области параметров, обеспечивающих требуемую устойчивость к сдвигу и опрокидыванию. На этой основе выполнено сопоставление конструктивных решений с учётом условий минимизации массы конструкции и материалоёмкости, что позволило обосновать рациональную структуру мобильного технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов из числа возможных вариантов (рис. 2), а также определить его габаритные размеры, размеры поперечного сечения элементов несущей решётки и материалы конструкции.

Выбранный вариант конструкции обеспечивает выполнение основной функции – формирование устойчивого локализирующего ограждения – при минимальной массе и наименьшей стоимости по сравнению с альтернативными конструктивными решениями с учетом ограниченных финансовых ресурсов (рис. 3).

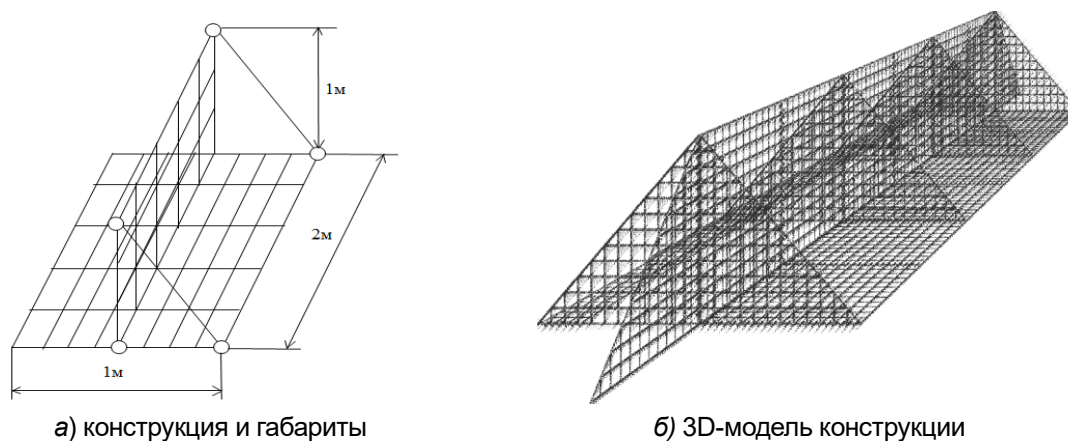


Рис. 3. Визуальное представление конструкции мобильного технического средства для локализации разлива нефти и нефтепродуктов

На основании результатов выполненных исследований изготовлен опытный образец мобильного технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов. Проведённые экспериментальные испытания показали соответствие результатов расчётным данным, что подтверждает корректность принятых предпосылок и обоснованность выбранных конструктивных и параметрических решений.

Этап 5. С учётом стоимости одной 2-метровой секции этого мобильного технического средства 2000 руб. удельная стоимость составляет порядка 1000 руб./м локализирующего контура. Соответственно, оценочная стоимость комплекта для формирования контура длиной L составляет $C \approx 1000L$ руб.

При оценочном снижении объёма разлива нефти и нефтепродуктов до локализации ориентировочно на 40 % предотвращаемый ущерб может быть представлен как $\Delta U \approx 0,4U_0$, где U_0 – ущерб (или затраты на ликвидацию) при типовом сценарии. Значение порядка 40 % получено из пропорционального уменьшения времени до локализации при допущении квазипостоянного расхода истечения: при $t_0 \approx 4$ ч (2 ч доставка + 2 ч установка) и $t_1 \approx 2,3$ ч (2 ч доставка + 20 мин установка) объём разлива нефти и нефтепродуктов до локализации уменьшается как $t_1 / t_0 \approx 0,58$, то есть предотвращаемая доля составляет $1 - 0,58 \approx 0,42$ (≈ 40 %).

В этом случае условие экономической целесообразности применения предлагаемого мобильного технического средства локализации разлива нефти

и нефтепродуктов имеет вид $U_0 \geq 2,5C$. Для контура порядка 100 м это соответствует уровню ущерба порядка 0,25 млн руб., что подтверждает практическую оправданность применения такого мобильного технического средства для предотвращения ЧС при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов.

Выводы. Показано, что при проектировании технических средств предотвращения ЧС исходным элементом должен являться риск-определяющий параметр, отражающий способность технического средства воздействовать на развитие аварийного процесса в начальной стадии, снижать вероятность его перерастания в ЧС и ограничивать величину ожидаемого ущерба.

Разработан риск-ориентированный методический подход к обоснованию параметров технических средств предотвращения ЧС, основанный на алгоритме выбора риск-определяющего параметра к формированию критериев, структурному синтезу и параметрическому обоснованию технических средств с последующей экономической оценкой проектных решений для применения в условиях ограниченных ресурсов и действующих нормативных требований.

Практическая реализация методики на примере технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов показала целесообразность использования времени локализации разлива в качестве риск-определяющего параметра, напрямую определяющего масштабы распространения нефтяного пятна и вероятность перерастания аварийного события в ЧС. Применение метода анализа иерархий позволило обоснованно определить приоритет критериев, связанных с оперативностью применения мобильных технических средств локализации разливов нефти и нефтепродуктов, в первую очередь скорости развёртывания и мобильности, и использовать полученные результаты в качестве исходных требований при структурном синтезе технических средств для формирования устойчивого локализирующего ограждения при ограничениях по массе, габаритам и численности персонала, что соответствует условиям применения технических средств предотвращения ЧС на начальной стадии аварийных процессов. Экономическое обоснование параметров мобильного технического средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов, выполненное на основе сопоставления затрат на формирование локализирующего контура и предотвращаемого ущерба, показало, что сокращение времени монтажа при сопоставимом времени доставки приводит к снижению объёма разлива до момента локализации ориентировочно на 40 %, обеспечивая экономическую целесообразность применения предложенного решения.

Полученные результаты подтверждают возможность практического использования разработанной методики для обоснования параметров технических средств предотвращения ЧС различного назначения, а также её применимость при проектировании мобильных технических средств локализации разливов нефти и нефтепродуктов.

Список литературы / References

1. Владимиров, В. А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия / В. А. Владимиров // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2014. – № 1 (6). – С. 217–229.

Vladimirov, V. A. [Oil Spills: Causes, Scales, Consequences]. Civil Protection Strategy: Problems and Research. 2014, no. 1 (6), pp. 217-229. (In Russian)

2. Калайдов, А. Н. Анализ причин и следствий деструктивных событий, связанных с разливом нефти и нефтепродуктов / А. Н. Калайдов, А. Н. Неровных, Д. А. Калайдов // Гражданская оборона на страже мира и безопасности. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2023. – С. 119–126.

Kalaydov, A. N., Nerovnyh, A. N., Kalaydov, D. A. *Analiz prichin i sledstviy destruktivnykh sobytij, svyazannykh s razlivom nefli i nefteproduktov* [Analysis of the causes and consequences of destructive events associated with the spill of oil and petroleum products]. Moscow, Academy of the SFS of EMERCOM of Russia Publ., 2023, pp. 119-126. (In Russian)

3. Гарелина, С. А. К вопросу обоснования системы локализации разливов нефти и нефтепродуктов / С. А. Гарелина, К. П. Латышенко, А. Ю. Скрынников // Научный вестник НИИ Респиратор. – 2025. – № 4(62). – С. 42–48. – EDN GEOQRW

Garelina, S. A., Latyshenko, K. P., Skrynnikov, A. Yu. [On the issue of substantiation of the localization system spills of oil and petroleum products]. Scientific bulletin of the NII «Respirator», 2025, no. 4 (62), pp. 42-48. EDN GEOQRW (In Russian)

4. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году. – ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2024. – 401 с. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (дата обращения: 15.08.2025).

[Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Industrial and Nuclear Supervision in 2023]. CJSC «Scientific technical center of industrial safety problems research», 2024, 401 p. Available at: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (accessed 15.08.2025). (In Russian)

5. Рекомендации по применению технических средств при ликвидации последствий разлива нефтепродуктов. – Москва: ВНИИ ГОЧС (ФЦ) МЧС России, 2020. [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/400285918> (дата обращения 11.11.2025).

Recommendations for the use of technical means in the liquidation of the consequences of an oil spill. Moscow: VNI GOCHS Publ., 2020. Available at: <https://base.garant.ru/400285918/> (In Russian).

6. К вопросу разработки мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов / С. А. Гарелина, К. П. Латышенко, А. Ю. Скрынников // Проблемы противодействия техногенным, биогенным, социокультурным угрозам и пути их решения. – 2023. – С. 13–19.

Garelina, S. A., Latyshenko, K. P., Skrynnikov, A. Y. *K voprosu razrabotki mobilnogo sredstva lokalizatsii razlivov nefli i nefteproduktov* [On the issue of developing a mobile tool localization of oil and petroleum product spills]. Problems of countering technogenic, biogenic, socio-cultural threats and ways to solve them. 2023, pp. 13-19. (In Russian)

7. Скрынников, А. Ю. Математическое моделирование конструкции мобильного заградительного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов на суше / А. Ю. Скрынников // Техносферная безопасность. – 2025. – № 3. – С. 151–163.

Skrynnikov, A. Yu. [Mathematical Modeling of the Design of a Mobile Means of Localization of Oil and Petroleum Products Spills on Land]. Technospheric safety, 2025, no. 3, pp. 151-163. (In Russian)

8. Иванец, Г. Е. Математическое моделирование : учебное пособие / Г. Е. Иванец, О. А. Ивина. – Кемерово, 2013. – 107 с.

Ivanets, G. E., Ivina, O. A. [Mathematical Modeling : textbook]. Kemerovo, 2013, 107 p. (In Russian)

9. Скрынников, А. Ю., Треушков, И. В. Результаты испытаний опытного образца мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов // Техносферная безопасность. – 2025. – № 4 (49). – С. 138–149.

Skrynnikov, A. Yu., Treushkov, I. V. [Results of testing of a prototype of a mobile means of localization of oil and oil product spills]. Technospheric safety, 2025, no. 4, pp. 138-149. (In Russian).

Дата поступления рукописи 27.01.2026
Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым

*Svetlana Aleksandrovna Garelina, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Professor of the Department;
e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru*

*Alexey Yuryevich Skrynnikov, Senior Lecturer of the Institute of Development
of the Ministry of Emergency Situations of Russia; e-mail: skrynnikov@yandex.ru
Federal State Budget Military Educational Institution of Higher Education
«The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia»
141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya st., 1A. Phone: 8(498)699-05-59*

SUBSTANTIATION OF PARAMETERS TECHNICAL MEANS OF PREVENTION EMERGENCY SITUATIONS

Objective. Reducing the risk of emergency situations at an early stage of emergency processes in conditions of limited resources by substantiating the choice of parameters of technical means of their prevention, taking into account the impact of these parameters on the risk.

Methodology. The methodology is based on a risk-based approach to the prevention of emergencies and an analysis of existing approaches to the implementation of relevant measures using technical means and engineering solutions. To substantiate the parameters of technical means, the method of hierarchy analysis is used, which provides the formation and prioritization of criteria affecting the risk-determining parameter. The assessment of the impact of the parameters of technical means on the reduction of the risk level was carried out using calculation dependencies and methods of mathematical modeling. The economic feasibility of design solutions is substantiated using evaluation methods of economic analysis.

Results. A methodology for substantiating the parameters of technical means of preventing emergency situations has been developed, including successive stages of choosing a risk-determining parameter, forming and prioritizing criteria, structural synthesis, parametric and economic justification of design solutions. The approbation of the method was carried out on the example of a technical means for localizing oil and petroleum products spills, which confirmed its practical applicability and the correctness of the calculated prerequisites.

Scientific novelty. It consists in the development of a risk-oriented methodology for substantiating the parameters of technical means of emergency prevention, which provides a formalized cause-and-effect relationship «parameters of the technical means – risk-determining parameter – change in the level of risk of emergency situations». For the first time, a step-by-step approach is proposed, which provides a transition from risk assessment at an early stage of the emergency process to the justification of the structure and parameters of technical means, taking into account resource constraints.

Practical significance. The proposed methodology makes it possible to increase the validity of the choice of parameters of technical means for the prevention and localization of emergency situations by taking into account their impact on the level of risk and costs. Its use ensures the formation of a rational balance between the efficiency of technical means and resource constraints and can be used in the design of technical means for various purposes, including mobile means of localizing oil and petroleum products spills.

Keywords: *risk-oriented approach; man-made emergencies; means of preventing emergency situations; limited resources; localization of oil and oil products spills; risk-determining parameter.*

For citation: Garelina S. A., Skrynnikov A. Yu. Substantiation of parameters technical means of prevention emergency situations. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 1 (63), pp. 134-143. EDN YFXNUE

Публикационная этика

Редакция «Научного вестника НИИ «Респиратор» придерживается принятых международным сообществом принципов публикационной этики (Рекомендации Комитета по этике научных публикаций (COPE)) и учитывает опыт авторитетных отечественных изданий, руководствуется международными правилами охраны авторского права, нормами действующего законодательства РФ, а также международными издательскими стандартами.

Все рукописи проходят рецензирование и редактуру.

Во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (плагиат, изложение недостоверных сведений и др.), в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, признания общественностью полученных автором научных результатов члены редакции, авторы, рецензенты обязаны соблюдать нижеизложенные этические стандарты.

Этические обязательства редакторов

1. Редакторы и рецензенты должны уважать интеллектуальную независимость авторов, при этом редакция оставляет за собой право отклонять, сокращать и редактировать статьи, исходя из редакционной политики издания. Правка согласуется с автором.

2. Редактор должен без предубеждения рассматривать представленные к публикации рукописи, независимо от места работы авторов, их национальной, религиозной принадлежности, гражданства или политических предпочтений.

3. Все публикуемые материалы проходят тщательный отбор и рецензирование. Редакция оставляет за собой право отклонить статью или вернуть ее на доработку. Автор обязан доработать статью в соответствии с замечаниями рецензентов или редакторов.

4. В основе решения о публикации лежат достоверность рассматриваемой работы и ее научная значимость с учетом актуальных требований в отношении авторского права, плагиата и допустимости открытой публикации отдельных материалов.

5. Рукописи, не соответствующие профилю издания, могут быть отклонены без рецензирования. Редактор может совещаться с членами редакционной коллегии и рецензентами во время принятия решения о публикации.

6. Ответственность за принятие или отклонение рукописи лежит на редакторе, при этом учитывается рекомендация рецензента с ученой степенью соответствующего научного направления относительно качества рукописи и достоверности представленных материалов.

7. Редактор и члены редакции не должны предоставлять другим лицам, кроме лиц, которые участвуют в профессиональной оценке данной рукописи, никакой информации, связанной с содержанием рукописи, находящейся на рассмотрении.

8. Ответственность и права редактора научного рецензируемого издания в отношении любой представленной рукописи, автором которой является сам редактор, должны быть делегированы какому-либо другому квалифицированному лицу.

9. В случае наличия конфликта интересов вследствие конкурентных, совместных и других взаимодействий и отношений с авторами редакторы должны брать самоотвод от рассмотрения рукописей.

10. Если редактору представлены убедительные свидетельства того, что основное содержание или выводы опубликованной работы являются ошибочными, он должен способствовать публикации соответствующего сообщения, указывающего на данную ошибку и, если возможно, исправляющего ее. Это сообщение может быть написано лицом, обнаружившим данную ошибку, или независимым автором.

11. Статьи, нарушающие нормы этики научных публикаций, могут быть ретрагированы после публикации, о чем редакция сообщает авторам статьи и организации, где выполнялась работа.

Этические обязательства рецензентов

1. Процедура рецензирования помогает редактору в принятии редакционных решений, а также может помочь автору повысить качество его работы. Рецензент осуществляет научную экспертизу авторских материалов, вследствие чего его действия должны носить непредвзятый характер.

2. Любая рукопись, полученная для рецензирования, является конфиденциальным документом, который нельзя обсуждать с лицами, не имеющими на то полномочий от редактора.

3. Рецензенты не должны использовать или раскрывать неопубликованную информацию, аргументы или интерпретации, содержащиеся в рассматриваемой рукописи, если на это нет согласия автора.

4. Если рецензент считает свою квалификацию недостаточной для рассмотрения рукописи или не имеет достаточно времени для быстрого выполнения рецензирования, или в случае наличия конфликта интересов с авторами, он должен уведомить об этом редактора и отказаться от рецензирования соответствующей рукописи.

5. Рецензент обязан давать объективную оценку. Личная критика автора неприемлема. Суждения, замечания и вопросы рецензентов должны быть аргументированы и по существу. Любое указание на избыточное заимствование материалов (плагиат, самоплагиат) должно сопровождаться соответствующей ссылкой.

Этические обязательства авторов

1. Представленная статья должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты.

2. Авторы гарантируют, что подают на рассмотрение полностью оригинальные работы. Плагиат во всех формах является неэтичным поведением и неприемлем.

3. Авторы несут ответственность за новизну и достоверность результатов научного исследования. Результаты проведенных исследований должны быть достоверны. Заведомо ошибочные или сфальсифицированные утверждения неприемлемы.

4. Недопустимо представление в несколько изданий одной и той же рукописи для публикации, или уже опубликованной в другом издании статьи. При этом возможна публикация статьи, расширяющей ранее опубликованный краткий предварительный отчет (сообщение) о той же самой работе с обязательным цитированием в данной рукописи более ранней публикации.

5. Авторами публикации (не более 4 человек) могут выступать только лица, которые внесли значительный вклад в формирование замысла, разработку, исполнение или интерпретацию представленного исследования. Окончательный вариант статьи должен быть согласован со всеми авторами и подписан ими. В статье, написанной несколькими авторами, тот из авторов, кто представляет в редакцию контактные сведения, документы и ведет переписку с редакторами, берет на себя ответственность за согласие остальных авторов статьи на ее публикацию в издании.

6. Автор должен цитировать те публикации, которые оказали определяющее влияние на существо излагаемой работы. Следует минимизировать цитирование работ, которые не имеют непосредственного отношения к данному сообщению.

7. В рукописи четко указываются любые опасности и риски, связанные с проведенными исследованиями.

8. Авторы должны поставить редактора в известность о любом потенциальном конфликте интересов, на которые могла бы повлиять публикация результатов, содержащихся в данной рукописи.

Порядок рецензирования авторских рукописей

1. Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию авторских рукописей, соответствующих специализации и тематике издания, с целью их экспертной оценки.

2. Поступившая в редакцию рукопись научной статьи рассматривается главным редактором (заместителем главного редактора) на предмет соответствия профилю издания. Если рукопись соответствует тематике и содержит новые актуальные результаты, то ее направляют рецензентам (соответствующего профиля) для экспертной оценки.

3. Рецензент оценивает рукопись и дает заключение о целесообразности ее публикации.

4. При наличии в положительной рецензии замечаний по содержанию статьи, статья отправляется автору на доработку.

5. Если рецензия содержит в целом отрицательный отзыв на статью, по решению редакции статья может быть либо снята с публикации, либо направлена автору для доработки. Доработанная статья после поступления в редакцию в обязательном порядке направляется на повторное рецензирование. Статьи, получившие две отрицательные рецензии подряд, не публикуются.

6. После рецензирования редакция регистрирует авторскую рукопись и совместно с автором ведет подготовку к публикации. Перед публикацией автору представляется отрецензированный сверстаный вариант рукописи для ознакомления.

7. Оригиналы рецензий хранятся в редакции в течение 5 лет.

Правила оформления авторских рукописей

К рассмотрению принимаются авторские рукописи в печатной и электронной версиях (Microsoft Word). Электронный вариант должен быть полностью идентичен печатному. Печатный вариант работы должен быть подписан всеми авторами.

Текст рукописи размещается на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев с отступом 1,0 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки структурных элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура рукописи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- для всех авторов (не более 4 человек) – полностью *имя, отчество и фамилия*, ученая степень, ученое звание, должность; e-mail, название организации, почтовый адрес, номера телефонов;

- название статьи (до 10 слов) на русском языке;
- реферат на русском языке (от 150 до 250 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурирован с выделением следующих элементов: цель; методы; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (не менее 5 слов и словосочетаний);

- основной текст статьи;
- список литературы / References;
- кем рекомендована статья к публикации;
- полный список авторов на английском языке, идентичный русскоязычному варианту;
- название статьи на английском языке;
- реферат на английском языке, идентичный русскоязычному варианту, с выделением соответствующих структурных элементов (objective, methods, results, scientific novelty, practical value, keywords).

Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы (и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями);
- анализ последних исследований и публикаций;

- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы;
- цель работы (постановка задания);
- описание методов (структуры, последовательности) проведения исследования;
- изложение основного материала и полученных научных результатов;
- выводы и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

Объем статьи, включая таблицы и рисунки, должен быть от 7 до 10 страниц. При этом графический материал не должен занимать более 25 % общего объема рукописи. Рукопись должна быть изложена лаконично, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Формулы – в редакторе Math Type (кроме однострочных), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом и располагают по центру строки. Номер формулы – справа в круглых скобках. Нумеруют только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Весь графический материал располагают в тексте после ссылок на него.

Диаграммы, схемы, графики, таблицы должны быть доступны для редактирования (Word, Excel, Paint, CorelDRAW, Компас-SD и др.).

Таблицы должны быть компактными, расположены в книжной ориентации, их размер не должен превышать страницу. Все таблицы должны иметь заголовки и быть пронумерованы, если их две или более.

Рисунки (схемы, фотоснимки и др.) должны быть четкими и контрастными, иметь разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруют, если их два или более. Подрисовочные подписи обязательны.

Все физические величины приводят в системе СИ. Недопустимо математические операторы заменять знаками пунктуации или элементами форматирования текста (например, вместо «минус» ставить «тире», вместо «плюс-минус» – подчеркнутый «плюс», вместо «меньше или равно» – подчеркнутое «меньше»). В тексте, в формулах, в таблицах, на рисунках размер и начертание одних и тех же символов должны совпадать.

Список литературы (не 10 источников) приводят в порядке упоминания в тексте; ссылки обозначают цифрами в квадратных скобках. Оформление библиографического описания на русском языке – ГОСТ Р 7.0.100-2018. Перечень источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из различных изданий. Самоцитирование допускается в объеме не более 20 % источников.

Не следует включать в список литературы нормативные документы, ГОСТы, патенты – ссылки на них должны быть даны непосредственно в тексте статьи.

References размещается непосредственно в списке русскоязычного библиографического описания по следующей универсальной схеме: транслитерация списка авторов; *транслитерация заглавия источника информации* (курсивом) и [в квадратных скобках его перевод на английский язык]; *транслитерация* или *перевод названия журнала / сборника* (курсивом); выходные данные с обозначениями на английском языке; обозначение источника информации после точки в круглых скобках (In Russian). Для англоязычных источников транслитерация не требуется, указывается источник информации (In English).

Рукопись должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами. Ответственность за содержание статьи несет авторский коллектив.

Статья сопровождается Экспертным заключением о возможности опубликования материалов в открытой печати, Согласием авторов на публикацию.

Авторские рукописи, принятые к публикации, автору не возвращаются.

**е рассматрива тс , ебре но
или не соответству т вы ей ло енным требовани м.**

Научный вестник НИИ «Респиратор»

2026, № 1 (63)

На русском языке

Издатель: Федеральное государственное казенное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

Издатель: Министерство Российской Федерации по делам гражданской
обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных
бедствий (. . . , 1); Федеральное государственное
казенное учреждение «Научно-исследовательский институт «Респиратор»
МЧС России» (. . . , 157)

Ответственный редактор Л. В. Барзий

Редактор О. К. Межова

Поступившие на издание авторские рукописи проходят рецензирование

**Авторы опубликованных материалов несут ответственность
за использование сведений, не подлежащих открытой публикации**

Подписано в печать 16.03.2026. 19.03.2026.
Формат 60×84^{1/8}. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать лазерная.
Усл. печ. л. 17,1. Тираж 20 экз. Заказ № 12.

ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России»
283048, . . . , ул. Артема, 157
Телефоны: +7 (856) 252-78-01; 252-78-60

E-mail: respirator@80mchs.gov.ru
URL: <https://niirespirator.organizations.mchs.gov.ru/vestnik>